

기후 감시 및 분석 체계 구축을 통한

이상 기후 대응 역량 강화

**The Development of Climate Monitoring and
Analytics System for Enhancing a Capability to
Respond to Extreme Climate**

여새림, 김선태, 명복순, 임슬희, 한정민, 이은정

기후사업본부 기후분석과

2021.12.

APEC기후센터

평문 초록

신뢰도 높은 기후 예측 정보는 기후 예측 모델의 결과와 함께 우리나라 기온과 강수에 영향을 미치는 다양한 기후 요소의 현황과 추이를 종합적으로 고려하여 생산됩니다. 또한 갈수록 심각해지는 이상기후 현상과 그로 인한 사회, 경제적 피해를 경감시키기 위해서는 이상기후 현상에 대한 과학적인 분석이 필요합니다. 이 과제에서는 우리나라 장기예보 신뢰도 향상에 기여하고, 빈번하게 발생하는 이상기후 현상에 대한 과학적 이해를 높이고자 기후 감시와 분석 체계를 구축하였습니다.

우리나라 기후는 계절별, 월별로 변동 특성이 매우 다르게 나타날 뿐만 아니라 열대 지역의 변동성부터 극지역의 변동성까지 다양한 기후 인자들의 영향을 받습니다. 다양한 기후 인자들 중, 이 과제에서는 인도양의 해양-대기 변동성이 우리나라 기후에 미치는 영향을 자세히 살펴보았습니다. 이는 최근 인도양의 기후 변동과 관련한 전 세계 이상기후 현상이 빈번하게 발생하고 있기 때문으로, 예를 들면, 2020년 봄철 호주의 산불이나, 여름철 동아시아의 폭우 등이 인도양 변동성에 밀접한 영향을 받았습니다. 따라서 최근 인도양의 해양-대기 변동성이 우리나라 기후에 미치는 역학을 전 계절에 대해 연구하였습니다.

다음으로 우리나라의 현업 장기예보의 활용도를 높이기 위한 연구를 수행하였습니다. 장기예보의 활용도가 가장 높은 계절은 여름철과 겨울철로 장기예보를 활용한 방재나 에너지 계획을 보다 효율적으로 수립하기 위해서는 예측 정보의 제공 시점이 중요합니다. 이 과제에서는 기존 예측 정보 제공 시점보다 한 달 앞서서 여름철과 겨울철을 예측 할 수 있도록 수시 기후 전망을 위한 예측 인자 또는 기법을 개발하는 연구를 수행하였습니다.

이 과제에서는 과학적인 전문성을 기반으로 기후 분석을 수행하는 한편 실질적으로 기후 분석 기반의 현업 장기예보 업무에 기여하는 업무를 수행하였습니다. 먼저, 기후 감시와 분석기반의 장기예보 생산 지침서인 「장기예보 가이드스」를 기후 평년값 변화 및 최신 연구 결과를 반영하여 개선하였습니다. 또한, 빈번하게 발생하는 이상기후 현상에 대한 시의적절한 분석을 통해 관계 기관을 대상으로 이상기후에 대한 과학적인 정보를 제공하였습니다.

기후 감시 분석 체계 구축을 위해서는 APCC 자체의 모니터링과 분석 시스템이 필수적인 요소입니다. 특히 장기예보와 이상기후 이슈 분석을 위해서는 정기적인 기후 현황 모니터링이 필요합니다. 또한, 기후 변수에 대한 기본적인 통계 분석을 제공하는 시스템을 통해 시의적절한 기후 분석 정보 제공 등의 업무를 매우 효율적으로 수행할 수 있습니다. 이를 위해 이 과제에서는 APCC 기후 감시 분석 시스템을 개발하였고, 동아시아 이상기후 모니터링 시스템을 운영하고 있습니다. 과학적인 연구, 현업에 직접적인 기여, 분석 시스템으로 이루어진 이 과제를 통해 APCC의 효율적인 기후 감시 분석 체계가 구축되기를 기대합니다. 이를 통해 관련 역량을 강화하고 일반 국민을 포함한 다양한 전문가 수요자 그룹에서 APCC의 기후 감시와 분석 정보를 가치 있게 활용하기를 기대합니다.

Executive Summary

At the APEC Climate Center, a three-year research project was conducted on the subject of extreme climate monitoring, analysis, and prediction in order to contribute to strengthening the ability to cope with extreme climates on the Korean Peninsula and in the Asia-Pacific region. In the first phase (2019) of the project, extreme climate monitoring techniques were developed to provide timely extreme climate information, and techniques to effectively apply statistical analysis to analyze and provide the possible causes of extreme climate events were developed. In addition, a web-based monitoring information service was established to utilize the developed monitoring technique and provide extreme climate information.

In the second phase (2020) of the project, improvements were made to the extreme climate monitoring information web service for the East Asian region that was built and operated in 2019. New climate monitoring factors for extreme event occurrence in Korea were developed, and a monitoring factor verification system was established to increase the usability of climate monitoring factors. By constructing statistical models using the a method for stochastic heat wave forecasts based on chosen neighbor years and a non-parametric bayesian machine learning method, we have produced three-month probabilistic forecast information for extreme hot climate events in Korea with good predictive skills. For increasing the reliability and usefulness of the forecast information of the Korea Meteorological Administration's seasonal forecast model, methods such as a method of correcting forecast biases were proposed. A extreme climate analysis report were provided that integrates monitoring, attribution, and post-analysis for the predictive information of the record-breaking events in 2020 to help identify and improve the climate monitoring factor setting in observation and prediction errors of the prediction model.

The third phase of this project aims to enhance the capability of operational long-range forecast by establishing the APCC climate monitoring and analytics system. For developing this system, it is necessary to understand how the various climate factors affect climate variability over Korea. Based on the scientific research foundation, this project also aims to contribute the operational long-range forecast in Korea by analyzing pending issues about current climate, which includes the analysis on extreme climate, monthly climate issue analysis. Development of APCC's own monitoring and analysis tools would be useful to accomplish this project more efficiently. Based on this background, APCC climate monitoring and analytics system is established by comprising the three main parts as scientific research, contribution to operational long-range forecast, and development of APCC's climate monitoring and analysis tools.

The first part of this project is to identify the influence of ocean and atmosphere variability over Indian Ocean on climate variability over Korea. As a result of applying a statistical method to analyze the relationship between the convective activity in the Indian Ocean and surface air temperature and precipitation fluctuations in South Korea in the spring, warm and wet condition in March and April appears in Korea through atmospheric wave propagation forced with convective activity in the Bay of Bengal region. On the other hand, in May, atmospheric waves propagate toward the Korean peninsula by the convective activity in the Arabian Sea region, leading to warm and wet month in south Korea. It is found that the convective activity in the Bay of Bengal and the Arabian sea is possibly predicted by using sea surface temperature (SST) anomalies in the South Indian Ocean region and in the Arabian Peninsula region, respectively, at one or two month lead times. In the case of summer, when the Indian Ocean has a positive (negative) SST anomalies in the spring after El Niño (La Niña) peaks, the anomalous northwest Pacific anticyclonic (cyclonic) circulation is maintained until August (July), and Korea is affected by the southwestly (easterly or southeasterly) winds. The warming of the tropical Atlantic Ocean in summer contributes to the northward shift of the La Niña-decaying summer anomalous Northwest Pacific (NWP) cyclone, which causes the Korean Peninsula to be affected by the dry northeast winds, and also to the enhancement of an El Niño-decaying summer NWP high pressure system. The tendency of temperature and precipitation in Korea are discussed further, relating to variability in the Indian Ocean in spring and summer.

For autumn season, it is identified that three distinct convection structures over the Indo-western Pacific, which cause high temperature extreme events in Korea based on the k-means clustering analysis. The three clusters are associated with the phase 5 of Madden-Julian Oscillation, La Niña, and coupled El Niño and Indian Ocean dipole, respectively. To investigate the winter climate variability in relation to thermal forcing from the Indian Ocean, the two distinctive upper atmospheric circulation patterns over the subtropical Eurasian continent are identified and their influence on Korean climate is examined particularly focusing on December.

The next research subject is the development of climate predictors for summer and winter season for advancing by one month from the current release date of operational long-range forecast that is, from May and November to April and October for summer and winter, respectively. In order to find usable climate predictors in April for summer months, for previously-used predictors that are based on the values later than April, we replaced original values with the values in March. It was found that predictability does not reduce substantially especially for the predictors based on sea surface temperatures since their tendency lasts several months. In addition, in order to improve predictability, we developed a prediction system based on similarity of detail-processes that 1) diagnoses impacts of a predictor on the atmospheric variables (i.e., past correlations of geopotential heights and

vertical motions and 2) computes similarity between the impacts and anomalies of the atmospheric variables in the target month over a key region (e.g., pattern correlation). This prediction system was found to increase accuracy of predictors by 20%, compared to that when the similarities of detail processes are not considered. This system was applied to the case of summer months in 2021 and succeeded in predicting above-than-normal temperature in July. In addition, similarity computed by this method can be useful information for not only prediction but also monitoring and post event-analysis.

For the early release (in October) of operational forecast for winter season monthly Korean temperatures, the preceding predictors were analyzed. The predictors for the December case are suggested according to the ENSO phases. Tropical convection from eastern Indian to western Pacific ocean and arctic sea ice, tropical Pacific and northern Atlantic SST and arctic sea ice are suggested as predictors in La Nina, neutral years respectively. For the January case, the preceding patterns which related with the principal circulation pattern in January were analyzed. The preceding autumn characteristics are presented in arctic sea ice and development of vertical temperature over the Barents-Kara sea, SST tripole pattern over the Atlantic ocean during summer, and tropical Pacific SST and convection. For the February case, it was found that the circulation pattern related with Korean temperature is changed after the late 1990s. The predictors for the recent period are proposed as sea ice over the northern Barents sea and difference of the vertical temperature over the Barents sea and northern Canada, and La Nina-like tropical SST.

The APCC's own climate monitoring and analysis system has been developed through this project. due to abnormal climates that occur frequently around the world, the need to establish a rapid climate monitoring system is further increasing. as one of the efforts to minimize damage to property and human life by continuously monitoring extreme weather phenomena that are getting stronger in various parts of the world, it is necessary to collect the latest observation data and establish a periodic abnormal climate monitoring system. To build the system, we developed a climate monitoring service and climate analysis service based on observation data provided by NCEP and KMA. the climate monitoring service provides up-to-date state information on various climate variables and the climate analysis service synthesizes data or provides the results of time series analysis. we standardized the data collection system to respond quickly to abnormal weather conditions, and established a system that is convenient for users to provide rapid monitoring results. We have improved the East Asian Extreme Climate Monitoring System provided through APCC homepage. By changing the base period to new base period to calculate 10th and 90th percentile of daily maximum and minimum temperature, we compared and analyzed difference between during base period and new base period.

Finally, this project contributes to the operational long-range forecast in relation to the climate analysis based on the scientific research. The guide book of the operational

long-range forecast based on climate monitoring and analysis has been improved by applying the change in the climate base period and recent studies. We have also provided the monthly climate prediction results based on climate monitoring and analysis. Frequent occurrence of extreme climate event in recent years is another important issue for dealing in this project. In order to appropriately respond to extreme climate issue, we have provided timely scientific information. We have been also participated in the monthly climate analysis discussion and provided the characteristic feature of the climate variability in Korea. We hope that this research results are acting for the cornerstone of improving Korean operational long-range forecast in terms of climate monitoring and analysis.

국문 요약

APCC에서는 한반도 및 아태지역의 이상기후 대응 능력을 강화시키는데 기여하기 위해서 아태 기후 정보 서비스 및 연구 개발 사업 5단계(2019-2021년)에서 이상기후 감시, 분석 및 예측을 주제로 연구들이 수행되었습니다. 첫 번째 연차(2019년)에서 시의성 있는 이상기후 정보 제공을 위해서 WMO (World Meteorological Organization)에서 제안하는 이상 기후 지수들의 활용 뿐만 아니라 소셜네트워크서비스 정보를 활용 텍스트 마이닝과 기계학습 기법을 통한 폭염 감시 기법, 지표의 증발산량을 고려하는 다중 시간 규모 가뭄 감시 기법 등의 이상기후 감시기법을 개발 하였습니다. 그리고 이상기후에 대한 원인을 신속하게 분석하고 제공하기 위한 주성분과 상관관계 분석 등을 효과적으로 적용하는 기법들을 개발하였습니다. 아울러 개발된 감시기법을 활용하고, 이상기후 정보를 제공하기 위해서 웹기반 감시 정보 서비스를 구축하였습니다.

두 번째 연차(2020년)에서 우리나라 이상기후 장기 전망 정보 개선을 위해서 수요자가 이해하기 쉬운 혹서기 감시 정보 및 원인 분석서 생산, 예측 정보 확대를 위한 1-3개월 예측 콘텐츠 개발을 목표로 연구가 수행되었습니다. 먼저 이상기후 정보 전달력 강화 및 이해도를 높이기 위해서 2019년에 구축되어 운영되고 있는 동아시아 이상기후 감시 정보 웹 서비스 개선이 이루어졌습니다. 그리고 원격상관 통계 분석을 통해서 우리나라 이상 기후 발생에 대한 새로운 감시 인자의 개발이 이루어졌고, 아울러 감시 인자들의 활용성을 높이기 위해서 관련한 상세 역학 과정을 고려할 수 있는 감시 인자 검증 시스템을 구축하였습니다. 이 시스템은 2020년 여름철 한반도 이상 기후 발생 감시 및 예측을 위해서 적용하였으며, 감시 인자의 예측성을 향상 시킨다는 결론을 얻었습니다. 1-3개월 계절 예측 정보 확대를 위해서 과거 유사해 추출 방법과 기계학습 방법을 이용하여 통계 모델들을 구축하였으며 전국 및 지역별 혹서기 이상기후 3개월 확률전망정보를 생산하였고, 예측 정보들을 효과적으로 전달할 수 있는 시각화 방법 또한 제안되었습니다. 그리고 기상청 현업모델의 예측 정보의 신뢰도 및 활용성을 높이기 위해서 예측 오류들을 보정하는 방법 등과 같은 방안들을 제시하였습니다. 관측기반 감시 인자 설정 및 예측 모델의 예측 오류를 확인하고, 개선에 도움을 줄 수 있도록 2020년 기록적인 이상 기온과 강수 발생에 대한 감시, 원인, 예측 사후 분석이 통합되어 있는 원인 분석서를 작성 하였습니다.

이 과제의 3년차 (2021년도) 목표는 APCC의 기후 감시와 분석 체계 구축을 통해 장기예보 현안에 대응하고 관련 역량을 강화하는 것입니다. 이를 위해 우리나라 기후 변동에 영향을 미치는 다양한 기후 인자들에 대한 과학적인 분석과 기후 예측에 적용할 수 있는 유용한 예측 인자를 개발하는 것이 필요합니다. 이러한 과학적인 연구 결과를 바탕으로 실제 기후 분석과 관련된 현업, 예를 들면, 장기예보 가이던스 개선, 이상기후 이슈 분석, 월 기후 분석토의에 직접 기여함으로써 연구 결과의 현업 활용도를 높일 수 있습니다. 또한 APCC 자체의 기후 감시와 분석 시스템을 구축함으로써 업무의 효율성을 향상시킬 수 있습니다. 따라서 이 과제를 과학적인 연구-현업에 직접 기여-감시 분석 시스템 개발의 세 가지 부분으로 구성하여 APCC의 기후 감시와 분석 체계를 구축하고자 합니다.

첫째로, 인도양 기후 변동성이 우리나라 기후에 미치는 영향을 분석하였습니다. 인도양의 대류 특성과 봄철 우리나라 기온·강수 변동 특성을 분석하기 위해 통계 분석을 적용한 결과, 3월과 4월은 뱅갈만 지역에서 대류 억제 신호로부터 대기 과동 전과를 통해 우리나라에 고온, 다습한 특성이 나타나는 반면, 5월에는 아라비아해 지역에서 대류 강화 신호로부터 대기 과동이 전파되어 고온, 다습한 특성이 유도됩니다. 3월과 4월의 경우 대류 활동에 선행하여 남인도양 지역에서 양의 해수면 온도 편차가 나타나는 반면, 5월에는 아라비아 반도 지역에서 대류 강화 신호에 선행하여 해수면 온도 상승이 나타납니다. 여름철의 경우는 엘니뇨가 쇠퇴하는 봄철 인도양 해수면 온도가 상승할 때, 북서 태평양 고기압성 순환 편차가 8월까지 유지되었으며, 우리나라가 남서풍의 영향을 받습니다. 반면에 라니냐가 쇠퇴하는 봄철 인도양 해수면 온도가 하강할 때 북서 태평양에서 약한 저기압성 순환 편차가 7월까지 유지되었으며, 우리나라는 동풍 혹은 남동풍의 영향을 받습니다. 그리고 여름철 열대 대서양 해수면 온도 상승이 있을 때 아열대 고기압 편차가 북서태평양에서 라니냐 쇠퇴 관련 북서태평양 저기압성 순환 편차를 북편으로 이동시켜서, 한반도가 건조한 북동풍의 영향을 받습니다. 엘니뇨 쇠퇴의 경우 여름철 대서양 해수면 온도 상승이 있을 때 북서 태평양 고기압이 더 강화되는 양상을 보였습니다. 봄철 및 여름철의 인도양 변동성에 대하여 우리나라 기온 및 강수의 경향을 분석하였습니다.

다음으로 우리나라 가을철 고온 현상에 영향을 미치는 인도양의 대류 특성을 분석하였습니다. 그 결과, MJO 위상 5와 관련한 고온 현상, 라니냐 및 인도양 대류 강화로부터 Circumglobal teleconnection pattern과 유사한 메커니즘으로 고온이 유도되는 현상, 그리고 엘니뇨와 양의 Indian Ocean dipole로 인한 고온 현상으로 분류되었고 각각의 역학적인 특성을 분석하였습니다. 겨울철은 특히 12월 기후에 집중하였는데, 인도양의 열적 강제력과 관련된 아열대 유라시아 대륙의 상층 대기 패턴을 규명하고 우리나라 12월 기후 변동성에 미치는 영향을 살펴보았습니다.

두 번째로, 기존의 여름철과 겨울철 장기예보 제공 시점인 5월과 11월에서 한 달 앞선 시점인 4월과 10월에 장기예보를 생산할 수 있도록 과학적 기반 연구를 수행하였습니다. 여름철 수시(4월) 기온 및 강수 예측을 위해 3월 이후 값을 사용하는 인자들의 경우, 3월 값으로 대체하여 예측성을 테스트한 결과 SST 기반 인자들의 경우 기존의 예측성과 크게 다르지 않아 수시 예측에도 사용 가능성을 보였습니다. 하지만 예측 시점까지 3-5개월의 시차가 존재하여 예측의 불확실성이 높은 가운데 예측성 향상을 위한 추가적인 방법론을 개발하였습니다. 이 방법론은 예측 인자가 한반도 기온에 영향을 미치는 상세적인 기작을 이해하고 이러한 상세 기작이 예측 시점에 잘 구현되고 있는지를 분별하여 예측에 활용하는 방법으로(상세기작 유사성 예측법) 이러한 기법을 사용함으로써 인자의 예측성을 20% 정도 상승(Accuracy: 42%⇒62%)시키는 결과를 얻었습니다. 또한 상세기작 유사성 예측법을 2021년 7월 기온 예측에 적용하여 고온을 예측하고 적중하였습니다. 여름철 강수 예측에 적용 시, 평년 이하의 강수에 대한 예측력 향상을 확인하였습니다. 상세기작 유사성 예측법은 계산된 유사 정도를 이용하여 예측뿐만 아니라 예측 이후의 모니터링, 더 나아가 사후분석에도 사용될 수 있어 유용한 정보가 될 것으로 기대됩니다. 겨울철 수시(10월) 전망을 위한 분석에서는 각 월별 특성이 반영된 분류로부터 가을철 선행해서 나타나는 특징을 분석해 예측 인자로 제시하였습니다. 12월의 경우 ENSO 위상에 따라 예측 인자를 제시했는데 엘니뇨 해는 인도양 해수면온도, 라니냐 해는 열대 동인도양~

서태평양 대류활동과 북극 해빙, 중립 해는 열대 태평양과 북대서양의 해수면온도와 북극 해빙을 감시 예측 인자로 제시하였습니다. 1월은 기온과 관련해 주요하게 나타나는 순환장 구조로부터 가을철 선형 특징을 찾는 방식으로 접근하였고 바렌츠-카라해 해빙과 연직으로 발달한 기온 편차, 여름철 북대서양 해수면온도 패턴, 라니냐와 유사한 열대 해수면온도와 대류활동을 예측 인자로 제시하였습니다. 2월은 1990년대 후반을 기준으로 기온과 관련된 순환장의 차이가 나타남을 보이고 최근 낮은 기온과 관련해 바렌츠해 북부 해빙과 연직으로 발달한 바렌츠해 주변과 캐나다 북쪽 기온 편차 차이, 라니냐와 유사한 열대 해수면온도를 감시 예측 인자로 제시하였습니다.

세 번째로, APCC 자체의 기후감시와 분석 시스템을 개발하였습니다. 세계적으로 빈번하게 발생하는 이상기후로 인해 신속한 기후감시 체계구축의 필요성이 더욱 증대되고 있어, 세계 각지에서 점점 강해지는 극한 기상현상에 대한 지속적인 감시를 통해 재산과 인명피해를 최소화하는 데 노력으로 최신의 관측 자료를 수집하고 주기적인 이상기후 감시 시스템 구축이 필요하게 되었습니다. 시스템 구축을 위해 NCEP과 KMA에서 제공하는 관측 자료를 기반으로 기후감시 서비스와 기후분석 서비스를 개발하였습니다. 기후모니터링 서비스는 다양한 기후 변수에 대해 최신의 정보를 제공하고 기후분석 서비스는 자료를 합성하거나 시계열 분석의 결과를 제공합니다. 이상기후에 대한 빠른 대처를 위해 자료수집 체계를 표준화하였고 신속한 감시 결과제공을 위해 사용자에게 편리하도록 시스템을 구축하였습니다. 또한, APCC 홈페이지를 통해 제공되고 있는 동아시아 이상기후 감시 시스템을 개선하였습니다. 이상기후 감시 기준을 선정하기 위해 사용되었던 구 평년(1981-2010)에서 신 평년(1991-2020)으로 변경하여, 감시 기준을 새롭게 선정하고 이상기후 발생일수 또한 새롭게 바뀐 신 평년에 대해서 표출되도록 개선하였습니다. 또한 과거 자료를 구 평년에서 신 평년으로 바꾸기에 앞서, 신 평년으로 바꿀 시에는 공간적으로나 시간적으로 월별 감시 정보에 어떠한 영향을 미치는지 비교 분석하였습니다. 이상기후 감시기준이 되는 90백분위 및 10백분위 값, 그리고 신 평년을 적용하여 카운트 한 이상기후 발생일수를 비교하여, 평년 기간 변화에 따른 이상기후 감시정보의 변화를 해석하는 데에 도움을 주고자 하였습니다.

마지막으로, 이 과제의 과학적인 분석 결과를 바탕으로 현업 장기예보의 분석 기반 기후 예측과 이상기후 이슈 분석 업무에 기여하였습니다. 현업 장기예보의 분석 기반 기후 예측 지침서인 「장기예보 가이드선스」를 2021년 새롭게 바뀐 평년 기간과 최신 연구 결과를 반영하여 개선하였습니다. 또한, 매월 APCC 예보토의를 통해 기후 감시와 분석 기반 예측 정보를 제공하였습니다. 최근 빈번하게 발생하는 이상기후 현상과 그에 대한 높아진 국민적인 관심에 대응하고자 기상청-APCC-기상과학원에서는 기후 소통 TF를 운영하고 있는데, 이 과제를 통해 기후 이슈에 대해 시의적절한 과학적 분석 정보를 제공하였습니다. 특히 우리나라 기후에 대해서는 매월 말 기상청과 공동으로 월별 특성을 분석하는 월 기후분석토의를 통해 사후 분석 기능을 강화하고 기후 이슈에 선제적으로 대응하는데 기여하였습니다. 이와 같이 이 과제는 APCC 기후 감시와 분석 체계 구축의 초석을 마련하였고 이를 통해 우리나라 기후 특성에 대한 과학적 이해를 높이고 더 나아가 예측 기술 발전의 기초가 되기를 바랍니다.

목차

평문 초록	i
Executive Summary	ii
국문 요약	vi
목차	ix
표 차례	xii
그림 차례	x iii
1. 서론	1
2. 인도양 변동성이 우리나라 기후에 미치는 영향	4
가. 봄철 인도양 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향	4
(1) 연구 배경	4
(2) 자료와 방법	4
(3) 봄철 한반도 기후 관련 인도양 변동 모드	5
(4) 요약 및 결론	20
나. 여름철 인도양 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향	23
(1) 연구 배경	23
(2) 인도양 변동성이 한반도 여름철 기후에 미치는 영향	24
(3) 대서양-인도양-태평양 변동성의 상호작용이 한반도 여름철 기후에 미치는 영향	30
(4) 요약 및 결론	36
다. 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 인도양-서태평양 지역의 대류 특성 분석	38
(1) 연구 배경	38
(2) 자료와 방법	38
(3) 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 열대 인도양-서태평양 지역의 세가지 대류 특성	39
(4) 요약과 결론	49
라. 인도양의 열적 강제력과 관련된 우리나라 12월 기후 변동성 분석	50
(1) 연구 배경	50
(2) 자료와 방법	50
(3) 아열대 유라시아 대륙의 상층 대기 변동 모드와 관련된 우리나라 12월 기후 변동 특성	51
(4) 요약과 결론	68
3. 여름철과 겨울철 기후 전망을 위한 선행 예측인자 개발	70

가. 여름철 수시 기온 예측을 위한 제안	70
(1) 연구 배경	70
(2) 자료	70
(3) 예측인자 시점 앞당김 및 상세기작 유사성 예측법	70
(4) 상세기작 유사성 예측법 고도화	88
(5) 2021년 예측 검증	97
(6) 요약과 결론	100
나. 여름철 수시 강수 예측을 위한 제안	101
(1) 연구 배경	101
(2) 자료	101
(3) 예측인자 추가 및 시점 앞당김	101
(4) 상세기작 유사성 예측법 적용	104
(5) 요약과 결론	108
다. 겨울철 수시 기후 전망을 위한 선행 예측 인자 분석	109
(1) 연구 배경	109
(2) 자료 및 방법	109
(3) 겨울철 우리나라 기온 및 강수의 월별 장기 변동 특성	110
(4) ENSO 위상에 따른 12월 기온과 관련된 가을철 선행 특성	112
(5) 1월 기온과 관련된 가을철 선행 특성	124
(6) 2월 기온과 관련된 가을철 선행 특성	134
(7) 요약 및 결론	140
4. 기후감시 및 분석 시스템 개발과 동아시아 이상기후 모니터링 시스템	143
가. 기후감시 시스템 개발	143
(1) 연구 배경	143
(2) 자료수집 및 방법	143
(3) 자료처리	147
(4) 시스템 설계 및 구현	147
(5) 요약과 결론	162
나. 기후분석 시스템 개발	162
(1) 연구 배경	162
(2) 자료수집 및 방법	163
(3) 시스템 분석 및 설계	163

(4) 시스템 구현	165
(5) 요약과 결론	173
다. 동아시아 이상기후 시스템 개선	174
(1) 연구 배경	174
(2) 자료와 방법	177
(3) 평년 기간 변화에 따른 변화 비교	178
(4) 요약과 결론	194
5. 요약 및 결론	195
사사	198
References	199
부록	204

표 차례

Table	page
1. Years classified for a composite analysis	24
2. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the El Niño-(+)TIO events.	29
3. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the La Nina-(-)TIO events.	30
4. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the El Niño-(+)TIO-(+)TAO events.	36
5. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the La Nina-(-)TIO-(+)TAO events.	36
6. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the positive PC1 category.	56
7. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the negative PC1 category.	60
8. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the positive PC2 category.	64
9. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the negative PC2 category.	67
10. Predictors of June mean temperature	71
11. Predictors of July mean temperature	72
12. Predictors of August mean temperature	73
13. Predictors of mean precipitation in June (and July).	101
14. Predictors of mean temperature in August.	102

그림 차례

Figure	page
1. Spatial patterns of the first leading EOF modes obtained from the SVD analysis for monthly-averaged ASOS (48 station) (left) precipitation over South Korea and OLR over Indian Ocean and (right) time series of their principle components in (upper) March, (middle) April, and (lower) May.	7
2. (Left panels) Spatial patterns of the first leading EOF modes obtained from the SVD analysis for monthly-averaged ASOS (48 station) surface temperature over South Korea and OLR over Indian Ocean and (right) time series of their principle components in (upper) March, (middle) April, and (lower) May.	8
3. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (upper) precipitation and (lower) temperature with 200 hPa (shade) and 1000 hPa (blue and red contours) geopotential height (shade), and 200 hPa nondivergent zonal winds (black contours) in March.	9
4. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (upper) precipitation and (lower) temperature with 200 hPa (shade) and 1000 hPa (blue and red contours) geopotential height (shade), and 200 hPa nondivergent zonal winds (black contours) in April.	10
5. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (upper) precipitation and (lower) temperature with 200 hPa (shade) and 1000 hPa (blue and red contours) geopotential height (shade), and 200 hPa nondivergent zonal winds (black contours) in May.	11
6. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis with (upper) diabatic heating and (lower) moist sink in March.	12
7. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis with (upper) diabatic heating and (lower) moist sink in April.	13
8. MJO (upper) frequency and (lower) amplitude by phase during years of the positive (red) and negative (blue) Indian Ocean OLR index associated with Korean monthly-averaged temperature and precipitation in March.	14
9. Spatial lag-regression patterns of April Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (left) precipitation and (right) temperature with OLR (shade), SST	

(blue and red contours), and surface zonal wind (black contours) anomalies in preceding (upper) February and (middle) March, and (lower) April.15

10. Lag-correlation patterns of (upper) March, (lower) April Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation with OLR (shade) anomalies averaged over 10-15° N, and SST (blue and red contours) and OLR (green and brown contours) anomalies over 20-5° S from preceding January and subsequent August.17

11. Seasonal cycle of SST deviation (shades) from its annual mean and SST difference from 28° C (contours) averaged over Indian Ocean (40-100° E).18

12. (left) Spatial lag-regression patterns of May Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation with OLR (shade), SST (blue and red contours), and surface zonal wind (black contours) anomalies in preceding (upper) February and (middle) March, and (lower) April.19

13. Time series of Indian Ocean OLR index (black) from SVD analysis for Korean monthly-averaged surface temperature, Niño 3.4 index (boxed plots) in (upper) March, (middle) April, and (lower) May.21

14. Time series of Indian Ocean OLR index (black) from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation, Niño 3.4 index (boxed plots) in (upper) March, (middle) April, and (lower) May.22

15. Composite patterns of SST (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (left panels) the preceding winter El Niño and subsequent tropical IO warming and (right) the preceding winter La Nina and subsequent tropical IO cooling.27

16. Composite patterns of SLP (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (left panels) the preceding winter El Niño and subsequent tropical IO warming and (right) the preceding winter La Nina and subsequent tropical IO cooling.28

17. Evolution of SST anomalies in the Tropical IO (TIO) and Niño 3.4 regions and zonal wind anomalies in the Northwestern Pacific (TNWP) region averaged for El Niño and La Nina events.29

18. Composite patterns of SST (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (a) the preceding winter El Niño-subsequent spring tropical IO-summer tropical Atlantic Ocean (TAO) warming and (b) the preceding winter El Niño-subsequent tropical IO warming-TAO cooling.32

19. Composite patterns of SST (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events

of (a) the preceding winter La Nina-subsequent spring tropical IO cooling-summer tropical Atlantic Ocean (TAO) warming and (b) the preceding winter La Nina-subsequent tropical IO cooling-TAO cooling.33

20. Evolution of SST (contours), wind, and 500hPa omega anomalies along the equator from the composite analysis for (a) the preceding winter El Niño-subsequent spring tropical IO warming-summer TAO warming and (b) the preceding winter El Niño-subsequent spring tropical IO-summer TAO cooling events.34

21. Evolution of SST (contours), wind, and 500hPa omega anomalies along equator from the composite analysis for (a) the preceding winter La Nina-subsequent spring tropical IO cooling-summer TAO warming and (b) the preceding winter La Niña-subsequent spring tropical IO cooling-summer TAO cooling.35

22. Scatter plots of normalized spatial projection coefficients for each event in the (a)first (green) and second (blue) cluster, (b) first (green) and third (purple) cluster,and (c) second (blue) and third (purple) cluster against the corresponding cluster composite means. 40

23. (a) The spatial pattern of the first cluster of OLR anomaly over the Indo-Western Pacific for Korean autumn HTE events.42

24. Anomalous composite of (a~c) OLR (shading), stream function (contour) and wave activity flux (vector) at 850hPa, (d-f) stream function (shading) and wave activity flux (vector) at 200hPa, (g~i) 2m air temperature (shading) and geopotential height at 500 hPa (contour) for the first cluster.43

25. Same figure as in Figure 23 but for the second cluster.44

26. Same figure as in Figure 24 but for the second cluster.45

27. Same figure as in Figure 23 but for the third cluster.47

28. Same figure as in Figure 24 but for the third cluster.48

29. The spatial pattern and the corresponding principal component time series of the (a) and (b) first and (c) and (d) second empirical orthogonal functions modes of the stream function anomaly at 300 hPa during December from 1980 to 2020.52

30. A scatter plot of normalized PC1 versus PC2. The classified categories are designated by colored dots.53

31. Composite maps of (a) sea surface temperature (SST), (b) outgoing longwave radiation (OLR) (c) stream function at 300 hPa and (d) at 850 hPa anomalies during December of positive PC1 category.53

32. Anomalous composite of 300 hPa and 850 hPa stream function, 850 hPa wind, OLR, SST, and 2m air temperature for the positive PC1 category.	55
33. Latitude–Height cross section of the geopotential height averaged over the 60–100E for the peak–2P period of the positive PC1 category.	56
34. Same figure as in Figure 31 but for the negative PC1 category.	57
35. Same figure as in Figure 32 but for the negative PC1 category.	59
36. Same figure as in Figure 33 but for the negative PC1 category.	60
37. Same figure as in Figure 31 but for the positive PC2 category.	61
38. Same figure as in Figure 32 but for the positive PC2 category.	63
39. Same figure as in Figure 33 but for the positive PC2 category.	64
40. Same figure as in Figure 31 but for the negative PC2 category.	65
41. Same figure as in Figure 32 but for the negative PC2 category.	66
42. Same figure as in Figure 33 but for the negative PC2 category.	67
43. The composite of monthly ONI, Korean SAT and precipitation anomaly for December for the positive and negative phases of first and second EOF modes.	68
44. Accuracy (ACC) of predictors (1981–2013) in (a) June, (b) July, and (c) August. Blue (orange) bars indicate accuracy based on the values in March (original month in Tables 10–12).	75
45. Accuracy (ACC) of predictors (1991–2020) in (a) June, (b) July, and (c) August. Blue (orange) bars indicate accuracies based on the past climatology period, 1981–2010 (new climatology period, 1991–2020).	77
46. Heidke Skill Score (HSS) of predictors (1991–2020) in (a) June, (b) July, and (c) August. Blue (orange) bars indicate accuracies based on the past climatology period, 1981–2010 (new climatology period, 1991–2020).	78
47. Lead/lag correlation (1981–2013) maps of a predictor (PE_DJF) (a) with HGT500 and (b) with OMG500. Red and blue dots indicate statistically positive and negative significant correlations at the 80% level, respectively.	80
48. Prediction method based on similarity in detail–processes.	81
49. Monthly anomalies of HGT500 in 2018 (contours) overlaid onto the 33–year (1981–2013) correlations (dots) between PE_DJF and monthly HGT500 (dots) in January, February, June, and July (left column).	83
50. Monthly PCCs of HGT500 (blue) and OMG500 (orange) in 2018 for PE_DJF.	84

51. Prediction and verification of July mean temperature in 2018 using 12 predictors itself and with the similarity of detail-processes.	85
52. Monthly anomalies of HGT500 in 2020 (contours) overlaid onto the 33-year (1981-2013) correlations (dots) between IO and monthly HGT500 (dots) in May, June, and July (left column). Right column is for OMG500.	86
53. Monthly PCCs of HGT500 (blue) and OMG500 (orange) in 2020 for IO.	87
54. Number of cases of true AN, true BN, false AN as BN, and false BN as AN for June, July, and August temperature predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020. In (a), blue (orange) indicates original (detrended) values.	89
55. Correlations of the PE_DJF with (a) HGT200, (b) HGT850, and (c) OLR in DJF for 1991-2019.	90
56. Schematic diagram of the pathway impacts of PE_DJF on summer circulations and temperature in Korea.	91
57. Two regions for computing PCC.	92
58. Monthly PCCs of (a) HGT500 (blue) and OMG500 (orange) for EA and (b) OMG500 (orange) for IO/WP in 2018 for PE_DJF.	93
59. Prediction and verification of July mean temperature in 2014-2020 using PE_DJF with the similarity of detail-processes.	94
60. Prediction and verification of July mean temperature for 1991-2021 using PE_DJF itself and with the similarity of detail-processes.	96
61. Summary of prediction of July mean temperature in 2021 (top).	97
62. Definition of the predictor, PacTri with SST anomaly (contours) map in March, 2021.	98
63. Monthly anomalies of HGT500 in 20121 (contours) overlaid onto the 33-year (1981-2013) correlations (dots) between PacTri and monthly HGT500 (dots) in January, March, June, and July (left column).	99
64. (a) Accuracy (ACC) of predictors of precipitation (1981-2013) in June, July, and August.	105
65. Percentage of cases of true AN (AN_AN), true BN (BN_BN), false AN as NN (AN_NN), false BN as NN (BN_NN), false AN as BN (AN_BN), and false BN as AN (BN_AN) for (a) June, (b) July, and (c) August precipitation predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020.	105
66. Number of cases of true AN (AN_AN), true BN (BN_BN), false AN as NN (AN_NN), false	

BN as NN (BN_NN), false AN as BN (AN_BN), and false BN as AN (BN_AN) for June, July, and August precipitation predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020.

106

67. Number of cases of true AN (AN_AN), true BN (BN_BN), false AN as NN (AN_NN), false BN as NN (BN_NN), false AN as BN (AN_BN), and false BN as AN (BN_AN) for June, July, and August precipitation predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020.

107

68. Time series of the Korean winter temperature anomaly and precipitation (bar), and their 21-year running mean (line).111

69. Correlation between Korean temperature, precipitation and Nino3.4 index, AO index according to the AMO and PDO phase.111

70. 21-year moving correlation between Korean winter temperature and Nino3.4 index. ..112

71. Distribution of the December Korean temperature anomalies according to the ENSO phases.113

72. Composite maps of the 200hPa geopotential height anomalies (shading) and sea level pressure anomalies (contour) for the El Nino years with above normal December Korean temperature.114

73. Composite maps of the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour) for the El Nino years with above normal December Korean temperature.114

74. As in figure 72, but for the El Nino years with near normal December Korean temperature.115

75. As in figure 73, but for the El Nino years with near normal December Korean temperature.115

76. As in figure 72, but for the La Nina years with above normal December Korean temperature.117

77. As in figure 72, but for the La Nina years with below normal December Korean temperature.117

78. (a) Composite hovmoller plots of the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour) for the La Nina years with above normal December Korean temperature.118

79. Composite maps of the sea ice concentration anomalies in the preceding August to October for the La Nina years with above normal December Korean temperature.119

80. As in figure 79 but for the La Nina years with below normal December Korean

temperature.	119
81. (a) Composite of the area averaged sea ice concentration anomalies for the La Nina and neutral condition years with above normal December Korean temperature.	120
82. As in figure 72, but for the neutral condition years with above normal December Korean temperature.	122
83. As in figure 73, but for the neutral condition years with above normal December Korean temperature.	122
84. As in figure 72, but for the neutral condition years with below normal December Korean temperature.	123
85. As in figure 73, but for the neutral condition years with below normal December Korean temperature.	123
86. The spatial pattern and the corresponding principal component time series of the first three SVD modes of the 500hPa geopotential height anomalies (shading, red line) and 2m temperature anomalies (contour, blue line) during January.	125
87. (a) Correlation coefficients of January Korean temperature with SVD PCs. (b) Plot of the January Korean temperature anomalies according to the positive and negative PCs. The asterisk indicates mean of the temperature anomalies.	126
88. Composite maps of the sea ice concentration anomalies (shading) and 500hPa temperature anomalies (contour) in the preceding August to October for the positive PC1 years with above normal January Korean temperature.	127
89. As in figure 88, but for the negative PC1 years with below normal January Korean temperature.	127
90. As in figure 88, but for the positive PC2 years with below normal January Korean temperature.	128
91. Composite evolution of the PCH anomalies for the negative PC1 and positive PC2 years with below normal January Korean temperature from the preceding August to February.	128
92. Composite of the Atlantic SST anomalies in the preceding July and August for the negative PC1 and PC3 years with below normal January Korean temperature.	129
93. Regression map of the 500hPa geopotential height (shading) and 2m temperature (contour) in January with respect to the Atl_SST index in the preceding August.	130
94. Composite maps of the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour) in the preceding October (a) and corresponding January (b) for the below normal January Korean	

temperature year.	131
95. Composite maps of the OLR difference between corresponding January and preceding December for the positive (a) and negative (b) Nino3.4 index years.	132
96. As in figure 94, but for the positive PC2 years with above normal January Korean temperature.	133
97. Composite maps of the (a) 500hPa geopotential height (shading) and sea level pressure (contour) anomalies, and (b) OLR (shading) and SST (contour) anomalies for the below normal February Korean temperature years during P1.	134
98. Composite maps of the 500hPa geopotential height anomalies (shading) and sea level pressure anomalies (contour) for the below normal February Korean temperature years during P2.	135
99. The spatial pattern of the first SVD modes of the SST anomalies (shading) and sea level pressure anomalies (contour) during February (a) from 1979 to 1999 (P1) and (b) from 2000 to 2020 (P2).	136
100. As in figure 98, but for the sea ice concentration anomalies (shading) and 850hPa temperature anomalies (contour).	137
101. Composite mean differences of the air temperature anomalies averaged over the (a) Barents-Kara sea (30-90E 65-85N) and (b) northern Canada (150-60W 65-85N) between negative and positive February Korean temperature years during P2.	138
102. As in figure 98, but for the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour). ..	139
103. Regression maps of the 500hPa (shading) and 850hPa (contour) geopotential height anomalies in February with respect to the DJF Nino3.4 index (a) from 1979 to 1999 (P1) and (b) from 2000 to 2020 (P2).	139
104. Schematic plots of the monitoring and prediction factors for (a) El Nino, (b) La Nina, and (c) neutral condition years.	141
105. Schematic plots of the monitoring and prediction factors for January Korean temperature.	142
106. As in figure 105, but for February.	142
107. NOAA 's website provides the most recent daily, weekly, monthly and Seasonal mean and anomalies. this is a screen provided for Sea Surface Temperature (SST)	148
108. JMA provides monitoring information for various variables. the user can select and check the desired condition.	149

109. ECMWF provides the Mapping service on a web based map. users can zoom in or out on the map to check the values.150

110. To build a climate monitoring and analysis system, a service map was designed and data required for each service was defined.151

111. The user interface for the global climate monitoring service provides 200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo-potential Height, Sea level Pressure, etc.152

112. The user interface of the South Korea climate monitoring service provides average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and precipitation information. 153

113. it has been increased conveniently by providing a calendar function so that users can easily find the desired date.154

114. Global monitoring uses a flat map using the Mechatro Projection method to display information using a method using shadows and lines, and the derection and thickness of arrows.154

115. The monitoring information on the Korean was expressed using the interporation method for observations based on the data collected at each observatory.155

116. The daily global monitoring service provides nine types of information for a given date (200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo- potential Height, Sea level Pressure, 850hPa Temperature, Surface Temperature, 850hPa wind mean, 850hPa wind anomaly).156

117. The Daily Korea monitoring service provides accumulated precipitation and percentile information on mean and anomaly of average temperature, maximum temperature, and minimum temperature for each day.157

118. The Weekly Korea monitoring service provides accumulated precipitation and percentile information on mean and anomaly of average temperature, maximum temperature, and minimum temperature for the week including the day.158

119. The last 7 days global monitoring service provides nine types of information for in last 7 days from a given day (200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo- potential Height, Sea level Pressure, 850hPa Temperature, Surface Temperature, 850hPa wind mean, 850hPa wind anomaly).159

120. The Monthly global monitoring service provides nine types of information for the month including the day (200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa

Geo-potential Height, 850hPa Geo- potential Height, Sea level Pressure, 850hPa Temperature, Surface Temperature, 850hPa wind mean, 850hPa wind anomaly).161

121. The monthly Korea monitoring service provides accumulated precipitation and percentile information on mean and anomaly of average temperature, maximum temperature, and minimum temperature for the month including the day.162

122. the Physical Sciences Laboratory of NOAA provides the service of Monthly/Seasonal Climate Composites164

123. for APCC’ s climate analysis system development, it was designed in consideration of various services such as providing climate monitoring information, providing composite results, and providing time series results.164

124. The main interface for the composite service of the climate analysis system was composed of condition input, analysis result provision, and file provision.166

125. The main interface for the time series service of the climate analysis system was composed of condition input, analysis result provision as graph, and file provision.167

126. Composite service provides various menus such as variable selection, period selection, region selection, and color selection are provided.168

127. In the search area of the Time series service, various menus such as variable selection, period selection, region selection, and calculation of values for two regions are provided. 169

128. As a result of the composite service, the results analyzed based on th map are provided as visualized information.170

129. Time series analysis service provides results so that you can see the change in values over time using graphs.171

130. Analyzed results are provided to users in the format of various files.171

131. The analyzed results are provided in the form of an Excel file including coordinate information.172

132. Schedules on the HPC and WEB before improvement extreme climate monitoring system. 175

133. Schedules on the HPC and WEB after improvement extreme climate monitoring system. 175

134. Monthly extreme climate monitoring map (a), (b) before and (c), (d) after176

135. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on January (left), February

(middle) and March (right).	179
136. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on April (left), May (middle) and June (right).	180
137. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on July (left), August (middle) and September (right).	180
138. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on October (left), November (middle) and December (right).	181
139. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Minimum Temperature on January (left), February (middle) and March (right).	182
140. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on April (left), May (middle) and June (right).	182
141. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Minimum Temperature on July (left), August (middle) and September (right).	183
142. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Minimum Temperature on October (left), November (middle) and December (right).	183
143. Comparison of base period (1981-2010) and new base period (1991-2020) for Monthly Mean of Daily Maximum (left) and Minimum (right) Temperature and over South Korea.	184
144. Monthly extreme climate monitoring map(2021/01) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	185
145. Monthly extreme climate monitoring map(2021/02) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	185
146. Monthly extreme climate monitoring map(2021/03) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	185
147. Monthly extreme climate monitoring map(2021/04) for daily maximum temperature above	

90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	186
148. Monthly extreme climate monitoring map(2021/05) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	186
149. Monthly extreme climate monitoring map(2021/06) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	186
150. Monthly extreme climate monitoring map(2021/07) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	187
151. Monthly extreme climate monitoring map(2021/08) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	187
152. Monthly extreme climate monitoring map(2021/09) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	187
153. Monthly extreme climate monitoring map(2021/10) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	188
154. Monthly extreme climate monitoring map(2021/11) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	188
155. Monthly extreme climate monitoring map(2021/01) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	189
156. Monthly extreme climate monitoring map(2021/02) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	189
157. Monthly extreme climate monitoring map(2021/03) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	189
158. Monthly extreme climate monitoring map(2021/04) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	190
159. Monthly extreme climate monitoring map(2021/05) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	190
160. Monthly extreme climate monitoring map(2021/06) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	190
161. Monthly extreme climate monitoring map(2021/07) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	191
162. Monthly extreme climate monitoring map(2021/08) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).	191
163. Monthly extreme climate monitoring map(2021/09) for daily minimum temperature below	

- 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).191
164. Monthly extreme climate monitoring map(2021/10) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).192
165. Monthly extreme climate monitoring map(2021/11) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).192

1. 서론

APEC기후센터 (APEC Climate Center: APCC)는 다중모델 앙상블 (Multi-Model Ensemble: MME)을 기반으로 한 기후 예측 전문 기관으로 기후 예측 모델은 신뢰도 있는 예측 정보 생산의 근간이 된다. 그러나 우리나라와 같이 특정 지역에 대한 기후 예측 정보를 생산하기 위해서는 기후 모델의 예측 정보와 함께, 우리나라 기후가 전 지구적인 다양한 기후 인자들과 맺는 역학적 관련성을 함께 고려하여야 한다. 따라서 우리나라의 월별, 계절별 기후 변동 특성을 이해하고, 열대 지역의 해수면 온도, 북극 해빙, 북반구의 눈덮임 등의 주요 기후 요소가 우리나라에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 과학적인 연구가 필요하다. 특히, 이러한 관련성은 지구 온난화 경향과 기후의 십년 주기의 변동성에 따라 복잡하게 변화하기 때문에 지속적인 감시와 과학적인 분석이 필요하다. 한편, 최근 지구 온난화 경향성과 함께 전 세계적으로 이상기후 현상이 빈번하게 발생하여 신뢰도 높은 장기예보 생산의 어려움으로 작용한다. 따라서, 이상기후 현상에 대한 과학적 분석을 통해 최근의 기후 변동성을 이해하고 장기예보 생산에 적용할 수 있어야 한다.

APCC에서는 한반도 및 아태지역의 이상기후 대응 능력을 강화시키는데 기여하기 위해서 아태 기후 정보 서비스 및 연구 개발 사업 5단계(2019-2021년)에서 이상기후 감시, 분석 및 예측을 주제로 연구들이 수행되었다. 첫 번째 연차(2019년)에서 「아시아/태평양 지역 이상 기후 분석 및 감시 기술 개발」이라는 과제가 제안되었으며, 시의성 있는 이상기후 정보 제공을 위해서 WMO (World Meteorological Organization)에서 제안하는 이상 기후 지수들의 활용 뿐만 아니라 효율적인 이상기후 감시기법을 개발하였다. 그리고 이상기후에 대한 원인을 신속하게 분석하고 제공하기 위한 통계 분석 방법들을 효과적으로 적용하는 기법들을 개발하였다. 아울러 개발된 감시 기법을 활용하고, 이상기후 정보를 제공하기 위해서 웹기반 감시 정보 서비스를 구축하였다.

두 번째 연차(2020년)에서 제안된 과제는 「이상기후 장기 예보 콘텐츠 개발」이며, 우리나라 이상기후 장기 전망 정보 개선을 위해서 먼저 2019년에 구축되어 운영되고 있는 동아시아 이상기후 감시 정보 웹 서비스 개선이 이루어졌다. 그리고 감시 인자들의 활용성 및 예측성을 높이기 위해서 감시 인자 검증 시스템을 개발하였고, 1-3개월 계절 예측 정보 확대를 위해서 과거 유사해 추출 방법과 기계학습 방법을 이용하여 통계 모델들을 구축하였으며 전국 및 지역별 혹서기 이상 기후 3개월 확률전망정보를 생산하였다. 아울러 기상청 현업모델의 예측 정보의 신뢰도 및 활용성을 높이기 위해서 예측 오류들을 보정하는 방법을 통한 이상 기후 지수들의 1개월 확률 예보 방안 등과 같은 개선 방안들을 제시하였다. 그리고 2020년 기록적인 이상 기온과 강수 발생에 대한 감시, 원인, 예측 사후 분석이 통합되어 있는 원인 분석서를 작성하여, 관측에서 감시 인자 설정 및 예측 모델의 예측 오류를 확인하고, 개선에 도움을 줄 수 있도록 하였다.

이 과제의 3차년도 목표는 APCC의 기후 감시 분석 체계 구축을 통해 이상기후 대응 역량을 강화하는 것이다. 이를 위해 3차년도 과제는 우리나라 기후 변동 특성 이해와 유용한 예측 인자를 개발하는 연구와, 과학적 연구 결과를 바탕으로 실제 기상청의 분석 기반 기후 예측과 이상기후 이슈 분석과 관련한 현업에 기여, 그리고 이러한 업무들을 보다 효율적으로 수행하기

위한 분석 및 모니터링 시스템을 구축하는 부분으로 구성되었다.

2장에서는 주요 기후 요소 중 하나인 인도양의 대기-해양 변동성이 우리나라 기후에 미치는 역할을 분석하였다. 봄철 인도양 변동성 영향 분석은 인도양에서 변동성을 정의할 수 있는 지표들을 주성분 분석 기반으로 하여 생산하고, 대기순환장과 상관관계 분석을 통해서 인도양 변동성이 어떻게 한반도 봄철 기온/강수에 영향을 미칠 수 있는지 가능한 기작들을 규명하였다. 아울러 인도양 변동성을 1-2개월 선행시간에서 예측할 수 있는 예측 감시 인자를 제안하고, ENSO (El Niño-Southern Oscillation)와의 관련성을 분석하였다. 여름철 인도양 변동성의 영향을 분석하기 위해서, 겨울철 ENSO 발달 이후 쇠퇴하는 동안 동아시아 몬순에서 중요한 역할을 하는 북서태평양 고기압 발달에 영향을 미치는 인도양 해수면 온도 변화 및 관련된 대기 반응을 각 변동성의 위상을 고려하여 한반도 여름철 기후에 미치는 영향에 대한 기작을 분석하였다. 가을철의 인도양 영향 분석은 우리나라 가을철 고온 현상의 메커니즘에 집중하여 살펴 보았다. 가을철 고온 현상에 영향을 미치는 인도양-서태평양 지역의 대류 특성을 크게 세 가지로 분류할 수 있는데, 첫째는 MJO 위상 5와 관련하여 아열대 서태평양부터 동아시아까지 하층 파동 전파를 통해 고온이 유도되는 메커니즘, 둘째는 라니냐와 관련되어 인도양 대류 강화 신호가 나타날 때 유라시아 대륙을 가로지르는 파동 전파 메커니즘을 통해 고온이 유도되는 현상, 그리고 마지막으로 엘니뇨와 양의 Indian Ocean Dipole 현상이 나타남에 따라 열대 서태평양의 대류 억제 신호로부터 동아시아에 고온이 유도되는 현상으로 분석되었다. 다음으로 인도양의 열적 강제력으로부터 유도되는 아열대 유라시아 대륙 상층의 대기 패턴을 규명하고 이 대기 순환장이 우리나라 12월 기후 변동성에 미치는 영향을 살펴보았다. 북인도양의 대류 억제(강화)로부터 아열대 유라시아 대륙에 동-서 방향으로 저(고)기압성 순환이 형성되는 패턴과, IOD와 관련하여 아라비아 반도-인도차이나 반도-동아시아 지역으로 상층 파동 전파가 나타나는 특성을 규명하고, 우리나라 12월 기후에 미치는 영향을 분석하였다.

3장에서는 여름철과 겨울철 수시(각각, 4월과 10월) 기후 전망을 위한 예측 기법과 선행 예측 인자에 대한 연구 결과를 기술하였다. 여름철은 다른 계절에 비해 기후 예측 인자의 수가 많은 편이므로 예측 인자를 새롭게 발굴하기 보다는 기존의 인자를 효과적으로 사용하는 방법을 모색하였다. 첫째, 지속성이 있어 인자의 시점을 앞당겨도(예, 3월 값 사용) 예측성이 유지되는 인자를 선별하였다. 둘째, 예측 인자가 3~5개월의 시간을 두고 한반도 여름 기후에 영향을 미치는 상세기작을 이해하고 이러한 기작이 예측 시점에 구현되고 있는지를 모니터링 하는 기법(상세기작 유사성 예측법)을 개발하여 실질적인 예측성 향상을 도모하였다. 즉, 단순히 예측 인자의 편차에 따른 예측 월의 기온 또는 강수 편차를 전망하는 것이 아니라 예측 인자가 대기와 해양에 미치는 영향을 함께 모니터링 할 경우 예측성이 향상될 수 있다는 가설을 세우고 검증한 것이다. 이러한 상세기작 유사성 예측법은 예측 시점에 관찰된 대기의 편차장이 예측 인자가 한반도에 미치는 상세기작과 얼마나 유사한지를 정량화하여 예측에 이용하는 시스템으로 이 방법론을 2021년 여름철 수시 예측에 적용한 결과 또한 연구 결과에 소개하였다. 겨울철은 여름철과 비교해 기존에 발굴되어 사용되어온 예측 인자의 수가 적고 유라시아 눈덮임 등 지속성이 없는 인자들이 있어 단순히 시점만 앞당겨 사용하기에는 어려움이 있으므로 기존의 예측 인자 변수를 활용하되 새로운 적용 방법이 필요했다. 겨울철 우리나라 기온은 월별로 다른 특징을 보였는데 12월은 ENSO와의 관련성이 컸고 2월은 장기적인 변화가 크게 나타났다. 이러한 월별로 다른 특성을 반영해 각 월의 특성과 기온 경향에 따라 해를 분류하고 공통으로

나타난 가을철 선행 특징을 찾아 예측 인자로 제시하였다.

4장에는 APCC의 자체 기후감시와 분석 시스템 개발에 관한 사항을 기술하였다. 기후감시 시스템은 최신 관측된 지구자료와 한반도 관측 자료를 이용하여 다양한 기후 변수에 대해 평년 정보와 편차 정보를 서비스되도록 구성하였고 기후분석시스템은 전 지구 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, AJAX 등 비동기화 기술 및 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. 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.

마지막으로 이 과제는 과학적인 분석 정보를 바탕으로 기상청의 현업 장기예보 업무에 실질적으로 기여하였는데, 구체적인 사항은 다음과 같다. 2021년 평년 기간 변화와 최신 연구 결과를 반영하여 장기예보 가이드스를 개선하였으며, 매월 APCC 예보토의에 기후 감시와 분석 기반 예측 정보를 제공하였다. 또한 사후 분석 측면에서 매월 우리나라 기후 분석 토의를 수행하였으며, APCC-기상청-기상과학원이 최근 빈번하게 발생하는 이상기후 현상에 대응하고자 기후 소통 TF를 구성하여 이상기후 이슈에 대한 시의적절한 과학적 분석 정보를 제공하였다. 각각의 현업 업무 지원에 관한 사항은 부록으로 첨부하여 이 과제의 결과물이 현업 업무 지원에 어떻게 사용되었는지 예를 보이고자 한다. 또한, 연구 결과들의 효율적인 현업 업무 활용을 위하여 모식도 위주의 Fact Sheet를 작성하였는데 이 역시 부록으로 첨부하였다.

2. 인도양 변동성이 우리나라 기후에 미치는 영향

가. 봄철 인도양 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향

(1) 연구 배경

열대 해양에서 변동성은 전 세계 기후의 자연 변동성에 영향을 미치는데, 그 중 해수면 온도 변동성이 중요한 지역은 전 세계 대부분의 몬순 지역에 의해 둘러 쌓여 있는 인도양이다. 즉 인도양 해수면 온도는 인접한 아시아, 호주, 아프리카 몬순의 변동성에 영향을 주기 때문에 (Saji and Yamagata 2003; Yoo et al. 2006), 특히 아시아 몬순 시스템의 영향을 받는 한반도의 강수량과 기온 변동성 예측을 위해서 인도양의 해수면 온도 변동성을 잘 예측하는 것은 매우 중요하다. 봄철 인도양 해수면 온도 변화 관련 기작에 대한 연구들이 그동안 상당히 많이 수행 되어왔는데(예, Saji et al. 1999; Klein et al. 1999), 특히 봄철 인도양을 지배하는 변동성 모드는 basin-wide 모드로서 보통 ENSO 발달 뒤 구름, 태양 복사, 바람장 크기 관련 잠열속에 의해서 인도양 전반적으로 해수면 온도가 양의 편차 혹은 음의 편차를 갖게 된다 (예, Klein et al. 1999).

이 절에서는 봄철 인도양 해수면 온도 변화와 그와 관련한 대류활동이 한반도 기후에 어떻게 영향을 미치는지 기작들을 분석하고, 한반도에 영향을 미치는 인도양 대류활동에 대한 인도양 해수면 온도의 연관성을 분석하고, 예측인자로서의 활용성을 조사할 것이다. 아울러 한반도 기후에 영향을 미치는 대류활동이 ENSO와 어떠한 관계를 가지며, 봄철 한반도 기후 예측에 활용할 수 있는 방안을 모색할 것이다.

(2) 자료와 방법

① 관측 자료

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 I (Kalnay et al. 1996)으로 부터의 해면 기압, 지위고도, 바람, 연직 운동(오메가) 자료가 사용되었다. 이 연구에서는 1951년 이후의 관측 자료들을 중심으로 분석하였으며, 1991년에서 2020년을 평년 기간으로 하여, 1951년에서 현재까지의 해면기압, 연직운동, 지위고도, SST, OLR, 바람장의 편차가 정의되었다. 분석이전에 편차들은 선형 추세 제거 되었다. 그리고 ENSO 정의를 위한 Niño3.4 ($170^{\circ}\text{W} - 120^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$) SST 지수 자료는 미국 NOAA/Climate Prediction Center (CPC) 웹사이트에서 다운 받아 사용하였다.

한반도 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.

② 봄철 한반도 기온/강수에 영향을 미치는 인도양 변동 모드 추출

봄철 한반도 기온 및 강수 변화와 관련 있는 인도양 변동 모드를 추출하기 위해서 Singular Value Decomposition (SVD) 방법을 적용하여 주성분 분석을 수행 하였다. 봄철 기온/강수를 위해서 ASOS 45 지점 월 자료를 인도양 변동 모드를 위해서 인도양 영역에서 OLR 자료를 사용하였다. SVD 주성분 분석을 통한 OLR 관련 첫 번째 leading 모드의 principal component (PC)는 인도양 OLR 변동 지수로 정의되었다.

(3) 봄철 한반도 기후 관련 인도양 변동 모드

① 봄철 한반도 기후 관련 인도양 변동 모드 특성

주성분 분석을 통해서 추출된 3-4월 한반도 강수 관련 봄철 인도양 대류활동 패턴은 Figure 1에서 보여주는 것처럼 벵갈 만에서 대류억제, 남인도양 대류강화의 쌍극자 같은 패턴을 보였으며, 이는 한반도 전 지역에서 양의 강수 편차와 관련이 된다. 5월의 경우 3-4월 같은 쌍극자 패턴은 약해지고, 아라비아 해에서 대류활동이 한반도 강수 증가와 관련을 보인다. 위와 같은 인도양 대류활동 특징은 3-4월 한반도 기온의 경우에서도 나타나고, 5월의 경우 아라비아 해에서 대류억제 신호와 한반도 전역에서 기온 상승과 관계가 있음을 보여준다 (Figure 2). 이와 같은 결과는 3-4월 기온 강수에 대한 인도양 대류활동 관련한 한반도 주변 대기 순환장이 비슷함을 보여주고, 5월의 경우는 인도양 대류활동 관련한 한반도 대기 순환장이 다소 다름을 나타낸다.

인도양 대류활동이 어떠한 원격상관 패턴을 발생 시켜서 한반도 기후에 어떻게 영향을 미치는 지 분석하기 위해서 Figure 1과 2에서 보여주는 각 주성분 모드 관련 PC (즉 인도양 대류활동 지수로서 정의)와 상하층(즉 200과 1000hPa) 지위고도 편차와 상관계수를 계산 하였다.

Figure 3과 4는 각각 3월 한반도 기온, 강수 관련 인도양 대류활동 지수와 상하층 지위고도 편차와 상관관계 분포를 보여준다. 기온과 강수 관련하여 상당히 비슷한 상관관계 분포를 보인다. 특히 기온, 강수에 대하여 정확한 위치는 다소 다르지만 한반도 주변에서 고기압성 편차가 위치한다. 강수에 대하여 한반도 주변 지위고도 편차장 분포를 보면 한반도는 고기압성 순환 편차 좌측에 위치하는 것으로 나타난다. 이는 고기압성 순환 편차 좌측으로 고온 다습한 남동풍의 영향을 받는 것을 의미하며, 한반도 강수 증가에 기여하게 된다. 기온의 경우에는 한반도를 중심으로 고기압성 순환 편차가 위치하게 되어, 일사량 증가 및 단열 승온으로 기온 증가의 원인이 된다. 이와 관련한 원격상관 패턴은 주성분 분석에서 대류억제가 나타나는 벵갈만 주변에서 상층 저기압, 하층 고기압에서 출발하는 한반도 주변으로 향하는 파동 패턴을 보인다. 벵갈만 주변에서 상하층 지위고도 분포는 하강 기류 관련 증발 및 비단열 냉각에 의한

(Figure 6) Gill-타입 로스비 반응(Matsuno 1966; Gill 1980)이며 200hPa 비발산 동서방향 바람 속도 기후값으로 표현되는 웨이브 가이드를 따라 파동전파가 있게된다. 4월 기온/강수 관련 상하층 지위고도 편차장 상관관계 분포는 3월의 경우와 상당히 유사하며, 비슷한 기작으로 설명이 가능하다.

3-4월 반응처럼 유사하게 5월 한반도 기온, 강수에 대해서도 인도양 대류활동과 관련하여 상하층 지위고도 편차장은 경압 구조를 갖는다 (Figure 4). 다시말해서 아라비아 해에서 대류 강화(억제)에 의한 잠열 방출 (증발) 및 비단열 가열 (냉각)에 의한 Gill-타입 로스비 파동 반응과 관련된다 (Figure 8). 이 파동은 상층 웨이브 가이드를 따라 북동 방향으로 전파하게 되어, 5월 한반도 기온, 강수에 영향을 미치는 대기 순환장 형성에 기여하게 된다(Figure 5). 한반도에 강수가 많을 때는 아라비아해에 강수 증가/대류강화로 한반도에서 동쪽으로 중심을 둔 고기압 성 순환 편차 발달에 기여 하는 원격상관 대기 파동이 발생한다. 이 한반도 주변 고기압성 편차는 고온다습한 남동풍을 유입시키며, 강수 증가에 기여하게된다. 기온이 증가하는 경우는 아라비아 해에 대류 억제가 강제력이 되어 상층 저기압을 동반하는 로스비 파동이 발생하며, 한반도 서쪽으로 고기압, 동쪽으로 저기압 성 편차가 발생하여, 대륙쪽의 고온 건조한 북서풍이 한반도 쪽으로 유입되는 것과 관련이 있다.

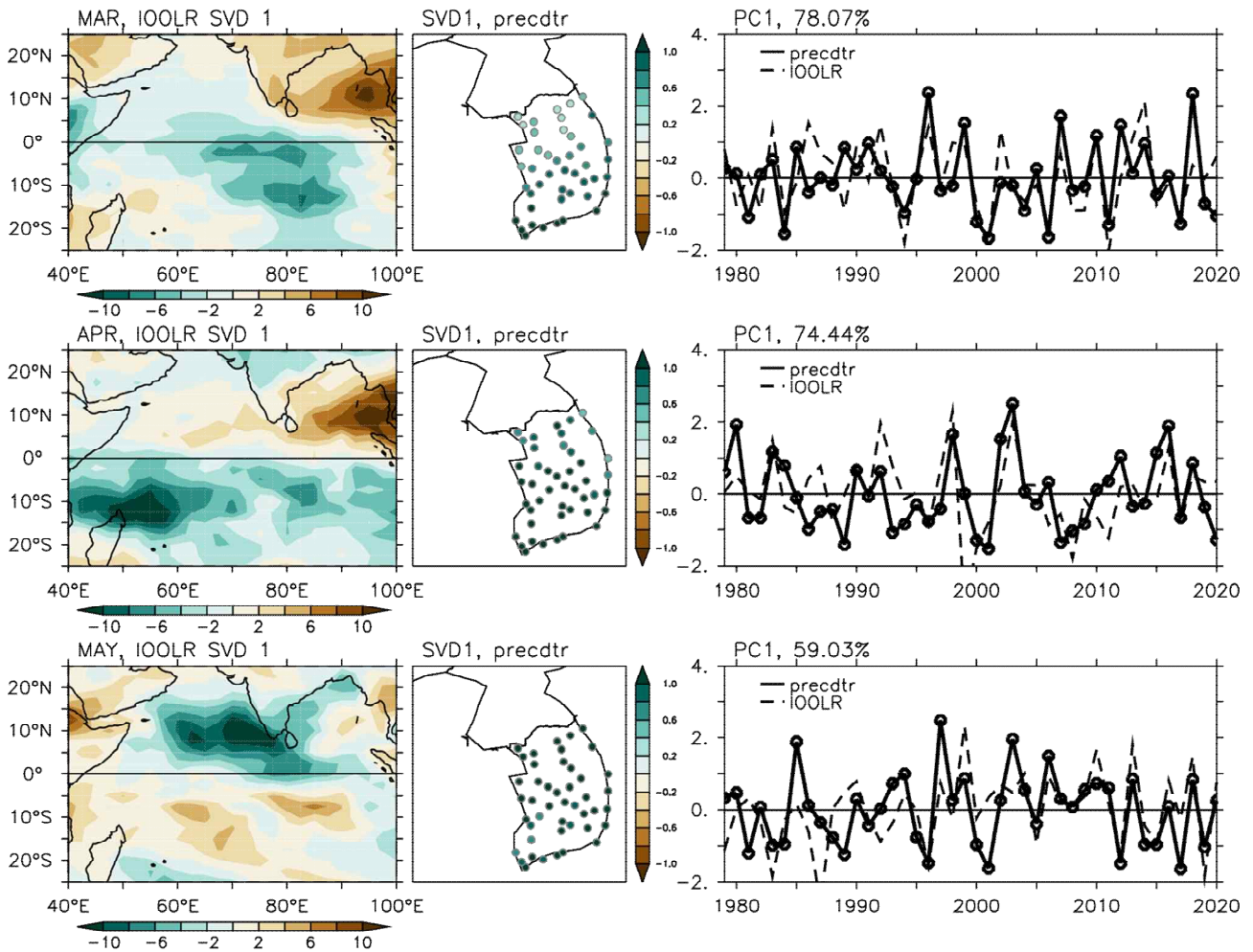


Figure 1. Spatial patterns of the first leading EOF modes obtained from the SVD analysis for monthly-averaged ASOS (48 station) (left) precipitation over South Korea and OLR over Indian Ocean and (right) time series of their principle components in (upper) March, (middle) April, and (lower) May.

② 봄철 한반도 기후 관련 인도양 변동 모드의 예측인자

3-4월 한반도 기온과 강수 변화와 관련있는 인도양 대류활동에 대한 예측 인자를 찾기위 해서 먼저 인도양 대류활동과 상당히 관련이 있는 MJO (Madden-Julien Oscillation) 위상별로 표준 편차 이상이 되는 인도양 대류활동 지수들을 분류하여, 위상별 빈도수와 해당하는 강도들을 비교하였다. 1973년 이후 매해 위상별 발생 수를 계산하고, 표준편차 이상이 되는 OLR 대류활동 지수를 갖는 년도 들에서 위상별 발생 수와 강도의 평균으로 인도양 대류활동 관련 MJO 위상 빈도수와 강도로서 정의하였으며, 3월 기온/강수에 대한 결과는 Figure 8에서 보여지는 것과 같다.

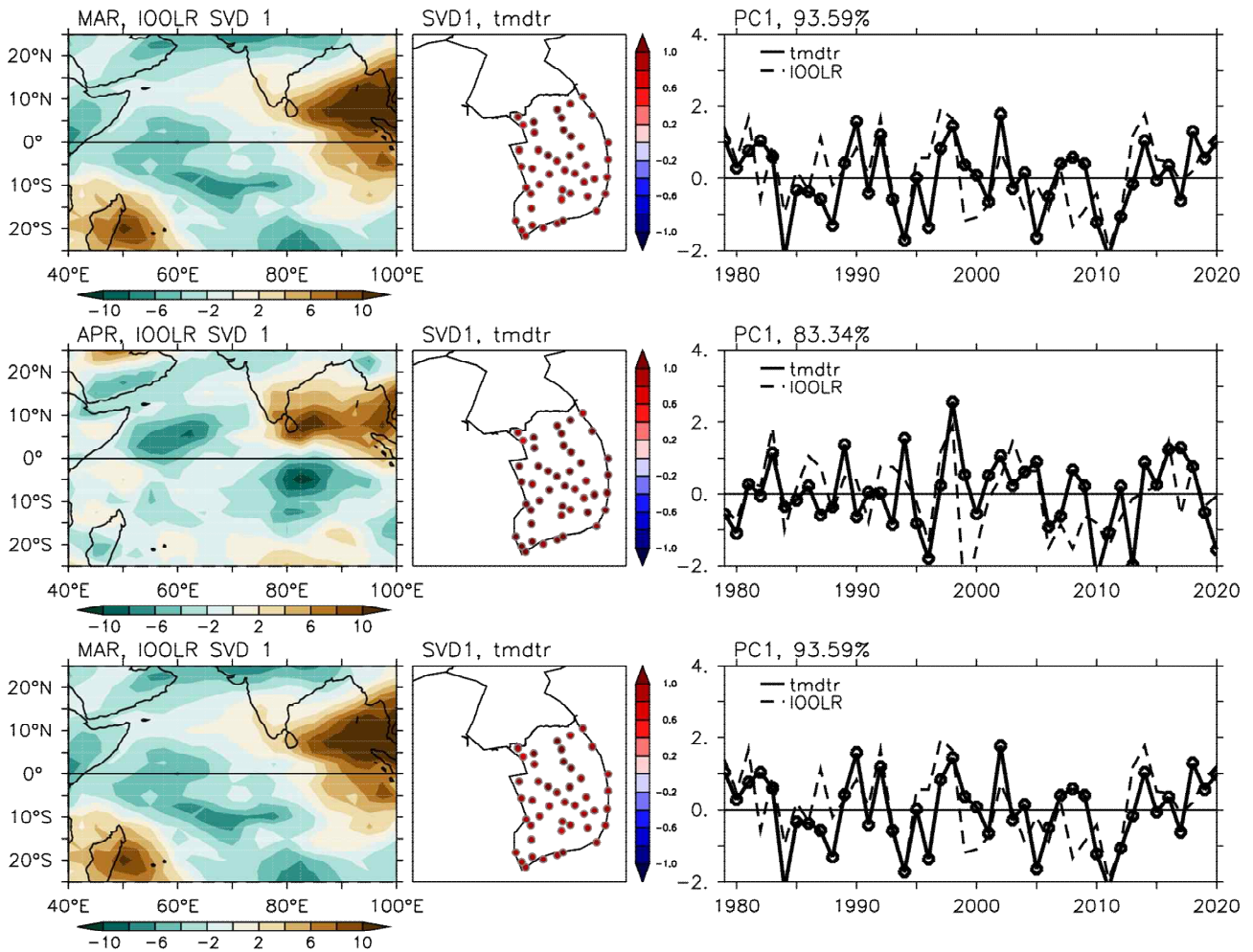


Figure 2. (Left panels) Spatial patterns of the first leading EOF modes obtained from the SVD analysis for monthly-averaged ASOS (48 station) surface temperature over South Korea and OLR over Indian Ocean and (right) time series of their principle components in (upper) March, (middle) April, and (lower) May.

3월 기온상승에 대한 벵갈만 대류억제 활동은 MJO 7-8번째 위상에 있을 때, 기온 하강에 대한 대류강화 활동은 MJO 3번 위상에서 빈번하게 발생하였으며, 강도도 다른 위상보다 컸다. 한편 3월 한반도 강수 증가에 대해서 2-3번 위상에서 강수 감소 관련 인도양 대류활동은 MJO 8번 위상이 다른 위상보다 상대적으로 강도와 빈도수가 컸다. 그러므로 3월 한반도 기후 관련 하여 MJO 및 관련한 대류활동을 감시 함으로써 한 달 이내의 선행시간에서 예측이 가능할 것으로 보인다.

하지만 4월 한반도 기후 관련 인도양 대류 활동은 3월 처럼 MJO 위상별로 뚜렷한 특징을 보여주지 않았으며, 인도양 대류활동에 대한 예측인자를 찾기 위해서 MJO외에 다른 기후 인자들을 분석해야 할 것으로 보인다.

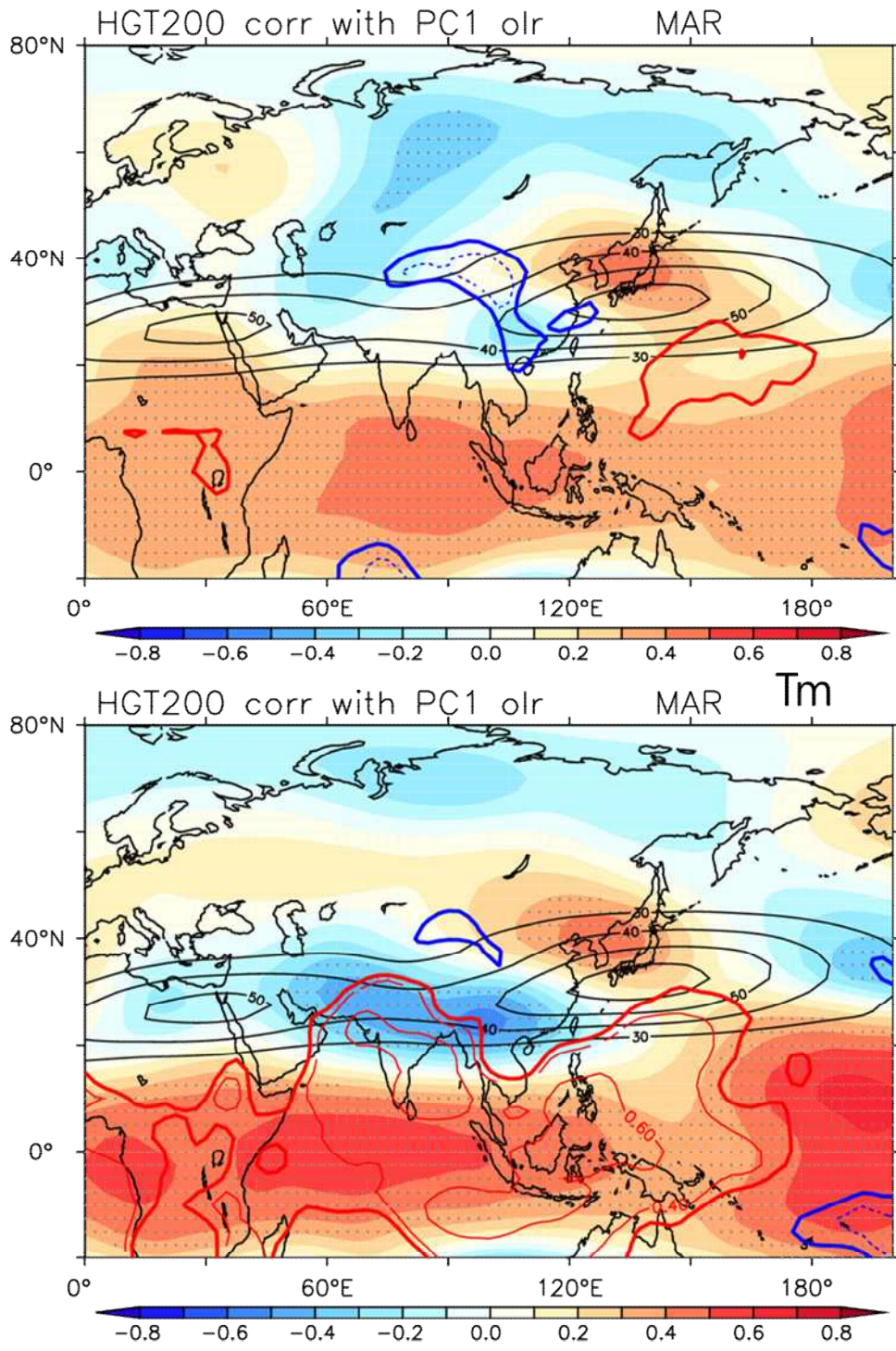


Figure 3. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (upper) precipitation and (lower) temperature with 200 hPa (shade) and 1000 hPa (blue and red contours) geopotential height (shade), and 200 hPa nondivergent zonal winds (black contours) in March. Significant values at 90 % level according to student t-test are shown in contours and with gray dots.

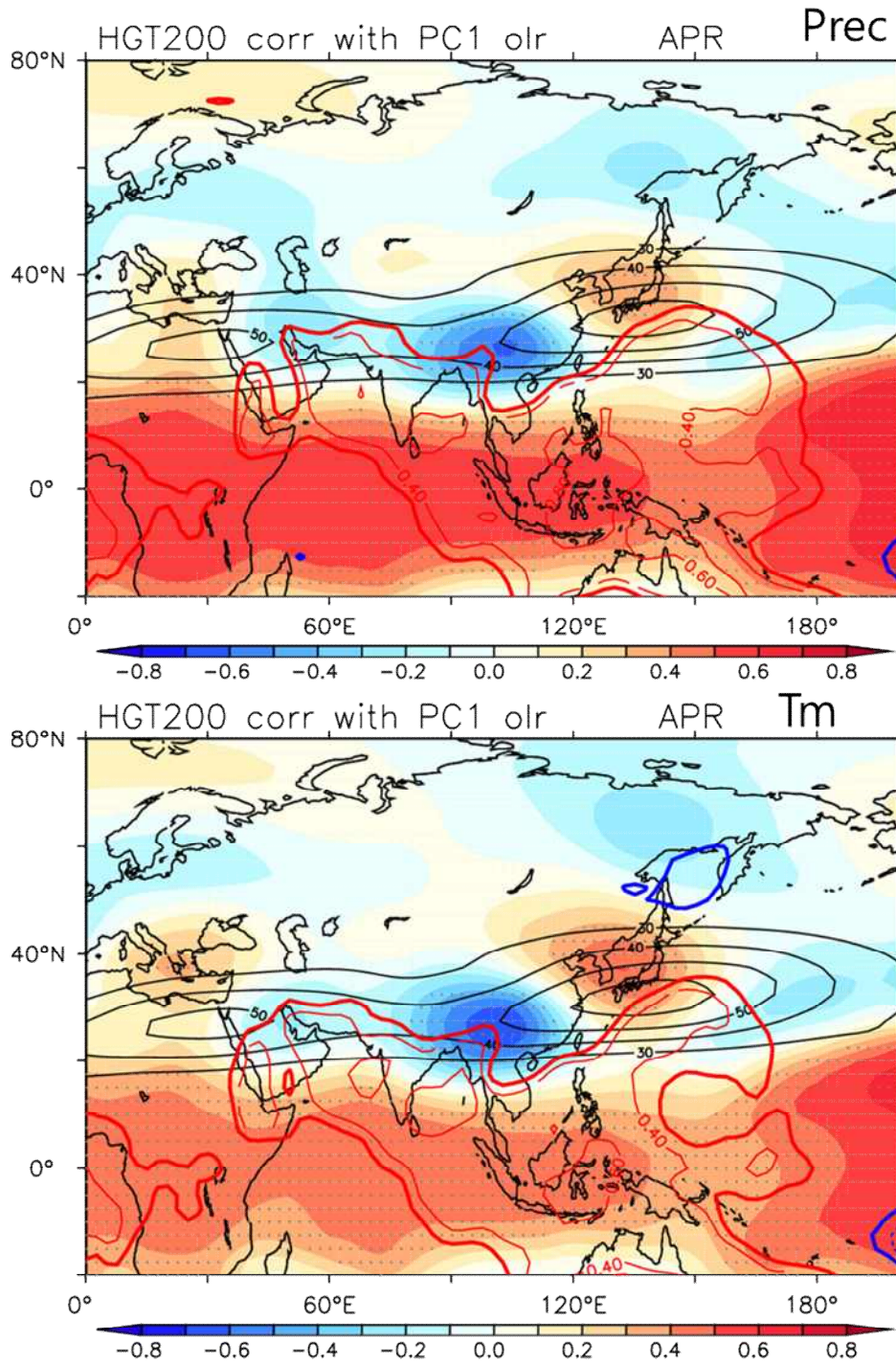


Figure 4. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (upper) precipitation and (lower) temperature with 200 hPa (shade) and 1000 hPa (blue and red contours) geopotential height (shade), and 200 hPa nondivergent zonal winds (black contours) in April. Significant values at 90 % level according to student t-test are shown in contours and with gray dots.

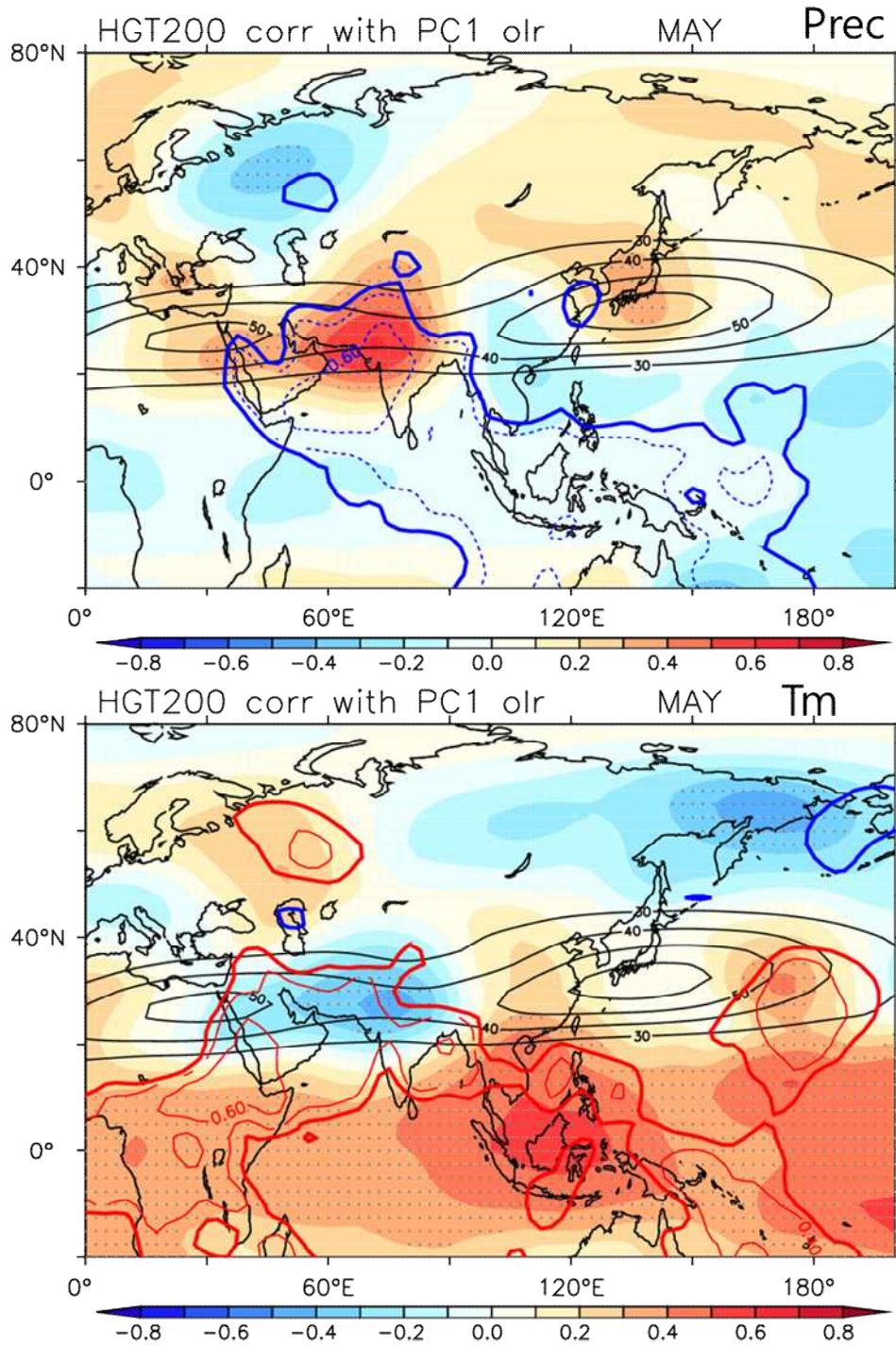


Figure 5. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (upper) precipitation and (lower) temperature with 200 hPa (shade) and 1000 hPa (blue and red contours) geopotential height (shade), and 200 hPa nondivergent zonal winds (black contours) in May. Significant values at 90 % level according to student t-test are shown in contours and with gray dots.

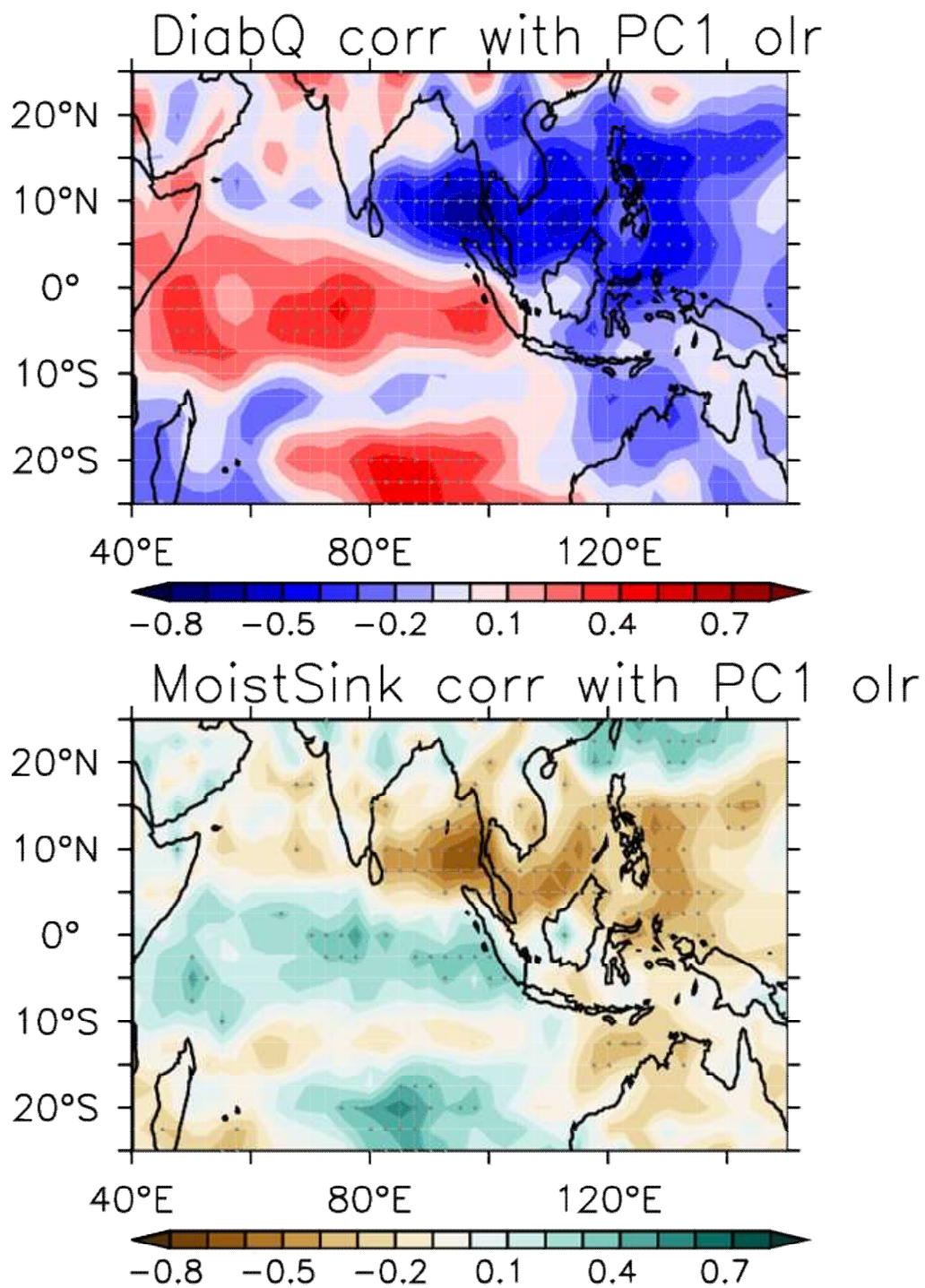


Figure 6. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis with (upper) diabatic heating and (lower) moist sink in March. Significant values at 90 % level according to student t-test are shown with gray dots.

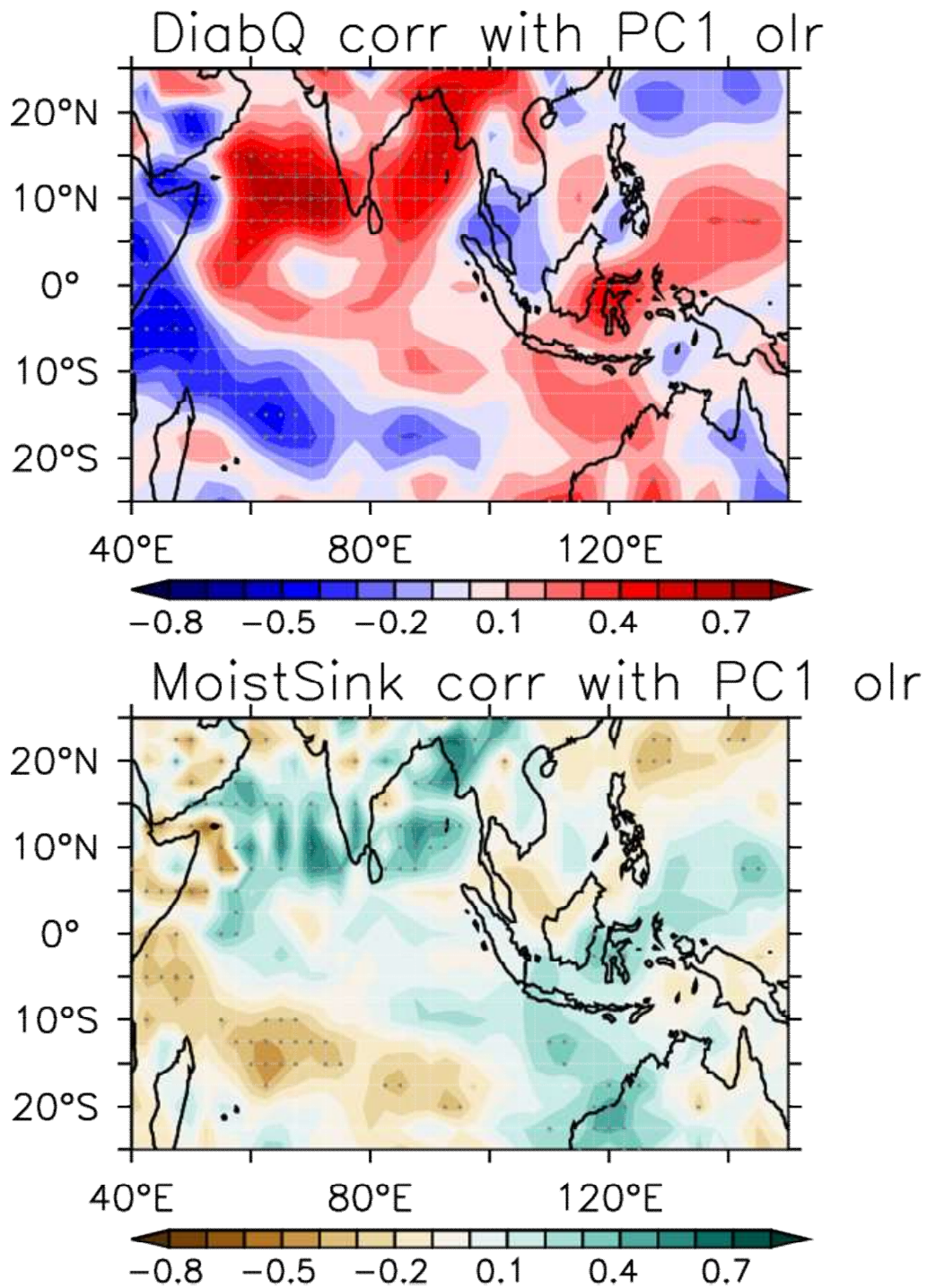


Figure 7. Spatial correlation coefficient patterns of Indian Ocean OLR index from SVD analysis with (upper) diabatic heating and (lower) moist sink in April. Significant values at 90 % level according to student t-test are shown with gray dots.

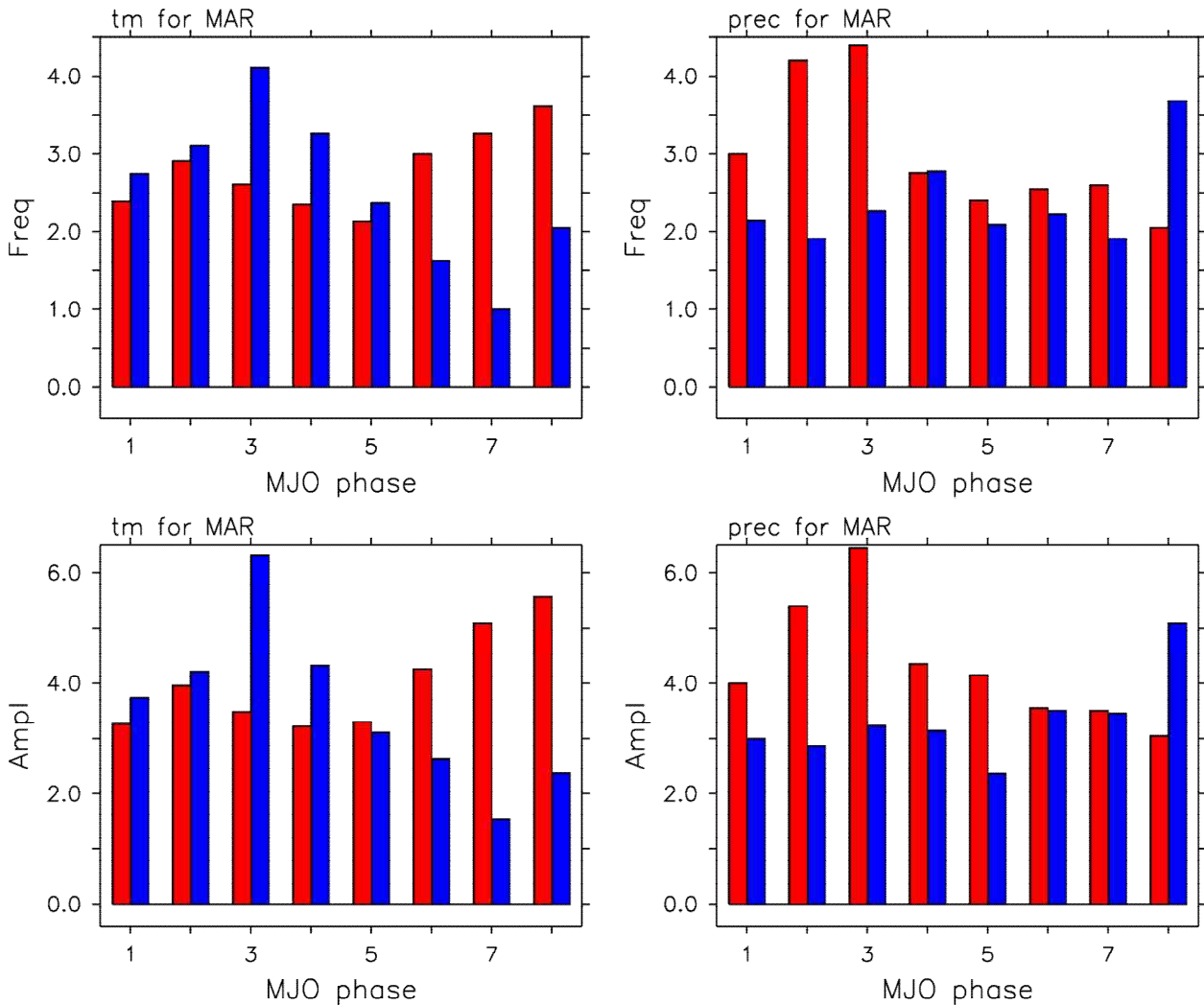


Figure 8. MJO (upper) frequency and (lower) amplitude by phase during years of the positive (red) and negative (blue) Indian Ocean OLR index associated with Korean monthly-averaged temperature and precipitation in March

3-4월 한반도 기후 관련한 인도양 대류활동에 대한 예측 선행인자를 해양에서 찾기 위해서 대류 활동 지수와 인도양에서 해수면 온도, 바람, OLR 편차장과 지연 회귀분석을 수행하였다. 4월 인도양 대류활동 지수에 대한 지연 선형 회귀 분석 결과는 Figure 9에서 보여지며, 선형 회귀 분석 분포는 한반도 기후, 강수에 대하여 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다. 동시 시간 즉 4월의 선형 회귀 분석은 주성분 분석에서 보여지는 남북 방향의 쌍극자 구조의 OLR 편차 패턴이 나타났으며, 동시에 남인도양의 대류강화 신호가 발생하는 지역에 양의 해수면 온도 편차도 함께 존재하였다. 이는 남인도양의 대류강화의 강제력으로 해수면 온도가 역할을 했으며, 뱀갈만의 대류억제는 남인도양의 대류강화에 의한 상승기류에 대한 보상작용으로 뱀갈만 지역에서 하강 기류와 관련이 있다고 해석할 수 있다.

남인도양의 대류 강화와 관련된 양의 해수면 온도 편차는 2-3월 시기에서도 나타나며, 남인도양에서 대류 강화와 관련하여 반시계 방향으로 회전하는 바람 편차장 (즉 저기압성 순환 편차)이 분명하게 보이며, 저기압성 순환 편차와 관련된 뱀갈 만에서 적도를 가로질러 수렴하는 바람장은 3월부터 나타나고 4월에 회귀 분석 계수 강도가 더 강해진 것을 확인할 수 있다.

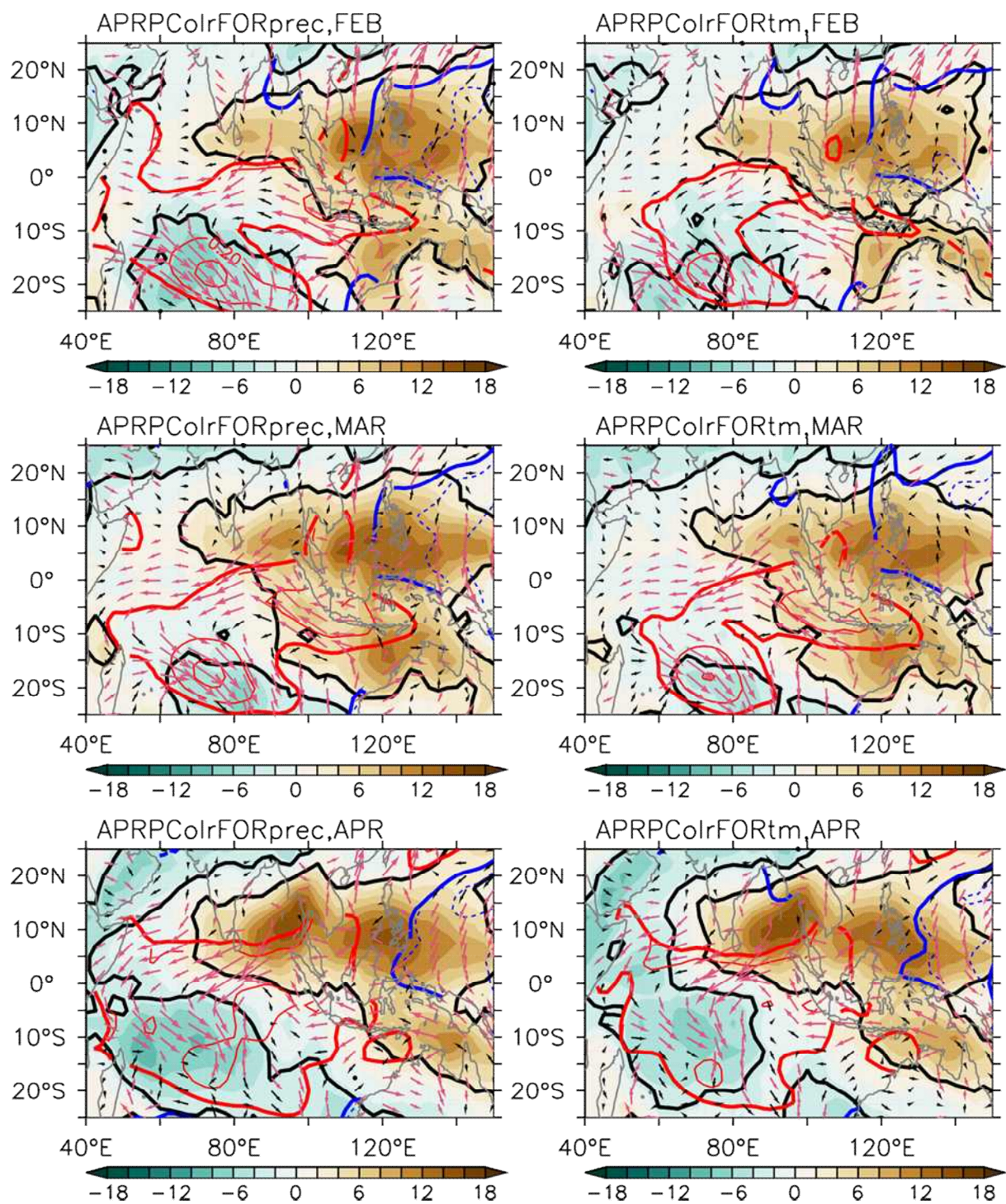


Figure 9. Spatial lag-regression patterns of April Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged (left) precipitation and (right) temperature with OLR (shade), SST (blue and red contours), and surface zonal wind (black contours) anomalies in preceding (upper) February, and (middle) March, and (lower) April. Significant values at 90 % level according to student t-test are indicated with thick contours and pink color vectors.

이는 Figure 9에서 보여주는 남인도양에서 대류활동 강화가 벵갈만의 대류억제의 시기를 앞선다는 것을 의미하며, 남인도양의 해수면 온도가 예측인자로 활용 가능성을 시사한다. 3월 기온, 강수에 대한 회귀 분석에서도 유사한 분석 결과를 보였다.

위의 결과는 남인도양 위도에서 평균된 해수면 온도와 강수, 북인도양 위도에서 평균된 OLR 지연 회귀 분석장을 선행 1월부터 지연 8월 까지 시간-경도 분포(Figure 10)를 보면 더욱 분명해진다. 1-2개월 선행 시간 즉 3월 벵갈만 대류활동 관련하여 2월달에 남인도양에서 양의 해수면 온도가 나타나고 3월에 양의 해수면 온도 지역에 양의 강수 편차가 나타나고, 동시에 벵갈만 지역에서 음의 OLR 편차가 나타난다. 4월 벵갈만 대류 활동에 대해서는 1월부터 지속적으로 남인도양 해수면 온도가 양의 편차를 보이고, 4월에 양의 해수면 온도 편차 지역에서 양의 강수 편차, 동시에 벵갈만에서 음의 OLR 편차가 나타났다.

3-4월 한반도 주변 대기 순환장의 원격상관 파동 전파의 원인이 되는 벵갈만에서 대류활동이 같은 지역에서 해수면 온도가 강제력으로 작동하지 않는 이유를 분석 하기 위해서 인도양에서 동서 방향으로 영역 평균된 해수면 온도 기후장의 계절 변화를 분석 하였다 (Figure 11). 해수면 온도의 계절 변화는 기후장과 기후장의 연평균의 차이로서 정의 하였다. Figure 11을 보면 1-4월의 인도양 해수면 온도는 남인도양에서 연평균 값 보다 크며, 연평균 대비 양의 해수면 온도는 늦은 봄 즉 5월 이후 북인도양에서 나타난다. 이는 대류를 유발할 수 있는 배경 해수면 온도가 봄철 동안 남인도양에서 형성이 되고, 이후 북인도양에서 대류 활동을 야기 할 수 있는 정도로 배경 해수면 온도가 증가하게 된다. 이러한 대기에서 대류 활동을 유발할 수 있는 배경 해수면 온도인지를 평가하기 위해서 대류 발생 기준 온도(Graham and Barnett 1987; Johnson and Xie 2010) 28°C를 월별 기후장에서 뺐으며, Figure 11에 해수면 온도 계절 변화 위에 등치선으로 보여주었다. 여기서 양의 값은 대류 활동을 유발 할 수 있는 해수면 온도 값이라는 것을 의미하며, 2-4월에서 대류활동 기준값 보다 큰 지역이 남인도양에 위치하고, 이후 북인도양에 위치하는 것을 확인 할 수 있다.

위와 같은 인도양에서 해수면 온도 배경장의 계절 변화는 3-4월 한반도 기온 및 강수에 영향을 미치는 인도양 대류활동의 예측 인자가 남인도양에서 형성 되는 이유를 설명해주고 있다. 한편 5월 이후 대류활동을 유발 하는 해수면 온도 기후값을 갖는 지역이 북인도양에 위치 하는데, 이는 5월 북인도양 대류활동에 대한 예측인자로서 북인도양에서 해수면 온도 편차를 활용할 수 있다는 것을 의미한다.

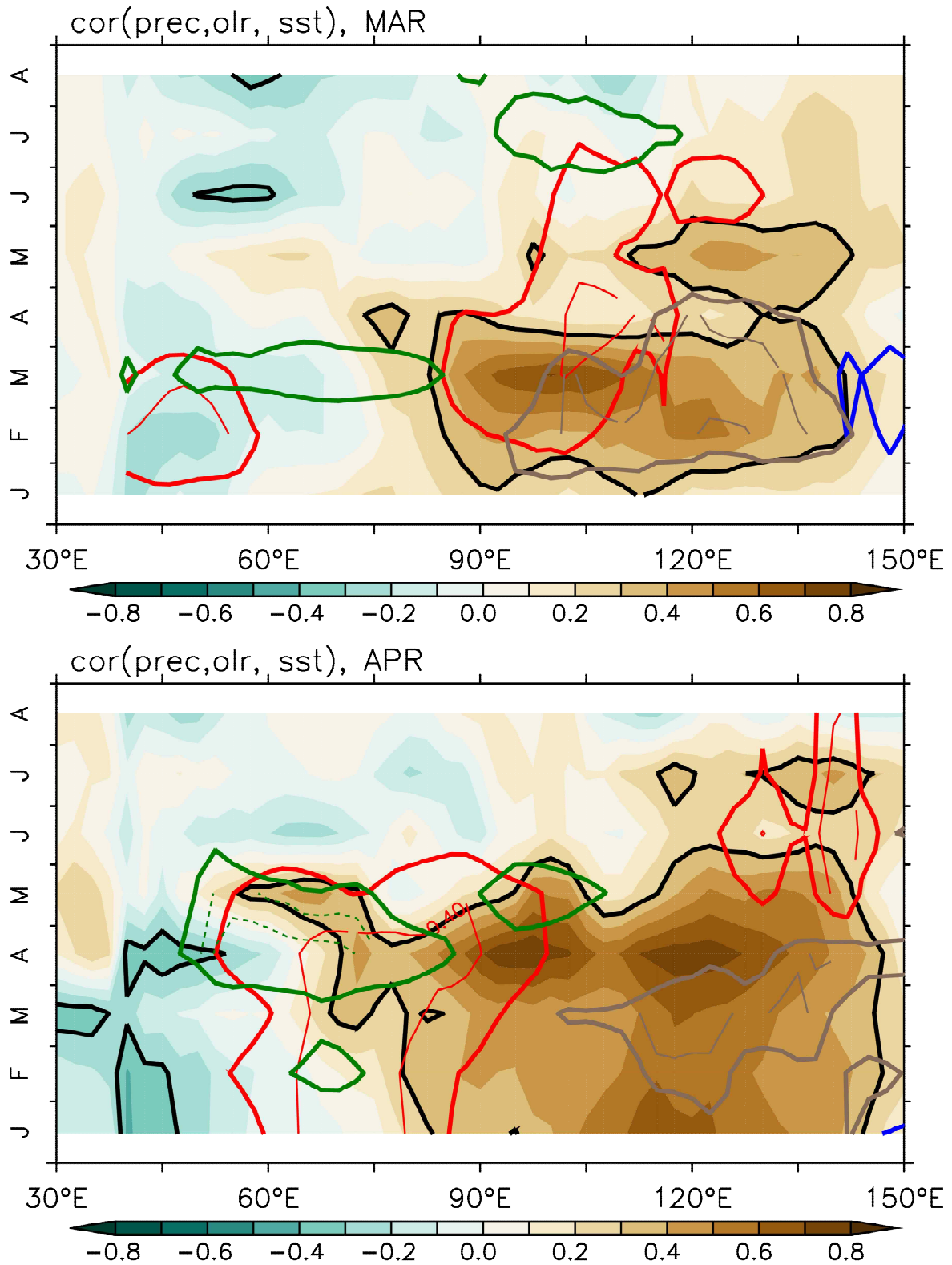


Figure 10. Lag-correlation patterns of (upper) March, (lower) April Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation with OLR (shade) anomalies averaged over 10–15°N, and SST (blue and red contours) and OLR (green and brown contours) anomalies over 20–5°S from preceding January and subsequent August. Significant values at 90 % level according to student t-test are indicated with thick contours.

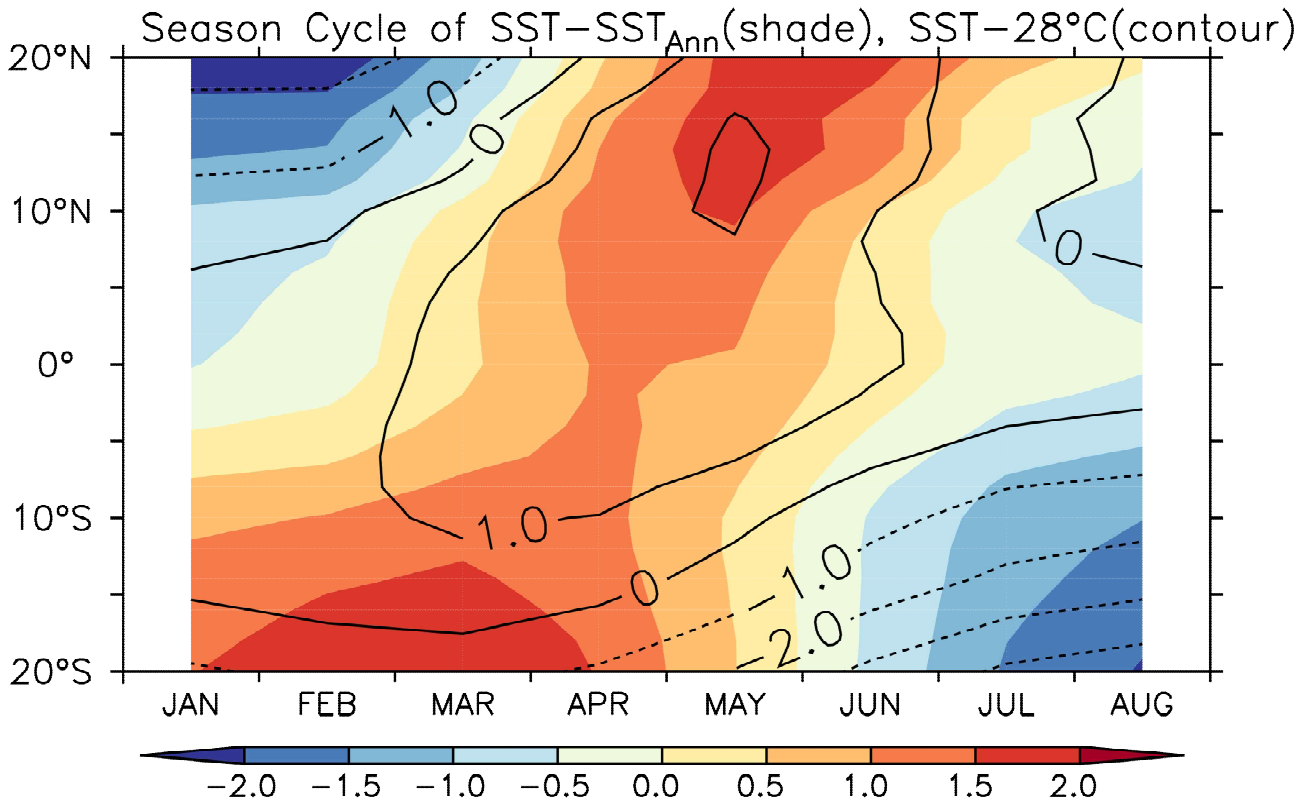


Figure 11. Seasonal cycle of SST deviation (shades) from its annual mean and SST difference from 28°C (contours) averaged over Indian Ocean (40-100°E).

Figure 12는 한반도 5월 강수와 관련된 인도양 대류 활동 지수와 인도양에서 해수면온도, OLR, 바람 편차장과 지연 회귀 분석한 결과를 보여준다. 5월 한반도 강수에 영향을 미치는 아라비아해에서 대류 강화가 발달하기 3개월 이전 즉 3월 달부터 아라비아 해에서 양의 해수면 온도 편차가 나타나고 동시에 이 지역으로 수렴하는 바람 편차장을 확인 할 수 있다. 4월 달에는 인도양 적도 주변 서쪽에 강수가 형성이 되고 5월에 아라비아 해까지 확장이 되었다. 위에서 설명한 것처럼 대류활동이 가능한 해수면 온도 배경장이 4월 이후에 북인도양에 형성이 되어 4월 이전에 아라비아 해에서 양의 해수면 온도 편차와 이와 관련한 바람장의 수렴이 5월에 더 강화되는 양상을 보이는 것과 연결된다. 즉 3월 아라비아 해에서 양의 해수면 온도 편차가 5월 이 지역 대류활동 강화에 대한 preconditioning 역할을 하는 것으로 보이며, 이는 5월 한반도 기온, 강수 예측을 위해서 봄철 초반에 아라비아 해에서 해수면 온도의 감시가 필요하다는 것을 지시한다. 위의 아라비아 해에서 대류활동 지수에 대한 선행 예측 인자로서의 해수면 온도의 활용 가능성은 북인도양 위도에서 영역 평균된 시간-경도 그림에서 분명히 확인이 가능하다.

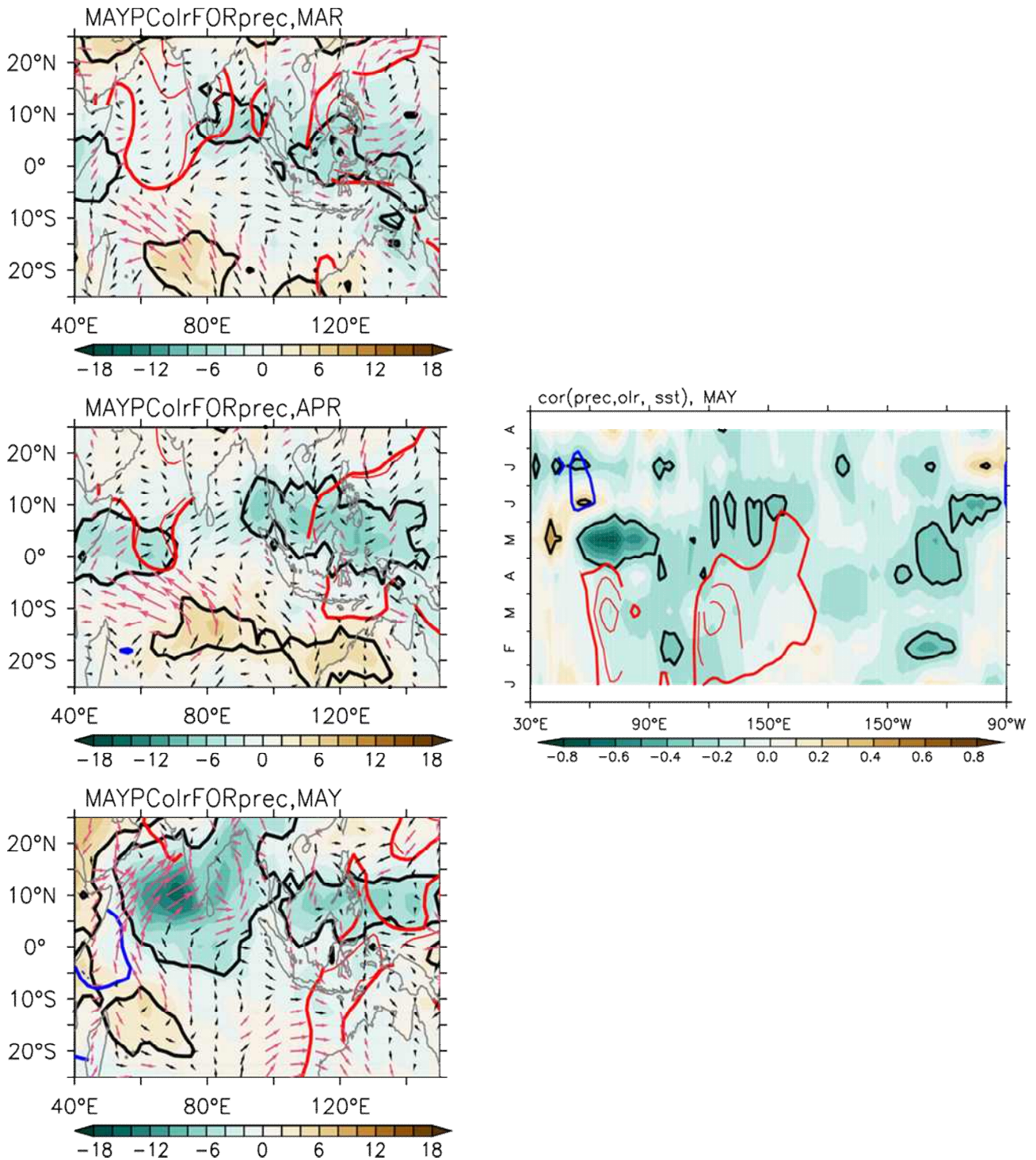


Figure 12. (left) Spatial lag-regression patterns of May Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation with OLR (shade), SST (blue and red contours), and surface zonal wind (black contours) anomalies in preceding (upper) February and (middle) March, and (lower) April. (right) Lag-correlation patterns of April Indian Ocean OLR index from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation with OLR (shade) anomalies averaged over 10–15°N, and SST (blue and red contours) and OLR (green and brown contours) anomalies over 20–5°S from preceding January to subsequent August. Significant values at 90 % level according to student t-test are indicated with thick contours and pink color vectors.

Figure 13과 14는 각각 봄철 한반도 기온, 강수 관련 대류활동 지수, Niño 3.4 지수, 한반도 전국 평균된 기온, 강수의 시계열을 보여준다. 우선 한반도 기온 관련 (Figure 13) 대류활동 지수와 ENSO 지수와 상관관계 값이 모두 95% 수준에서 유의한 값을 갖는데 특히 3-4월에 대하여 상대적으로 상당히 상관관계 값이 컸다. 이는 한반도 기후 관련 인도양 대류활동이 인도양 축전지 이론 (Xie et al. 2009)으로 설명 될 수 있는 엘니뇨/라니냐 발달 후 쇠퇴하는 동안 인도양에서 해수면 온도 변화와 일부 연결 시킬 수 있다는 것을 의미한다. 즉 축전지 이론에 의하면 엘니뇨(라니냐) 쇠퇴하는 동안 봄철 동안 남동 인도양에서 downwelling (upwelling) 로스비 반응이 있으며, 서쪽으로 전파가 이루어지며 수온약층 깊이가 얇은 남서 인도양에서의 해수면 온도 편차의 증가 (감소)하게 된다. 그러므로 남인도양에서 예측 인자로서 활용되는 해수면 온도 편차 변화는 일부는 ENSO 쇠퇴기 동안 인도양과의 상호작용으로 발달하는 것으로 보인다. 특히 강한 엘니뇨 (82/83, 97/98, 2015/16) 쇠퇴기 동안 남인도양 해수면 온도 상승, 벵갈만 대류억제에 의한 원격상관으로 한반도 4월 기온은 평년보다 높았다. 라니냐의 경우 라니냐가 2년 연속 발달하는 경우가 7번 있었는데, 7번 중 5번의 경우 연속 발달 2년 중 첫 번째 해에서 음의 대류활동 지수를 가졌으며, 이는 한반도 4월 기온 하강과 관련이 있었다. 그러므로 2년 연속 라니냐의 발달 관련 예측을 통해서 남인도양 해수면 온도, 벵갈 만에서 대류 강화의 가능성을 미리 예측하여 4월 한반도 기온 예측에 활용이 가능 할 것으로 보인다. 그러나 대류활동 지수와 Niño 3.4 지수와 상관관계가 유의한 값을 갖지만 3월과 5월 기온의 경우에는 ENSO와 관련성을 발견하기 어려웠다.

봄철 한반도 강수 관련 대류활동 지수와 Niño 3.4 지수가 95% 수준에서 유의한 상관관계가 나타나는 달은 3월과 4월이었으며, 특히 4월의 경우 상관계수의 값이 0.69로서 상당히 컸으며, 기온의 경우처럼 강한 엘니뇨 쇠퇴기 동안 강수가 평년 보다 높은 값을 보였다. 라니냐의 경우에도 강했던 상위 3개의 라니냐 이벤트 (88/89, 99/00, 07/08) 쇠퇴기 동안 (벵갈만에서 대류억제 강제력으로 인한 파동전파 관련 한반도에서 동쪽으로 치우친 저기압성 순환 편차에 의한 저온 건조한 북동풍의 유입으로 모두 한반도의 강수가 평년보다 많지 않았다. 5월 한반도 강수 관련 아라비아 해에서 대류활동은 ENSO와의 관계는 유의하지 않았다 ($r=-0.25$).

(4) 요약 및 결론

이 절에서는 봄철 인도양 대류 활동의 우리나라 기온·강수 변동에 대한 영향을 분석하기 위해 주성분 분석 방법을 적용하였다. 3월과 4월은 벵갈만 지역에서 대류 억제 신호로부터 대기 파동 전파를 통해 우리나라에 고온, 다습한 특성이 나타나며, 벵갈만 지역에서 대류억제 신호는 1-2개월 선행 시간에서 남인도양 해수면 온도 상승에 의한 강수 발생 및 대류 강화로 인한 보상작용과 관계가 있었다. 특히 4월의 우리나라 기온 강수 예측에서 이전 겨울에 발달한 ENSO의 강도를 참고할 수 있다. 예를 들면 강한 엘니뇨 발달 뒤에 남인도양의 해수면 온도 상승이 있었으며, 한반도 기온은 평년보다 높았고, 강한 라니냐 뒤에 봄철 남인도양 해수면 온도 하강이 있었고, 한반도 주변 저기압성 순환의 좌측으로 저온 건조한 북풍의 유입으로 강수가 평년 보다 적은 경향이 있었다. 5월에는 아라비아해 지역에서 대류 강화 신호로부터 대기 파동이 전파되어 한반도 고온, 다습한 특성이 나타나는데, 아라비아해 지역에서 대류 강화 신호에 대한 1-2개월 선행인자로서 이 지역에서 해수면 온도 편차를 활용할 수 있음을 확인 하였다.

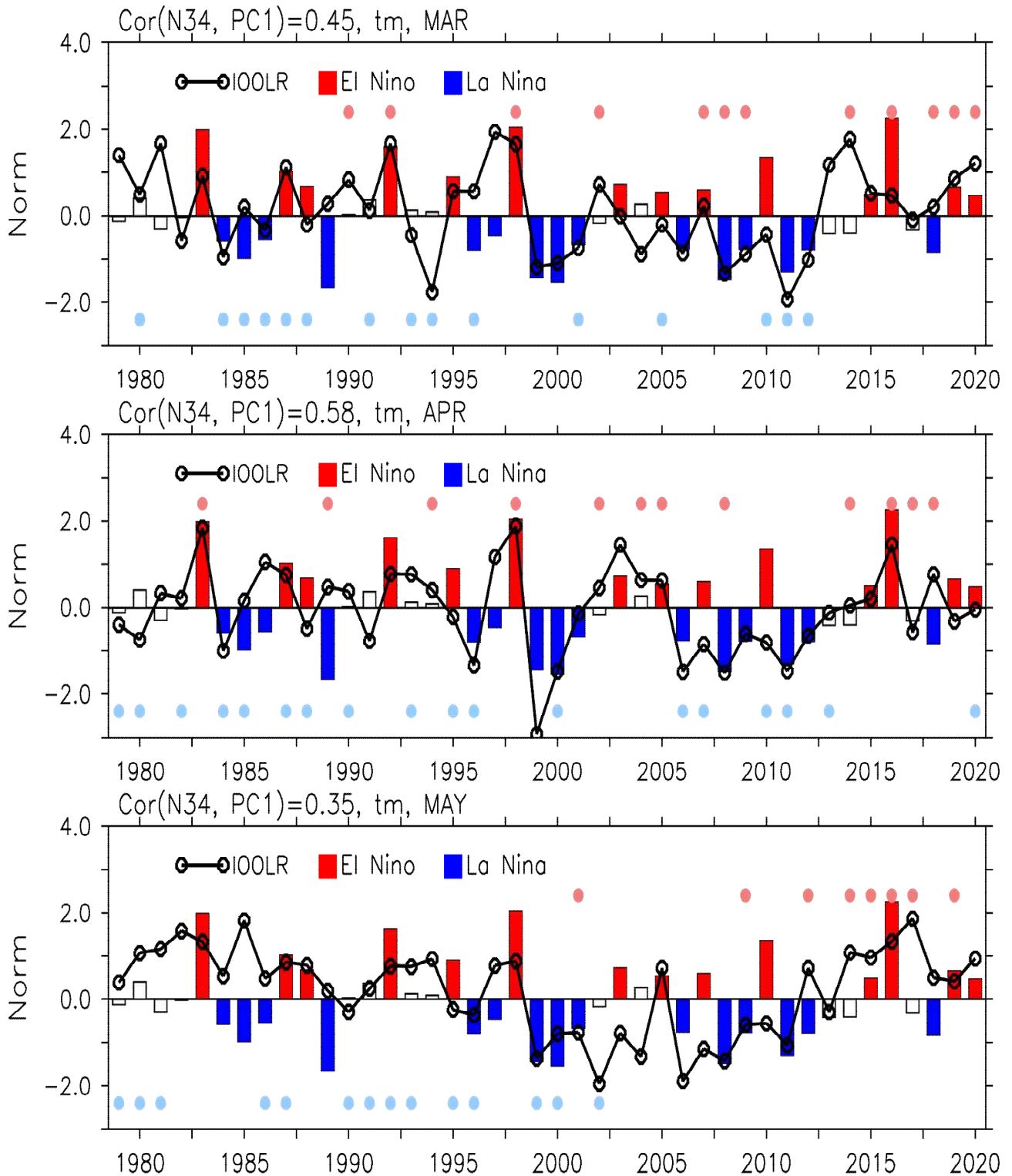


Figure 13. Time series of Indian Ocean OLR index (black) from SVD analysis for Korean monthly-averaged surface temperature, Niño 3.4 index (boxed plots) in (upper) March, (middle) April, and (lower) May. Above- and below-normal surface temperatures indicated with light-red and light-blue circles, respectively, are also shown. El Niño (red) and La Niña (blue) events are represented with colored boxes.

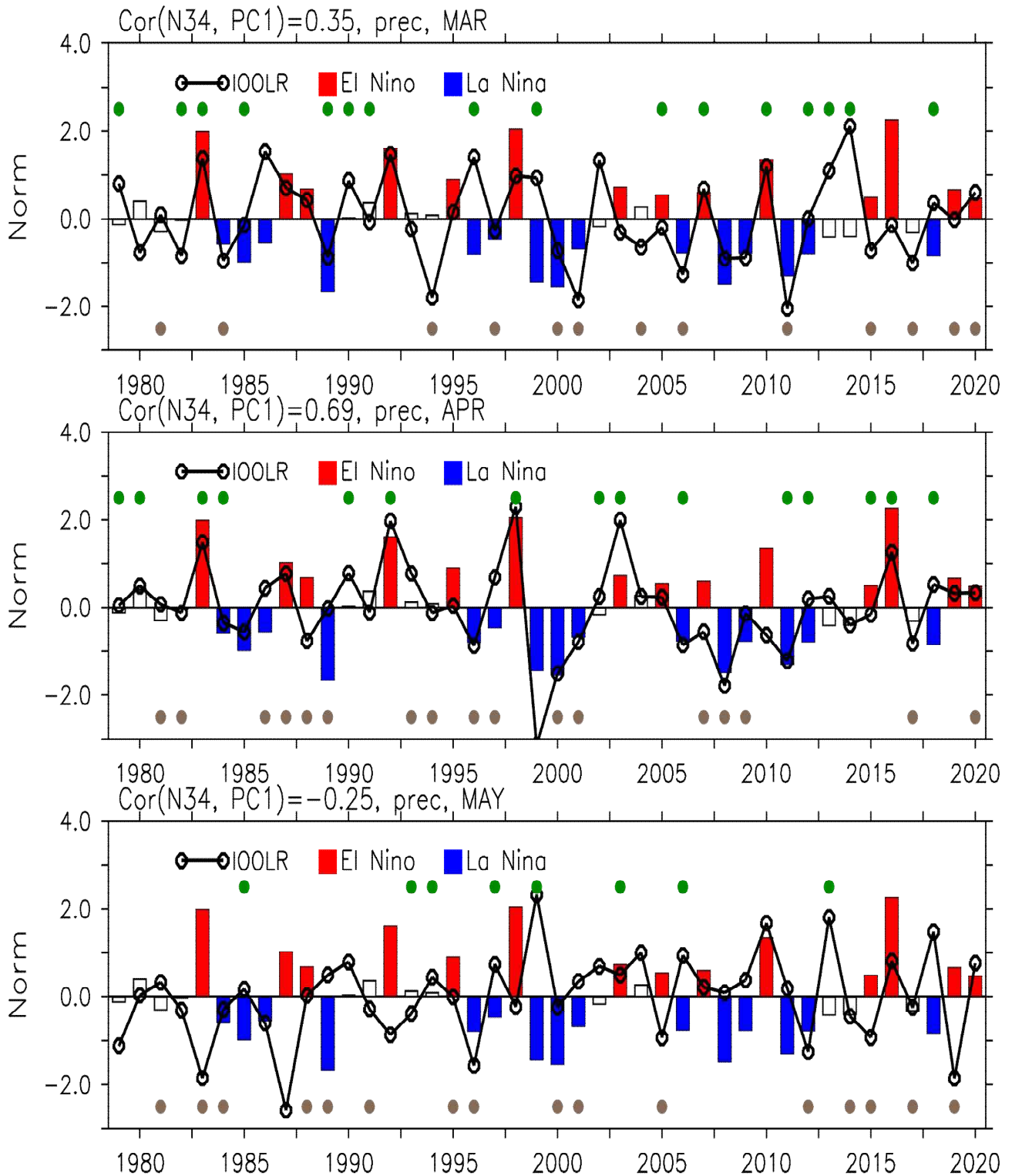


Figure 14. Time series of Indian Ocean OLR index (black) from SVD analysis for Korean monthly-averaged precipitation, Niño 3.4 index (boxed plots) in (upper) March, (middle) April, and (lower) May. Above- and below-normal precipitations indicated with green and brown circles, respectively, are also shown. El Niño (red) and La Niña (blue) events are represented with colored boxes.

나. 여름철 인도양 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향

(1) 연구 배경

여름철 한반도 기후는 동아시아 여름 몬순 시스템에 의해서 주로 영향을 받는데, 여름 몬순 시스템에서 중요한 요소는 북서태평양 고기압이다(예, Wu et al. 2013). 북서 태평양 고기압 변화에 영향을 주는 요소 중 하나로 인도양 축전지 이론(Xie et al. 2009)으로 설명 되는 북인도양 해수면 온도 변화와 이에 대한 대기 로스비 반응이다. 엘니뇨 쇠퇴하는 동안 봄철 동안 남동 인도양에서 고기압성 순환에 의한 해양에서 downwelling 로스비 웨이브가 발생하며, 서진하여 수온약층 깊이가 얕은 남서 인도양에 도달하면, 수온약층이 깊어지고 이 지역에서 해수면 온도는 상승한다. 상승한 해수면 온도는 이 지역으로 수렴하는 바람 편차장을 유도 즉 북인도양에서는 북동풍, 남인도양에서 북서풍 편차가 발달하여 c-모양의 비대칭적 바람 편차장 분포를 갖게된다. 특히 북인도양에서 북서풍 편차는 초여름의 인도양에서 인도 대륙으로 부는 기후 바람장을 감소시켜, 대기로의 잠열방출을 감소시키게 되고 북인도양의 해수면 온도가 상승하게 된다. 북인도양의 해수면 온도 상승은 대기의 온도 상승으로 이어지고, 그 결과 대기 중 적도 캐빈과가 서태평양으로 동진하게 된다. 적도 서태평양에서 에크만 수렴, 아열대 북서 태평양에서는 발산이 나타나 북서태평양의 대류활동을 억제하고 고기압을 발달 시킨다.

이 절에서는 ENSO와 인도양의 상호작용으로 발생된 대기순환장이 여름철 한반도 기온 및 강수에 어떻게 영향을 미치는지 분석하고, 특히 ENSO와 인도양 해수면 온도 편차의 위상별 영향과 기작을 비교할 것이다. 아울러 다른 해양 즉 대서양에서 변동성이 인도양과 ENSO의 상호작용에 의한 영향을 어떻게 강화하는지 분석을 할 것이다.

(2) 자료 및 방법

관측 자료를 위해서 2-가-(2) 절에 설명된 재분석 자료와 한반도 ASOS 자료가 사용되었다. 인도양 축전지 이론을 기반으로 하는 인도양 변동성이 한반도 여름철 기온/강수에 미치는 영향 및 기작을 분석하기 위해서 관련 있는 이벤트 해들을 분류하여 합성장 분석을 수행하였다. 인도양 축전지 기반 이벤트 발생 해들은 겨울철 엘니뇨 발생과 이듬해 봄철 인도양 SST 상승/하강, 겨울철 라니냐 발생과 이듬해 봄철 인도양 SST 상승/하강을 기준으로 선정되었다. 여기서 엘니뇨 라니냐 해들은 12월에서 2월 평균된 Niño 3.4 SST 지수가 0.5° 보다 클 때와 -0.5° 보다 작을 때로 각각 정의하였다. 분류된 엘니뇨와 라니냐 해들 중 봄철 (3-5월 평균) 인도양 SST 증가 혹은 하강이 있는 해들을 분류하였다. 이를 위해서 열대 인도양 영역에서 평균된 SST 편차가 1991-2020년 기간에서 계산된 표준편차의 0.5를 곱한 값을 기준으로 하였다.

아울러 북서태평양 고기압 발달에서 여름철 (6-8월 평균) 열대 대서양 SST 변동의 기여를 평가하기 위해서 열대 대서양 영역 평균된 SST의 표준편차에 0.5를 곱한 값을 기준으로 열대 대서양 SST 변동 관련 해들을 분류하였다. 합성장 분석을 위해서 위에서 설명된 분류 기준에 의해서 선택된 해들은 Table 1에 정리해 두었다.

Table 1. Years classified for a composite analysis

Events	Years
El Niño, (+) MAM TIO SSTA	1958, 1964, 1969, 1973, 1983, 1987, 1988, 1998, 2003, 2010, 2016, 2019, 2020
El Niño, (-) MAM TIO SSTA	N/A
La Nina, (+) MAM TIO SSTA	1957
La Nina, (-) MAM TIO SSTA	1955, 1956, 1965, 1968, 1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1986, 1989, 1996, 1999, 2000, 2008, 2009, 2011, 2012, 2018
El Niño, (+) MAM IO SSTA, (+) JJA TAO SSTA	1973, 1987, 1988, 1998, 2010, 2016
El Niño, (+) MAM IO SSTA, (-) JJA TAO SSTA	1958, 1964, 1983, 2019
La Nina, (-) MAM IO SSTA, (+) JJA TAO SSTA	1968, 1974, 1984, 1986, 1989, 1996, 1999, 2008
La Nina, (-) MAM IO SSTA, (-) JJA TAO SSTA	1955, 1965, 1976, 2000, 2012

엘니뇨이후 봄철 인도양 승온 (이하 El Niño-(+)TIO) 이벤트는 총 13개의 해 동안 발생하였고, 엘니뇨 이후 봄철 인도양 하강이 있는 이벤트는 1950년 이후 한번도 발생하지 않았다. 라니냐 이후 봄철 인도양 승온 이벤트는 1957년 한번 발생 하였고, 라니냐 이후 봄철 인도양 하강 (이하 La Nina-(-)TIO) 이벤트는 20개의 해에서 발생하였다. 그러므로 합성장 분석은 El Niño-(+)TIO와 La Nina-(-)TIO 이벤트를 중심으로 수행하였으며, 이들 이벤트 중 여름철 열대 대서양 SST 편차가 양을 값을 가질 때는 전자의 경우 6개의 해에 해당하며, 후자의 경우 8개의 해에 해당하였다. 그리고 열대 대서양 SST 편차가 음의 값을 가질 때는 각각 4개와 5개로 상대적으로 이벤트 수가 적었다.

(3) 인도양 변동성이 한반도 여름철 기후에 미치는 영향

Figure 15와 16의 좌측 그림들은 Table 1의 El Niño-(+)TIO의 경우에 대한 엘니뇨 쇠퇴기의 6월부터 8월달까지의 해수면 온도, 바람, 해면 기압 편차장에 대한 합성장 분석을 보여준다. 엘니뇨가 쇠퇴 하는 동안 6월부터 양의 해수면 온도 편차가 있고 북서태평양 고기압 편차는 6월에 필리핀 해를 중심으로 발달하여 한반도 보다 상당히 아래 위치해 있고 남동풍 혹은 동풍의 영향을 받고, 7월은 남중국해에 중심을 두고 고기압 서편으로 고온 다습한 남서풍 공기가 한반도 남쪽에 유입되고, 8월은 조금 더 북상하여 한반도 북쪽으로 남서풍 공기가 유입된다. 6-8월의 고기압 남쪽으로 서 적도 태평양에서 동풍 편차에 의한 동진하는 해양 upwelling 궤반 파동 때문에 라니냐의 발달에 기여하게 된다.

위와 같은 한반도 주변 대기 순환장은 한반도 6-8월에 기온과 강수 발생에 영향을 주었다. 즉, 6월 남동풍 및 동풍의 영향으로 한반도 기온은 평년보다 낮은 경향, 강수는 평년과 비슷한 수준의 경향을 보였지만, 상대적으로 우세한 경향은 잘 나타나지 않았다 (Table 2). 7월은 고온 다습한 남서풍 편차의 영향으로 한반도의 강수는 평년 보다 많은 경향이 우세하고, 강수의 증가로 구름에 의한 일사량이 감소하여 기온은 평년과 비슷하거나 낮은 경향이 우세하였다. 8월은 고기압이 좀더 한반도 북편으로 이동하여 기온은 높은 경향, 강수는 평년보다 작은 경향을 보였다.

Figure 15와 16의 우측 그림들에서 보여주듯이 반대 위상인 라니냐가 쇠퇴하는(즉 La Nina(-)TIO의 경우들의 합성장) 동안 북서태평양 저기압 발달까지 전개 과정이 다소 다른 모습을 보인다. 6월 인도양 에서는 인도로 향하는 c-모양의 남인도양에서 남동풍, 북인도양에서 남서풍 편차가 존재하고, 열대 중앙-동 태평양에서는 엘니뇨 보다 상대적으로 오래 지속하는 라니냐 관련 음의 해수면 온도 편차가 존재하며, 관련하여 서적도 태평양에서 약한 동풍 편차와 고기압성 순환 편차가 나타난다. 아울러 북인도양 음의 해수면 온도 편차에 대한 대기 켈빈 반응관련 저기압성 순환 편차가 필리핀해 중심으로 발달하기 시작하였다. 한반도를 향하여 약한 남동풍 편차가 존재 하였다. 이후 7월에는 저기압성 순환편차가 남 중국해에 중심을 두고 더 강화되며, 한반도는 남동풍 편차의 영향을 받게된다. 8월에는 저기압성 순환 편차는 사라지고, 열대 서태평양에 동풍 편차 및 시베리아 지역에 상당히 넓게 발달하는 저기압성 순환 편차가 보이지만, 한반도 주변 순환장은 유의한 수준의 분포가 나타나지 않았다. 엘니뇨 보다 상대적으로 긴 라니냐의 지속 기간 및 약한 북서태평양에서의 저기압성 순환 편차에 대한 원인은 엘니뇨 보다 라니냐 발생 위치가 좀더 서쪽으로 위치해 있어서, 서태평양에서 동풍 편차가 강하게 발달할 수 있고, 라니냐의 쇠퇴에 기여하는 인도양 음의 해수면 온도 편차에 대한 대기 켈빈 파동 관련 서풍 편차의 영향을 능가하게 된다 (Okumura and Deser 2010).

La Nina(-)TIO의 경우에 대한 한반도 기온 강수 경향을 보면(Table 3), 남동풍의 영향을 받는 6-7월에는 기온에 대하여 평년이거나 낮은 경향, 그리고 강수는 6월은 평년보다 많은 경향, 7월은 우세한 경향이 나타나지 않았다. 특히 7월은 보통 장마가 한창인 시기로서 평년보다 높은 수준의 기준값이 다른 달보다 크다는 점을 고려해야 한다. 평년보다 낮았던 6개의 해들 중 4개의 해에서 200mm 이상의 강수를 기록하였다. 한반도 주변에 유의한 대기순환장 특징을 보이지 않은 8월은 한반도 기온 강수에 대하여 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다.

위에서 설명한 엘니뇨와 라니냐 쇠퇴기 동안 인도양, 서태평양에서 대기, 해양의 비선형적인 발달 특징은 열대 인도양에서 영역 평균된 해수면 온도 편차, Niño 3.4 지수, 북서태평양에서 영역 평균된 해면 기압 편차의 ENSO 발달 시기부터 이후 쇠퇴하는 시기까지 합성장 시계열 분석에서 분명하게 확인할 수 있다 (Figure 17). 여름철을 지나 엘니뇨가 발달 할 때, 가을철 즈음에 열대 인도양 양의 해수면 온도 편차도 급속히 증가하기 시작하고, 엘니뇨의 최성기 겨울철 이후 3-4개월 지연되어 이듬해 4월 인도양 해수면 편차가 최성기에 도달한다. 북서태평양에서 엘니뇨가 발달하는 여름에 대기의 로스비 반응 관련 저기압성 편차가 나타나고, 이후 저기압성 편차의 원편으로 한랭이류 등의 원인으로 고기압성 편차가 발달하고, 이듬해 4월까지 지속하다가 이후 6월까지 감소한다. 위에서 언급한 인도양 축전지 이론에 의해서 7-8월 북서태평양 고기압 편차가 다시 발달한다. 라니냐의 경우 라니냐가 발달하는 여름에 로스비 반응

관련 고기압성 순환 편차가 존재하고 가을을 지나 고기압성 순환 편차 원편으로 온난 이류 등에 의하여 저기압성 순환 편차가 증가하고, 열대 인도양의 음의 해수면 온도 편차도 역시 증가한다. 라니냐 최성기 이후 3-4개월 이후 인도양 음의 해수면 온도 편차가 최성기에 도달하고, 북서태평양 저기압 편차는 다시 증가하는 것이 없이 지속적으로 감소하였다.

그런데 Figure 15에서 주목할 만한 것은 열대 대서양에서 해수면 온도 편차 전개 방식이다. 6월 북대서양 음, 적도 대서양 양의 해수면 온도 편차는 음의 대서양 남북 모드 (AMM, Atlantic Meridional Mode; Chiang and Vimont 2004)와 유사한 분포를 보이며, 바람장은 북대서양의 음의 해수면 온도 편차 지역에서 열대 대서양의 양의 해수면 온도 편차 지역으로 반시계 방향으로 흘러 들어가는 모습을 보인다. 적도 대서양에서 서풍 편차는 수온약층을 깊게 하고 해수면 온도를 더 상승하게 하는 양의 되먹임 기작이 작동하였으며 (Dippe et al. 2019), 이후 적도 대서양 해수면 온도는 더욱 강화된다. 여름철 열대 대서양 해수면 온도 편차의 중앙 열대 태평양에서 바람장에 대한 영향을 주제로 하는 이전 연구들이 많이 존재한다 (Keenlyside et al. 2013; Polo et al. 2015; Cai et al. 2019). 특히, 열대 대서양에서 양의 해수면 온도 편차는 상승 기류를 발생시키고, 열대 중앙 태평양에서 하강 기류가 존재하여, 이는 서태평양에 동풍 편차 유도 및 북서 태평양 고기압 발달에 기여할 수 있다. 다음 절에서 여름철 대서양 해수면 온도의 역할을 살펴볼 것이다.

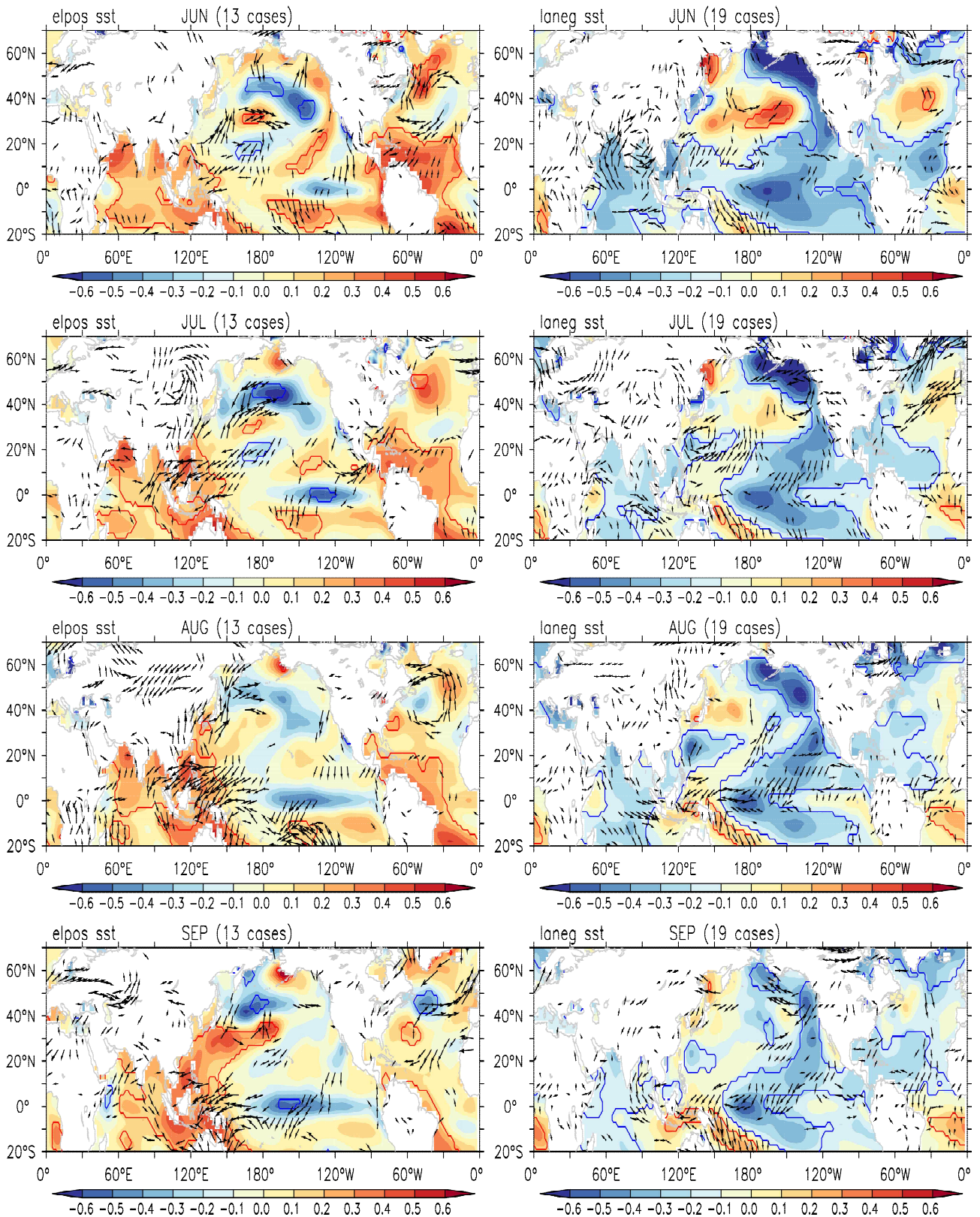


Figure 15. Composite patterns of SST (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (left panels) the preceding winter El Niño and subsequent tropical IO warming and (right) the preceding winter La Niña and subsequent tropical IO cooling. Vectors and SST anomalies, respectively, that are significant at 90 % level are only shown and indicated with blue and red contours.

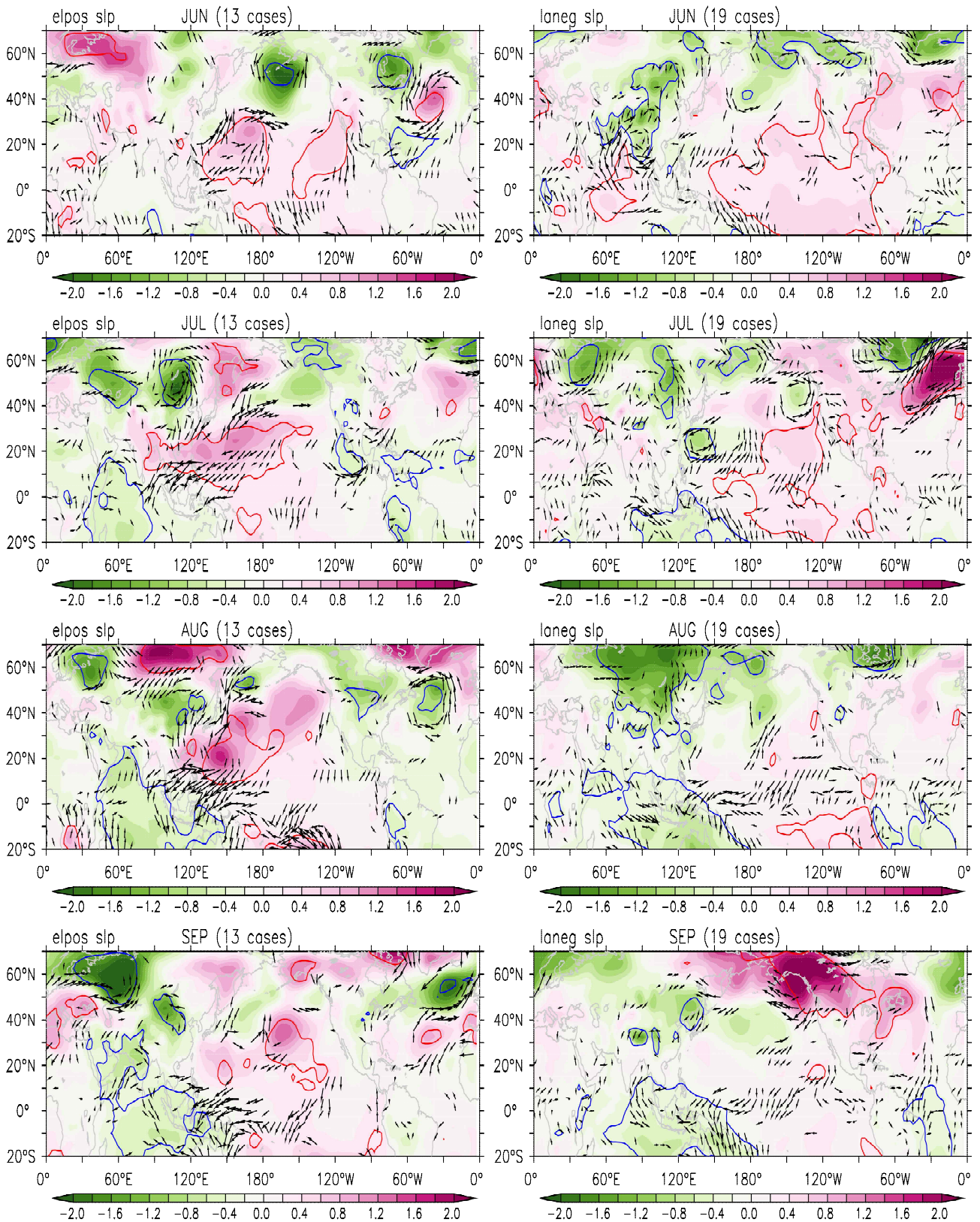


Figure 16. Composite patterns of SLP (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (left panels) the preceding winter El Niño and subsequent tropical IO warming and (right) the preceding winter La Nina and subsequent tropical IO cooling. Vectors and SLP anomalies that are significant at 90 % level are only shown and indicated with blue and red contours, respectively.

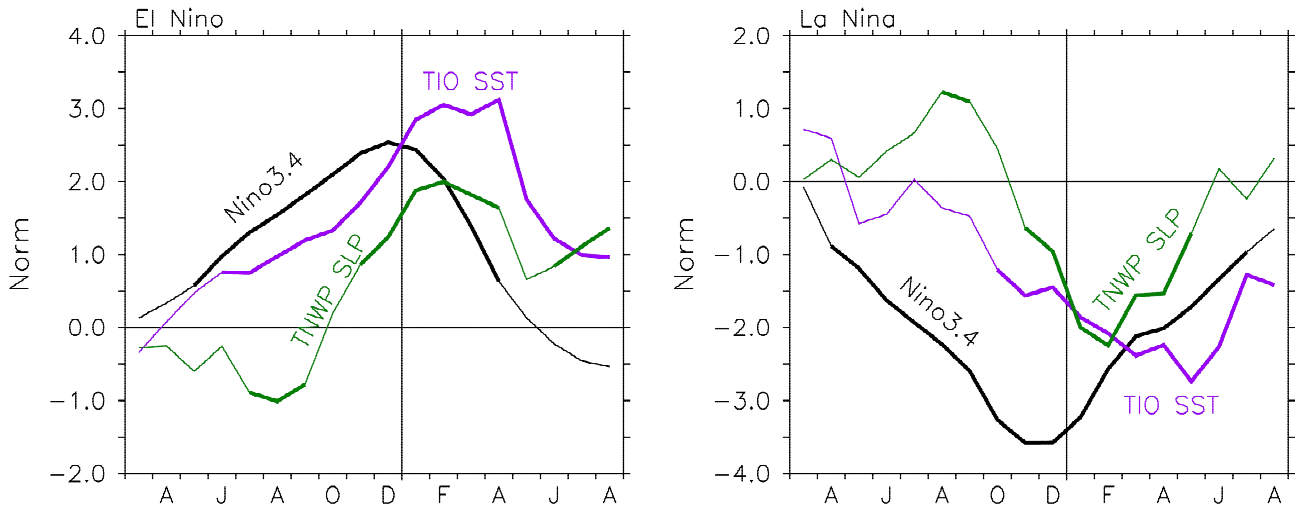


Figure 17. Evolution of SST anomalies in the Tropical IO (TIO) and Niño 3.4 regions and zonal wind anomalies in the Northwestern Pacific (TNWP) region averaged for El Niño and La Niña events. Thick lines denote the statistically-significant values at 90% level according to student t-test.

Table 2. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the El Niño-(+)/TIO events. Red (blue) shades indicate the above (below) normal temperature and green (brown) shades indicate the above (below) normal precipitation.

year	Jun	Jul	Aug	year	Jun	Jul	Aug
1973	-0.7	1.9	1.1	1973	99.8	128.2	149.4
1983	-0.4	-1.1	0.5	1983	109.9	268.9	184.3
1987	-0.2	-0.8	-0.8	1987	139.7	464.3	451.3
1988	0	-0.6	0.1	1988	106.6	334.7	94.1
1998	-1.4	-0.6	-0.4	1998	274.9	274	474.5
2003	-0.7	-2.3	-1.5	2003	188.9	472.5	339.5
2010	0.8	0.6	1.5	2010	60.1	258	375.3
2016	0.8	0.6	1.4	2016	66.8	309.7	78.2
2019	-0.2	0.1	0.9	2019	148.3	225.8	136.4
2020	1.3	-2.1	1.3	2020	184.2	427.7	420.8

	평년보다 높음
	평년보다 낮음

	평년보다 많음
	평년보다 적음

Table 3. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the La Nina-(-)TIO events. Red (blue) shades indicate the above (below) normal temperature and green (brown) shades indicate the above (below) normal precipitation.

year	Jun	Jul	Aug	year	Jun	Jul	Aug
1974	-1.7	-2.3	-0.1	1974	110.5	396.2	176.2
1975	-0.8	0.2	0.9	1975	109.6	357.3	113.9
1976	-1	-1.9	-0.8	1976	122.8	103.4	347.2
1984	0.3	0.2	1.3	1984	165.6	289.3	235.6
1985	-0.7	0.6	1.1	1985	212.4	219.6	301.2
1986	-0.4	-1.7	-0.5	1986	230.1	219.2	233
1989	-1.3	-0.8	-0.5	1989	188.2	377.5	220.8
1996	-0.5	-0.7	0	1996	302.8	221.9	116.2
1999	0.1	-0.9	-0.8	1999	168.9	287.3	360.9
2000	0	0.8	0.1	2000	166.5	245.4	392.1
2008	-1.1	1.3	-0.6	2008	186.9	246.2	191.1
2009	0.3	-1.1	-0.8	2009	132.2	498.8	152.6
2011	0.4	0.3	-0.2	2011	285.3	498.1	284.8
2012	0.5	0.6	1.1	2012	76.2	298.8	405.2
2018	0.7	2	2	2018	137.5	178.9	304.3

	평년보다 높음
	평년보다 낮음

	평년보다 많음
	평년보다 적음

(4) 대서양-인도양-태평양 변동성의 상호작용이 한반도 여름철 기후에 미치는 영향

인도양-태평양-대서양 상호작용을 분석하기 위해서 Table 1에서 나열하였듯이, El Niño-(+)TIO와 La Nina-(-)TIO 경우에 대하여 여름철 열대 대서양 해수면 온도가 양의 편차 ((+)TAO) 일 때 (Figure 18a, 19a)와 음의 편차((-)TAO) 일때 (Figure 18b, 19b)를 구분하여 합성장 분석을 수행 하였다.

먼저 El Niño-(+)TIO-(+)TAO의 경우, 6월에는 열대 대서양 남과 북 지역에 전반적으로 양의 해수면 온도 편차가 존재 하였고, 7월부터 적도 대서양을 중심으로 양의 해수면 온도 편차가 유지되었다. 북인도양 양의 해수면 온도 편차에 대한 대기반응 관련 (즉 대기 켈빈 파동) 북서 태평양에서 6월을 지나 7월에 고기압성 순환 편차가 강화되고, 그 고기압성 순환이 이전 절에서 설명한 것처럼 적도 대서양에서 양의 해수면 온도 편차와 관련한 중앙 열대 태평양에서 하강 기류에 의해서 유도된 것으로 보인다. 이는 위의 합성장의 적도에서 남북 평균된 해수면 온도, 하층 바람, 500hPa 오메가 편차장의 시간-경도 분포를 보여주는 Figure 20a 에서 확인 할 수 있다. 엘니뇨가 쇠퇴하는 동안 봄철에 적도 대서양에서 하강 기류와 양의 해수면 온도 편차가 나타나고 6월 이후 해수면 온도 편차가 다소 증가하고, 이후 상승 기류가 나타나고, 동시에 중앙 태평양에서 하강 기류가 나타나고 서태평양에서 동풍 편차가 강화되는 경향을 보인다. 이 때문에 동태평양에서 라니냐 발달의 경향이 강하게 나타난다.

위와 같은 상황은 El Niño-(+)TIO-(-)TAO 경우 (Figure 18b, 20b), 열대 대서양에서 양의 해수면 온도 편차의 경우보다 서 적도 태평양에서 약한 동풍 편차와 북서 태평양에서 약한 고기압성 순환 편차가 나타났다. 약한 동풍 편차 관련하여 엘니뇨의 쇠퇴가 다소 지연되고, 라니냐 발달 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

La Nina-(-)TIO-(+)TAO 경우(Figure 19a)는 먼저 북 열대 대서양에서 음의 해수면 온도 편차, 적도 지역에서 양의 해수면 온도 편차의 남북 방향의 쌍극자 패턴인 음의 AMM 패턴이 더욱 분명하게 보인다. 태평양에서는 남중국해를 중심으로 하는 저기압성 순환 편차 패턴이 6-8월 내내 존재 한다. 이 저기압성 순환 편차 북쪽으로 한반도는 동풍의 영향을 받는다. 서 적도 태평양에서는 7월부터 동풍 편차가 다시 발달하기 시작하고, 8월에는 더 강화되어 북서태평양에서 저기압성 순환 편차를 약화시키면서, 북으로 밀어올리는 역할을 하였다. 7월 적도 태평양에서 다시 발달 하기 시작하는 동풍 편차의 원인을 Figure 21a의 분석을 통해서 찾을 수 있다. 라니냐가 쇠퇴하는 동안 중앙 태평양에서 -0.5°C 이하의 음의 해수면 온도 편차가 5-6월 까지 다른 태평양 지역보다 상대적으로 오래 지속되고, 이후 감소되며, 서태평양에서 동풍 편차는 4월 까지 유지되다가 거의 평년 수준의 값을 보이다가 7월부터 다시 발달하기 시작한다. 이 때문에 서-중앙 태평양에서 약한 음의 해수면 온도 편차가 계속 유지되었다. 7월 이후 서태평양에서 동풍 편차는 열대 대서양에서 여름철 양의 해수면 온도 편차와 관련이 있다. 즉 서태평양에서 동풍 편차가 사라지는 시점인 3-4월 이후 열대 대서양 동쪽으로 수렴하는 바람 편차 때문에 동대서양에서 5월 이후 해수면 온도가 증가하고, 동일지역에 6-8월 상승 기류 및 중앙 태평양에서 하강기류를 유도하였으며, 이는 서태평양에서 동풍 편차 발달에 기여하였다.

La Nina-(-)TIO-(-)TAO 경우(Figure 19b)는 위의 경우와 달리 라니냐 쇠퇴 후 여름철 중앙 태평양에서 음의 해수면 온도 편차가 나타나지 않고 오히려 엘니뇨가 발달하는 경향을 보인다 (그러나 통계적으로 90% 수준에서 유의하지 않음). 열대 대서양에서는 음의 해수면 온도 편차와 하강 기류 편차 패턴이 라니냐가 쇠퇴하는 봄철부터 보이지만, 중앙 태평양에서 상승기류와의 연관성은 찾기 어렵다(Figure 21b). 그리고 북서태평양에서 저기압성 순환 편차는 약하게 7월 까지 보이지만, 이후 사라져 버린다. 이 남중국해를 중심으로하는 약한 저기압성 편차는 한반도에 6-7월 남동풍 편차에 영향을 받도록 기여하였다.

위와 같은 대기순환장의 특징 아래서 한반도 기온 및 강수 현황에 대하여 Table 3에서 정리된 것처럼 나열하였다. 여기서 1973년 이후에 대하여 음의 열대 대서양 해수면 온도 편차를 갖는 경우가 많지 않아서, El Niño-(+)TIO-(+)TAO (Table 4)와 La Nina-(-)TIO-(+)TAO (Table 5)의 경우만 살펴 보았다. 전자의 경우 6월 기온과 강수에 대하여 뚜렷한 경향성을 보이지 않는 반면에 후자에 대하여 6월 기온은 낮은 경향, 강수는 많은 경향을 보였다. El Niño-(+)TIO-(+)TAO에 대하여 7월은 평년 범위의 기온, 50% 이상의 해에서 강수가 평년보다 많았고, 8월 기온과 강수 모두 평년 보다 높거나 많았다. La Nina-(-)TIO-(+)TAO의 경우, 7월은 기온은 평년 보다 낮은 경향을 나타내었고, 강수는 평년 수준이었던 해가 더 많았고, 8월은 기온은 평년 수준의 경향성을 보였고, 강수는 평년보다 적을 확률이 더 높았다.

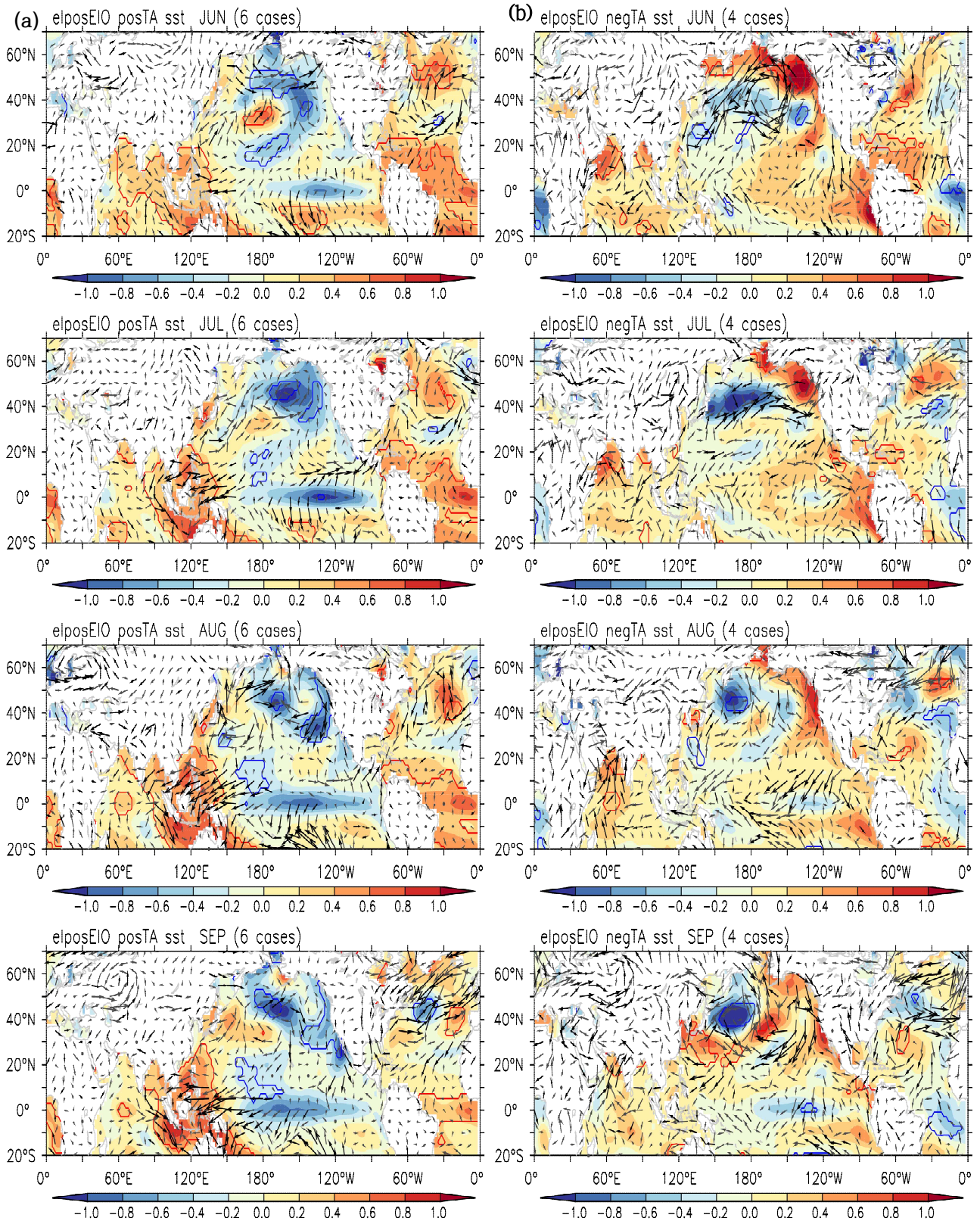


Figure 18. Composite patterns of SST (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (a) the preceding winter El Niño-subsequent spring tropical IO-summer tropical Atlantic Ocean (TAO) warming and (b) the preceding winter El Niño-subsequent tropical IO warming-TAO cooling. Wind and SST anomalies that are significant at 90 % level are indicated with black vectors and blue and red contours, respectively.

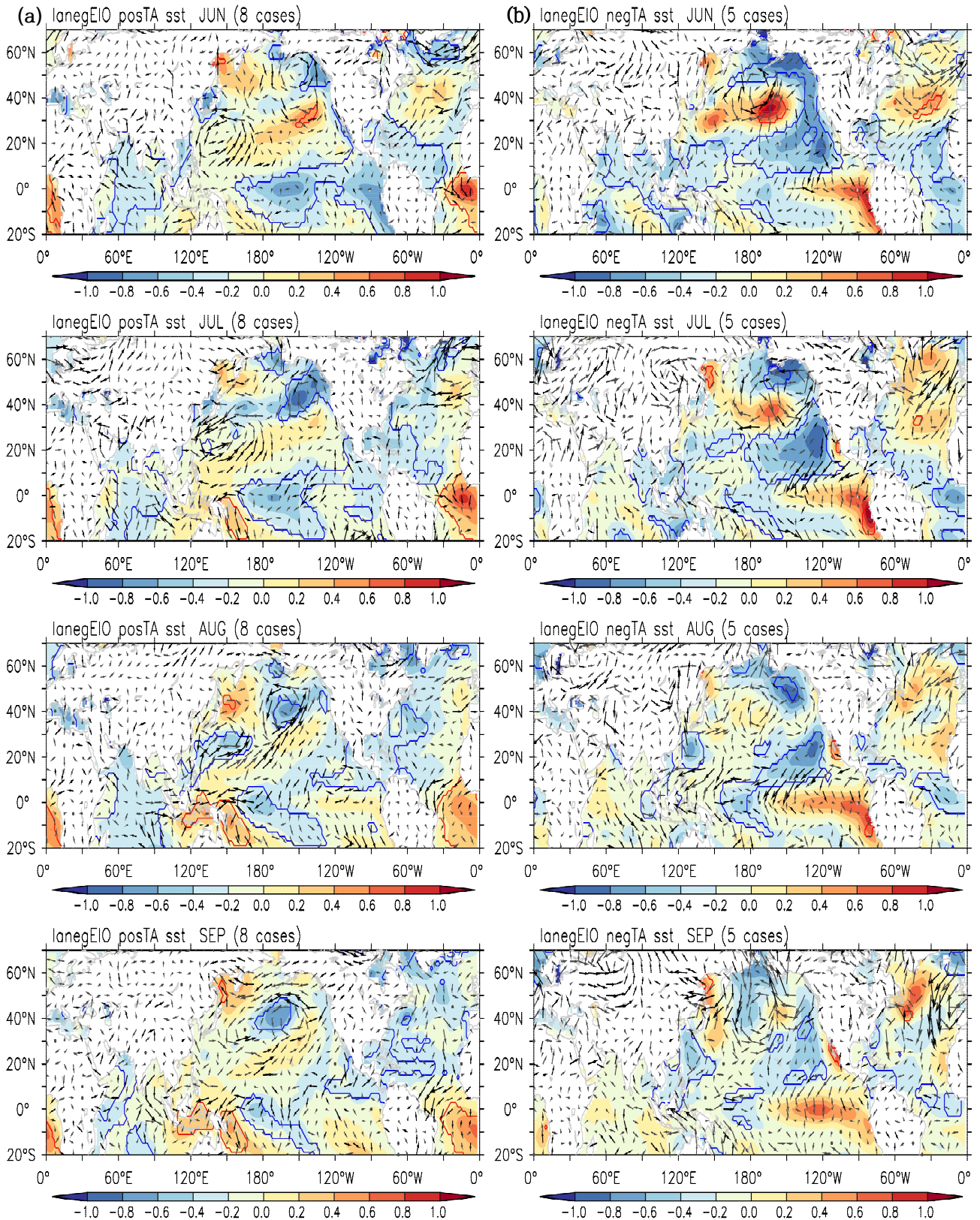


Figure 19. Composite patterns of SST (shades) and surface wind (vectors) anomalies for the events of (a) the preceding winter La Nina-subsequent spring tropical IO cooling-summer tropical Atlantic Ocean (TAO) warming and (b) the preceding winter La Nina-subsequent tropical IO cooling-TAO cooling. Wind and SST anomalies that are significant at 90 % level are indicated with black vectors and blue and red contours, respectively.

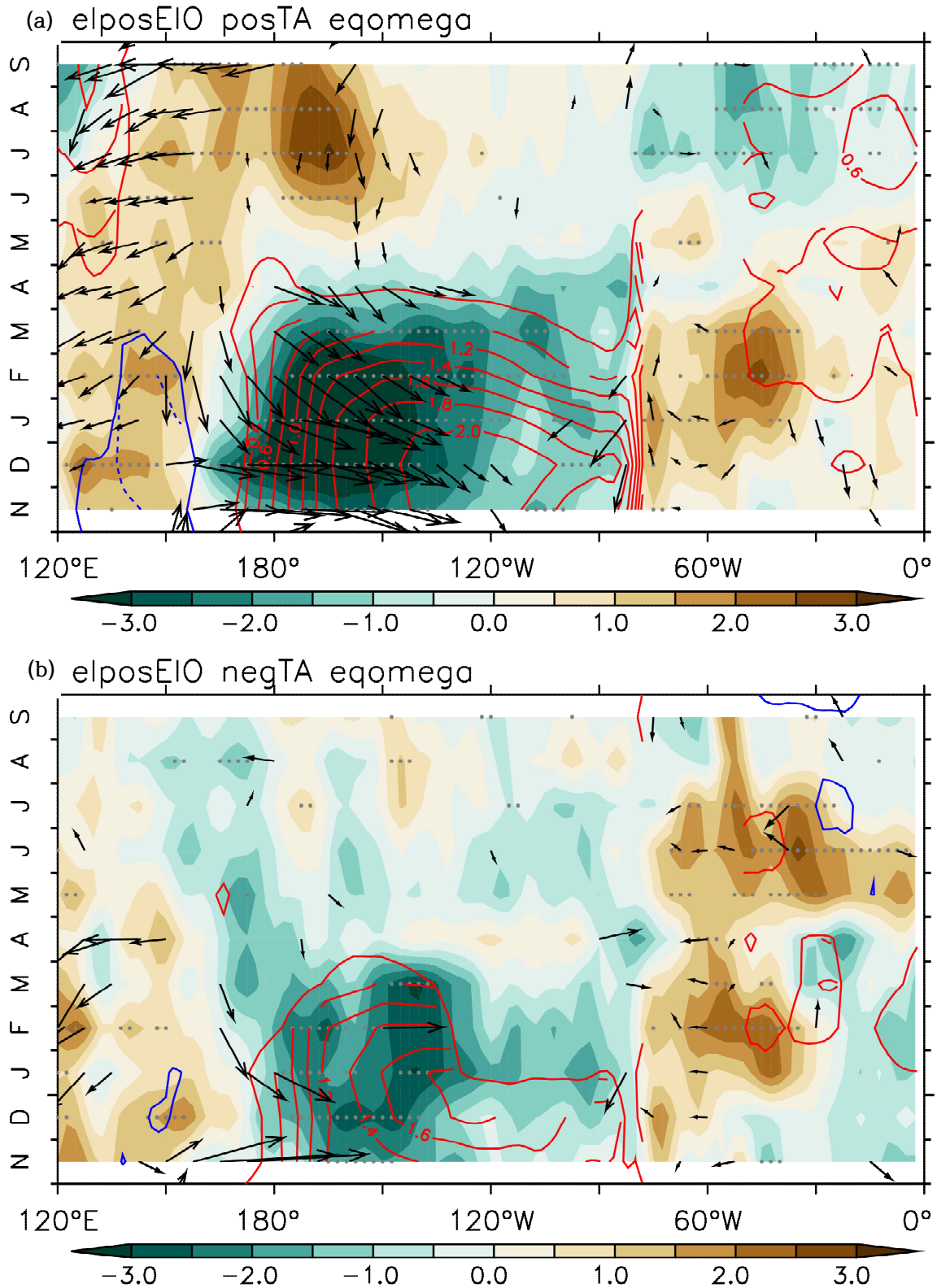


Figure 20. Evolution of SST (contours), wind, and 500hPa omega anomalies along the equator from the composite analysis for (a) the preceding winter El Niño-subsequent spring tropical IO warming-summer TAO warming and (b) the preceding winter El Niño-subsequent spring tropical IO-cooling events. Wind and SST anomalies that are significant at 90 % level are only shown and the significant omega anomalies are indicated with gray dots.

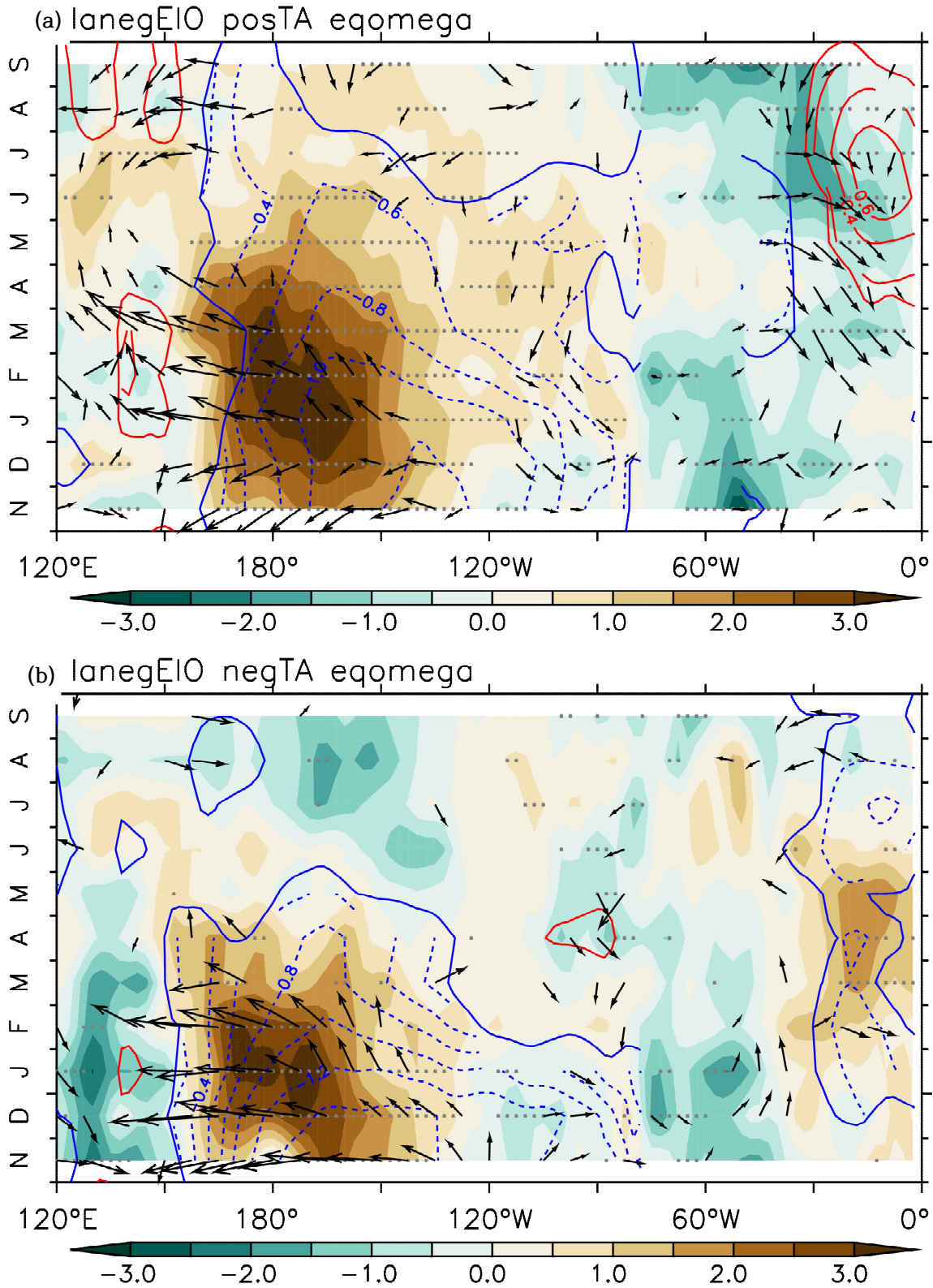


Figure 21. Evolution of SST (contours), wind, and 500hPa omega anomalies along equator from the composite analysis for (a) the preceding winter La Niña-subsequent spring tropical IO cooling–summer TAO warming and (b) the preceding winter La Niña-subsequent spring tropical IO cooling–summer TAO cooling. Wind and SST anomalies that are significant at 90 % level are only shown and the significant omega anomalies are indicated with gray dots.

Table 4. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the El Niño-(+)TIO-(+)TAO events. Red (blue) shades indicate the above (below) normal temperature and green (brown) shades indicate the above (below) normal precipitation.

year	Jun	Jul	Aug	year	Jun	Jul	Aug
1973	-0.7	1.9	1.1	1973	99.8	128.2	149.4
1987	-0.2	-0.8	-0.8	1987	139.7	464.3	451.3
1988	0	-0.6	0.1	1988	106.6	334.7	94.1
1998	-1.4	-0.6	-0.4	1998	274.9	274	474.5
2010	0.8	0.6	1.5	2010	60.1	258	375.3
2016	0.8	0.6	1.4	2016	66.8	309.7	78.2

	평년보다 높음
	평년보다 낮음

	평년보다 많음
	평년보다 적음

Table 5. Lists of (left) surface temperature and (right) precipitation averaged over South Korea (ASOS stations) for years of the La Nina-(-)TIO-(+)TAO events. Red (blue) shades indicate the above (below) normal temperature and green (brown) shades indicate the above (below) normal precipitation.

year	Jun	Jul	Aug	year	Jun	Jul	Aug
1974	-1.7	-2.3	-0.1	1974	110.5	396.2	176.2
1984	0.3	0.2	1.3	1984	165.6	289.3	235.6
1986	-0.4	-1.7	-0.5	1986	230.1	219.2	233
1989	-1.3	-0.8	-0.5	1989	188.2	377.5	220.8
1996	-0.5	-0.7	0	1996	302.8	221.9	116.2
1999	0.1	-0.9	-0.8	1999	168.9	287.3	360.9
2008	-1.1	1.3	-0.6	2008	186.9	246.2	191.1

	평년보다 높음
	평년보다 낮음

	평년보다 많음
	평년보다 적음

(4) 요약 및 결론

이 절에서는 인도양 변동성이 한반도 여름철 기온/강수에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해서 인도양 축전지이론을 기반으로 하여 엘니뇨(라니냐)-봄철 인도양 해수면 온도 상승(하강)을 기준으로 1950년 이후 해들을 분류하여 합성장 분석을 수행 하였다. 엘니뇨가 쇠퇴하는 봄철 인도양 해수면 온도가 상승할 때, 북서 태평양 고기압성 순환 편차가 여름철에 다시 강화되어 8월까지 유지 되었다. 반면에 라니냐가 쇠퇴하는 봄철 인도양 해수면 온도가 하강할 때 북서 태평양 저기압 발달 전개 과정에서 비선형성이 존재하였다. 즉 저기압 발달이 8월까지 유지되는 것이 아니라 약하게 7월까지 유지 되었다. 엘니뇨 발달 뒤 여름철 북서태평양 고기압 발달은 한반도가 남서풍의 영향을 받게 하고, 라니냐 발달 뒤 여름철 북서 태평양에서 저기압 순환 편차는 한반도가 동풍 혹은 남동풍의 영향을 받게 하였다. 위와 같은 대기 순환장의 영향 아래 엘니뇨 발달 이후 7월의 기온은 평년보다 비슷하거나 낮은 경향, 강수는 평년 보다 많은

경향이 우세하였다. 라니냐의 경우, 6-7월 기온은 평년 보다 낮은 경향, 강수는 6월에 평년 보다 많은 경향을 보였다.

여름철 북서 태평양 고기압 발달에서 열대 대서양 변동성의 영향을 고려하기 위해서, 위의 분류된 년도들 중 여름철 열대 대서양 해수면 온도 편차를 기준으로 분류하였다. 라니냐 발달 이후 봄철 인도양 해수면 온도 하강과 여름철 열대 대서양 해수면 온도 상승이 있을 때 북서 태평양에서 저기압성 순환 편차 발달이 8월 까지 유지되었다. 한반도 6-7월 기온은 평년 보다 낮은 경향을 보였고, 열대 대서양 해수면 온도 상승 관련한 서태평양 아열대 고기압 편차가 북서태평양에서 저기압성 순환 편차를 북편으로 이동시켜서, 한반도가 건조한 북동풍의 영향을 받게 되어 강수가 평년과 비슷하거나 평년보다 적었다. 엘니뇨 발달 이후 봄철 인도양 해수면 온도 상승과 여름철 대서양 해수면 온도 상승이 있을 때 북서 태평양 고기압이 더 강화되는 양상을 보였다.

다. 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 인도양-서태평양 지역의 대류 특성 분석

(1) 연구 배경

이 연구는 인도양-서태평양 지역의 대기-해양 변동성이 우리나라 가을철 기후, 특히 가을철 고온 현상에 미치는 영향을 이해하는 것을 목표로 한다. 열대 지역 변동성 중 동아시아 기후에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 엘니뇨-남방진동(ENSO)으로서, 이는 서태평양의 대류를 변화시켜 대기의 Rossby 파동 전파를 통해 동아시아 기후에 영향을 미친다 (Hoskins and Karoly, 1981). 특히, 우리나라 가을철 기온과 강수 변동성은 ENSO와 밀접한 관련성을 가지고 변동하는데, 엘니뇨 (라니냐) 발달 시기에 우리나라 9월 기후는 저온 (고온), 건조 (다습)한 특성이 우세하게 나타나며, 반면 11월 기후는 고온 (저온), 다습 (건조)한 특징이 나타난다 (Son et al., 2014; 2016).

열대 지역 변동성이 동아시아에 영향을 미치는 주요 루트인 서태평양 지역의 대류 변동성은 ENSO의 영향만을 받는 것이 아니다. 인도양의 Indian Ocean Dipole (IOD)를 포함한 변동성과, Madden-Julian Oscillation (MJO)와 같은 열대지역의 다양한 시공간적 변동성 역시 서태평양 대류에 영향을 미치기 때문에 열대 지역 변동성과 동아시아 기후와의 상관관계는 단순히 선형적인 관련성으로 설명되기 어렵다. 그 중 IOD는 서인도양과 동인도양의 해수면 온도 차이로 정의되는 모드로서, 주로 북반구 가을철에 최성기로 발달한다. 이 IOD 역시 동인도양-서태평양의 대류 구조에 영향을 미침으로서, 북서태평양 아열대 고기압 또는 남아시아 고기압을 변화시켜 동아시아 기온, 강수 변동성에 영향을 미친다 (Yuan et al. 2008). 한편, 인도양 변동성과 동아시아 기후를 연결 시켜주는 또 다른 루트로는 Circumglobal teleconnection (CGT)를 들 수 있는데, 이는 북인도양 지역에서 대류 강화 신호가 heat source로 작용하여 유라시아 대륙을 가로지르는 대기 파동 구조를 강화시켜 동아시아 지역까지 영향을 미치는 메커니즘을 의미한다 (Ding and Wang 2005).

이러한 배경을 바탕으로, 이 연구에서는 우리나라 가을철 (9~11월) 고온 현상과 관련된 인도양-서태평양의 대류 활동의 특징을 분석하고자 한다. 통계 분석 방법 중 하나인 Clustering 분석을 적용하여 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 인도양-서태평양 지역의 대류 구조를 세 가지로 분류한 결과, 각각 MJO, ENSO, IOD 등과 같은 열대 지역의 대표 변동 모드들과 밀접하게 관련되어 있음을 확인하였다. 이러한 특성을 바탕으로 우리나라 가을철 현업 기후 예측 및 분석 업무에의 적용 방안을 제시하고자 한다.

(2) 자료와 방법

우리나라 가을철 고온 현상을 정의하기 위해서 기상청에서 제공하는 종관기상관측시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 62개 지점을 평균한 1979년부터 2020년 가을철 (9월~11월) 자료를 사용하였다. 7일 이동평균한 일별 기온 자료에 대하여 1 표준편차 이상인 날이 7일 이상 지속되는 사례를 고온 사례로 정의함으로써 고온 현상이 우리나라에 충분히 영향을 미친 사례를 추출하였다. 만일, 뽑혀진 두 사례 사이에 시간 간격이 7일 이하인 경우

두 사례를 하나로 통합하였다. 이를 통해 총 512일의 고온 날 수가 선정되었고 연속된 날을 하나의 사례로 정의하면 총 39개의 고온 사례로 정리할 수 있다.

가을철 고온 사례와 관련된 대류 구조를 분석하기 위해 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 상향장파복사 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) (Liebmann and Smith, 1996) 자료를 사용하였다. 대규모 순환장을 이해하기 위한 대기 변수의 경우 National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy (NCEP/DOE) Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) 자료를 사용하였다. 일별 해수면 온도 (Sea Surface Temperature; SST)는 NOAA의 Daily Optimum Interpolation SST version 2 (OISST; Reynolds et al., 2002)를 사용하였으며, MJO의 위상과 강도는 Australian Government Bureau of Meteorology (BoM)에서 제공하는 Real time multivariate MJO (RMM) 지수를 사용하였다.

이 연구는 K-mean clustering 분석 방법을 사용하였다. 이 분석 방법은 iterative algorithm을 통해 주어진 자료를 수학적 거리, 즉 유사성을 바탕으로 최적의 분류 방안을 찾는 것을 목표로 한다. 이 연구에서는 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 인도양-서태평양의 대류 특성을 분석하는 것이 목표이기 때문에 39개의 고온 사례의 인도양-서태평양 (30E-160E, 20S-40N) OLR 편차에 대해 clustering 분석을 적용하였다.

Clustering 분석에 있어서 가장 중요한 부분은 몇 개의 cluster로 분석을 수행 할 것인지 미리 정해 주는 과정이다. 자료에서 최적의 cluster 개수를 정하는 다양한 경험적 방법이 제시되어 있는데, 그 중에서도 이 연구에서는 False Discovery Rate (FDR) (Jhonson, 2013)라는 방식을 적용하여 최적의 clustering 개수를 찾았다. 이 방식은 student t-test를 기반으로 하는 p-value를 사용하는데 이 연구에서는 3개의 cluster로 분류하는 것이 최적의 값으로 제시되었다.

(3) 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 열대 인도양-서태평양 지역의 세가지 대류 특성

위에 제시한 바와 같이 이 연구에서는 39개 가을철 고온 사례의 인도양-서태평양 OLR 편차를 3개의 cluster로 분류하였다. 이러한 분류가 실제로 통계적으로 의미 있게 이루어졌는지 먼저 확인하였다. 개별 사례들을 자신이 속한 cluster의 합성장에 공간 projection을 하여 그 계수를 비교해 보았다. Figure 22a는 첫 번째와 두 번째 cluster에 속한 각 사례들을 각각 첫 번째와 두 번째 cluster 합성장에 공간 projection 시킨 계수를 나타낸 그래프이고, 비슷한 방식으로 두 번째와 세 번째, 첫 번째와 세 번째 cluster의 경우 Figures 22b와 22c에 나타내었다. 이 그림에서 확인 할 수 있듯이, 각 cluster에 속한 개별 사례들은 다른 cluster보다 해당 cluster에 높은 공간 projection 계수를 나타냄으로써 3가지 cluster로의 분류가 통계적으로 의미 있음을 제시한다. 그러나 두 번째 cluster에 속한 한 사례는 공간 projection 계수가 0.3 이하로 상대적으로 적으며 뿐만 아니라 두 번째 cluster보다 세 번째 cluster에 projection 계수가 더 높게 나타나는 등 애매한 특성을 보이고 있어 향후 분석에서는 이 사례 (Figure 22에서 별표 표시)를 제외하고 분석하였다. 최종적으로 첫 번째, 두 번째, 세 번째 cluster는 각각 15, 13, 10개의 사례를 포함하게 된다.

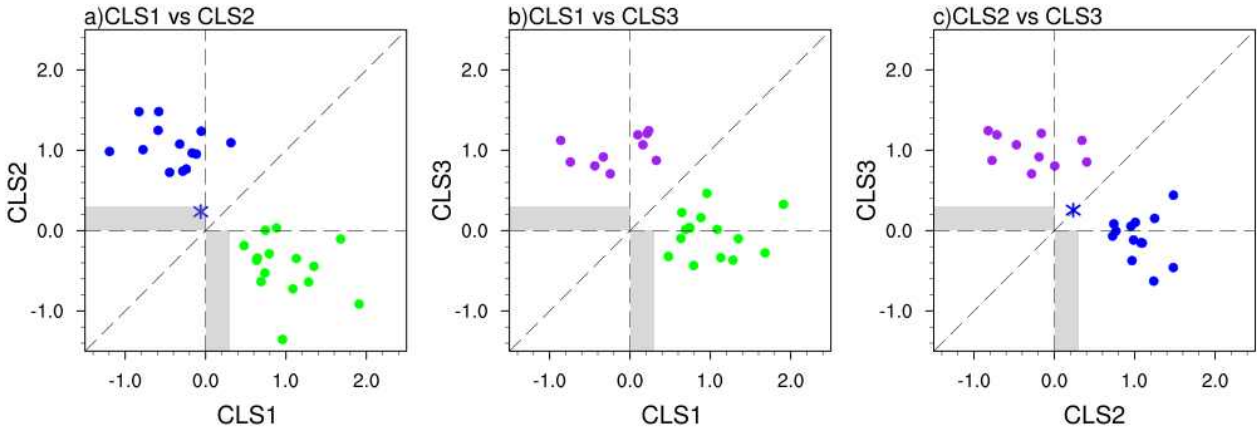


Figure 22. Scatter plots of normalized spatial projection coefficients for each event in the (a)first (green) and second (blue) cluster, (b) first (green) and third (purple) cluster, and (c) second (blue) and third (purple) cluster against the corresponding cluster composite means. The event that does not meet the criteria is designated by asterisk.

Figure 23a는 우리나라 가을철 고온 현상의 대류 구조 중 첫 번째 cluster를 나타낸다. 이는 Maritime Continent 지역부터 열대 동인도양에서 대류가 억제되고 그 북쪽의 북인도양부터 아열대 서태평양까지 대류가 강화되며 다시 동아시아 지역으로 대류가 억제되는 남북 방향의 억제-강화-억제 구조를 나타낸다. 첫 번째 cluster가 발생한 사례는 Figure 23b에 연도-일 matrix로 나타내었는데, 회색 bar로 표시한 것이 이 연구에서 선정한 39개 가을철 고온 사례를 모두 나타내는 것이고, 그 중 첫 번째 cluster로 분류된 사례들을 검정색 bar로 나타내었다. 한편, Figure 22에서 나타낸 분석에서 제외하게 된 한 사례는 diagonal symbol로 Figure 23b에 표시하였다. 이 그림에서 확인 할 수 있듯이 우리나라 가을철 고온 사례는 과거 20년 보다 최근 20년에 더욱 빈번하게 발생하였고 첫 번째 cluster에 속한 15개 사례는 대체로 최근 9월에 빈번하게 나타나는 경향을 보인다.

첫 번째 cluster의 대류 구조가 ENSO, IOD 또는 MJO와 같은 주요 열대 지역 변동성과 어떠한 관련성을 가지는지 살펴보기 위해서 먼저 첫 번째 cluster의 SST 편차 합성도 패턴을 살펴보았다. Figure 23c에서 확인할 수 있듯이 열대 동태평양에 유의한 해수면 온도 편차가 나타나지 않는 것으로 보아 첫 번째 cluster는 ENSO와 밀접한 관련성을 가지지 않는 것으로 보인다. 뿐만 아니라, 서인도양과 동인도양의 해수면 온도 편차 차이로 나타나는 IOD의 패턴도 Figure 23c의 합성도 패턴에서는 나타나지 않는다. 이를 좀 더 자세히 확인해 보기 위해 첫 번째 cluster의 개별 사례 별로 각각 ENSO를 대표하는 NINO3.4 지수 (170W-120W, 5S-5N 평균한 SST 편차)와 IOD 지수 (50E-70E, 10S-10N 평균한 SST 편차와 90E-110E, 10S-0 평균한 SST 편차의 차)를 구해 본 결과 각 사례별로 다양한 특성을 보이며 공통적인 특징을 찾을 수 없었다 (Figure 23d). 따라서 ENSO와 IOD는 첫 번째 cluster의 주요 변동 역학이라고 보기 어렵다.

ENSO나 IOD 이외에 열대 인도양-서태평양 지역의 대류 활동에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소로는 MJO를 생각해 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 첫 번째 cluster 사례의 MJO의 위상과 강도를 살펴보았다. Figure 23f에 MJO 위상별 발생 빈도를 검정 bar로, 그리고 MJO 강

도를 선 그래프로 나타내었는데 그림에서 확인 할 수 있듯이 첫 번째 cluster의 50% 이상의 날들이 MJO 위상 5를 나타낸다. MJO의 강도 역시 위상 5에서 가장 강하게 나타난다. 이 결과는 첫 번째 cluster의 대류 구조가 MJO 위상 5와 밀접하게 관련되어 있음을 의미한다.

다음으로, 이 연구에서는 MJO 위상 5와 관련된 첫 번째 cluster의 대류 구조가 어떻게 우리나라 가을철 고온 현상을 유도하는지 대규모 대기 순환 패턴을 중심으로 살펴보았다. 전반적인 대기 패턴은 Figure 23e에 850 hPa과 200 hPa 지위고도 편차 합성도를 통해 확인 할 수 있다. 동아시아 지역의 주요 대기 구조는 하층과 상층 대기에서 모두 동서방향으로 확장된 고기압성 순환이 동아시아 지역을 중심으로 나타나는 점이다. 이러한 고기압성 순환은 고온 현상을 유도하는 주요 조건임이 잘 알려져 있다 (Black et al., 2004). 또 다른 특징으로는 하층 대기의 저기압성 순환이 인도부터 서태평양까지 확장된 형태로 나타나는데 이는 이 지역의 대류 활동 강화 신호에 대한 반응으로 해석할 수 있다. 또한 서태평양 지역의 저기압성 순환과 동아시아 지역의 고기압성 순환은 아열대 서태평양의 열적 forcing으로 인한 남북 방향의 파동 전파를 암시한다.

첫 번째 cluster와 관련된 대기 순환 구조의 특성을 더욱 자세히 살펴보기 위해 Figure 24에 OLR, 2m 기온, 500 hPa 지위고도장, 850 hPa과 200 hPa의 유선함수 (Stream function)와 wave activity flux를 나타내었다. Wave activity flux의 경우 Takaya and Nakamura (2001) 방식을 적용하였다. 이와 함께 주요 패턴의 진화 과정을 살펴보기 위해 첫 번째 cluster 사례들의 7일 전부터 1일 전까지 평균한 합성도 패턴과 1일 후부터 7일후까지 평균한 합성도 패턴을 Figure 3에 함께 나타내었다. 첫 번째 cluster의 발달 단계에서는 북인도양과 서태평양 지역의 대류활동이 약하게 강화되었으나 이 지역의 대기 반응은 뚜렷하게 나타나지 않는다. 최성기에 들어서 대류 패턴이 더욱 뚜렷해지면서 동인도양에 고기압성 순환과 북인도양-서태평양에 저기압성 순환이 발달하기 시작한다. 이는 열대 대류 활동에 의한 대기 반응으로 해석할 수 있다 (Gill 1980). 인도양-서태평양 지역의 대류 구조는 또한 동아시아 지역으로 Rossby 파동 전파를 유도하여 이 지역 고기압성 순환 형성에 영향을 미친다. 이러한 파동 전파 구조는 850 hPa의 wave activity flux를 통해 더욱 자세히 확인 할 수 있다. 한편, 상층 200 hPa의 주요 패턴으로 30-40N 지역을 중심으로 동-서 방향으로 길게 발달한 고기압성 순환을 들 수 있다. 특히, 이 고기압성 순환은 우리나라까지 확장되어 결과적으로 우리나라는 하층부터 상층까지 barotropic한 고기압성 순환의 영향을 받게 되어 고온 현상이 나타나게 된다. 이 상층의 고기압성 순환은 북인도양 지역의 대류 활동 강화로 인한 보상 반응으로 나타난 것으로 해석된다.

종합하면, 첫 번째 cluster는 MJO 위상 5와 밀접하게 관련되어 우리나라 가을철 고온 현상을 유도하는 대류 구조로서, 하층 대기에는 남-북 방향의 파동 전파를 통해 동아시아 지역으로 고기압성 순환을 유도하고, 상층 대기에서는 동-서 방향으로 확장된 고기압성 순환이 동아시아까지 영향을 미침으로서 우리나라에 고온을 유도하는 메커니즘을 가지고 있다.

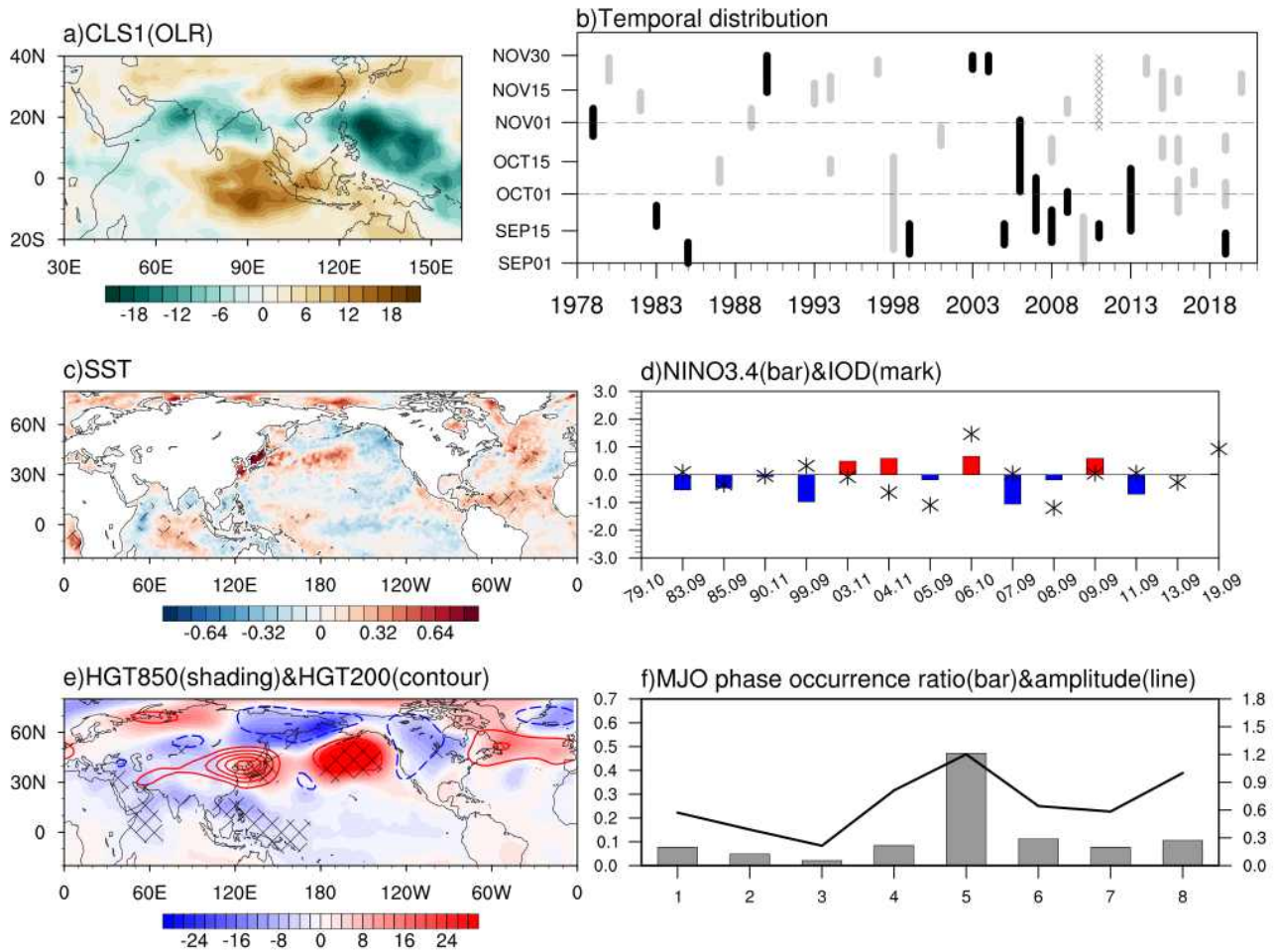


Figure 23. (a) The spatial pattern of the first cluster of OLR anomaly over the Indo-Western Pacific for Korean autumn HTE events. (b) The temporal distribution of 39 HTE events considered and the events that are assigned to the first cluster are designated by black bars while the events that is excluded is designated by diagonal symbol. The anomalous composite of (c) SST and (e) geopotential height at 850 hPa (shading)and 200 hPa (contour) for the first cluster. The statistically significant anomalies at 95% confidence level are indicated by diagonal lines. Niño 3.4 (bar) and IOD (mark) indices for individual event of the first cluster are presented in (d) while the occurrence frequency (black bar) and the amplitude (line) of MJO for 8 different phases for the first cluster are presented in (f).

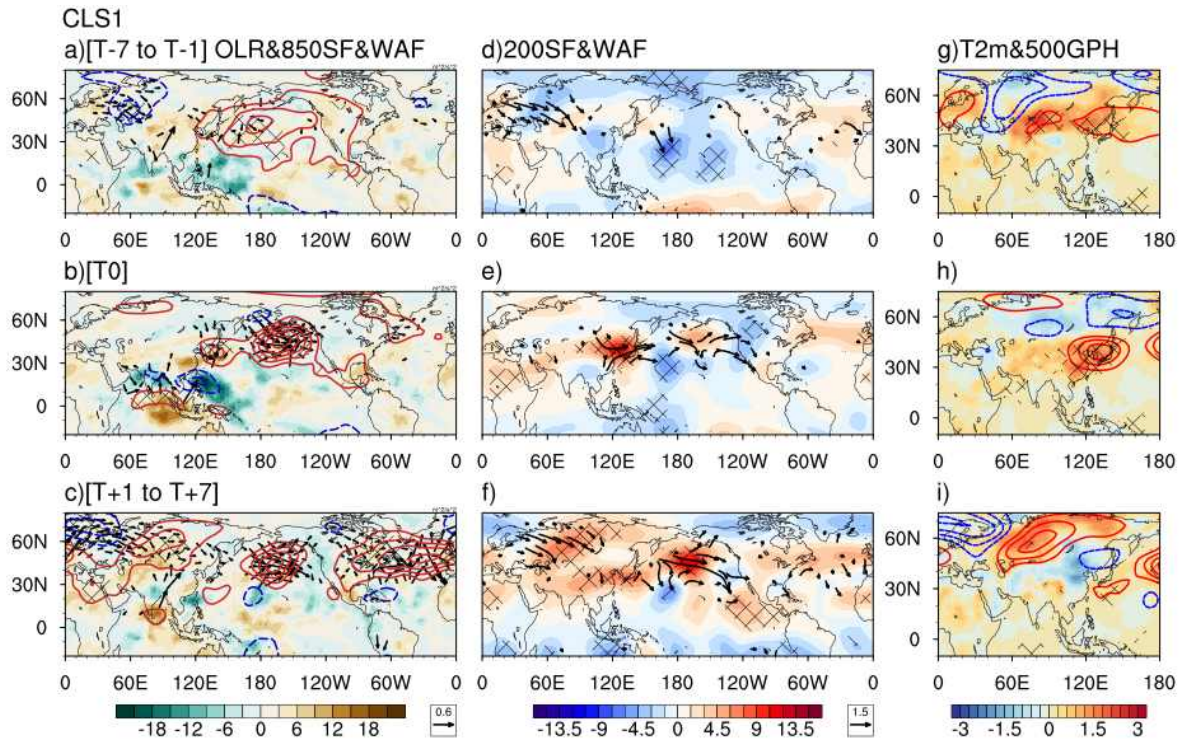


Figure 24. Anomalous composite of (a~c) OLR (shading), stream function (contour) and wave activity flux (vector) at 850hPa, (d~f) stream function (shading) and wave activity flux (vector) at 200hPa, (g~i) 2m air temperature (shading) and geopotential height at 500 hPa (contour) for the first cluster. The 7-day averaged composite maps for the (a,d, and g) before the start day of each CLS1 case and for the (c,f, and i) after the end day of each CLS1 case are presented.

다음으로, 두 번째 cluster의 특징을 살펴보았다. Figure 25b에서 확인 할 수 있듯이 39개 고온 사례 중 두 번째 cluster에 속하는 13개 사례는 전체 분석 기간에 대해 고르게 분포되어 있다. 두 번째 cluster의 대류 구조는 동인도양 지역에서 대류 강화 신호가 나타나고 이 것이 북인도양과 Maritime continent까지 확장된 특징을 보이며 서인도양과 일본 남쪽으로는 약하게 대류가 억제된 특징을 보인다 (Figure 25a). Figure 25c에 나타난 해수면 온도 편차 합성도를 살펴보면 열대 동태평양을 중심으로 음의 해수면 온도 편차가 나타나는 라니냐의 특징을 확인할 수 있다. 개별 사례의 Nino3.4 지수를 살펴보면 대부분의 사례에서 공통적으로 라니냐 상태를 나타내고 있으며, 강한 라니냐 해로 알려진 1998, 2010, 2016년 모두 두 번째 cluster에 속하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 동인도양의 대류 강화 신호는 라니냐가 음의 IOD와 coupled 되어서 나타나는 가을철의 전형적인 특징으로 알려져 있다 (Ham et al., 2017). 비록, SST 합성 패턴에서는 서인도양과 동인도양의 해수면 온도 편차 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않지만, 개별 사례의 IOD 지수를 살펴보면 대체적으로 음의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 라니냐가 발달하면 늦여름부터 초가을까지 아열대 북서태평양 지역으로 고기압성 순환이 나타나면서 동아시아 지역으로 남풍 기류가 유입되어 고온, 다습한 특징이 나타난다. 두 번째 cluster의 MJO 위상과 강도도 함께 살펴보았는데, Figure 25f에 나타난 바와 같이 MJO 위상 6과 7은 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 실제로 MJO 위상 6과 7은 인도양 지역에 더 대류가 억제되는 구조로서, 두 번째 cluster에 나타난 패턴과는 정 반대의 패턴이다.

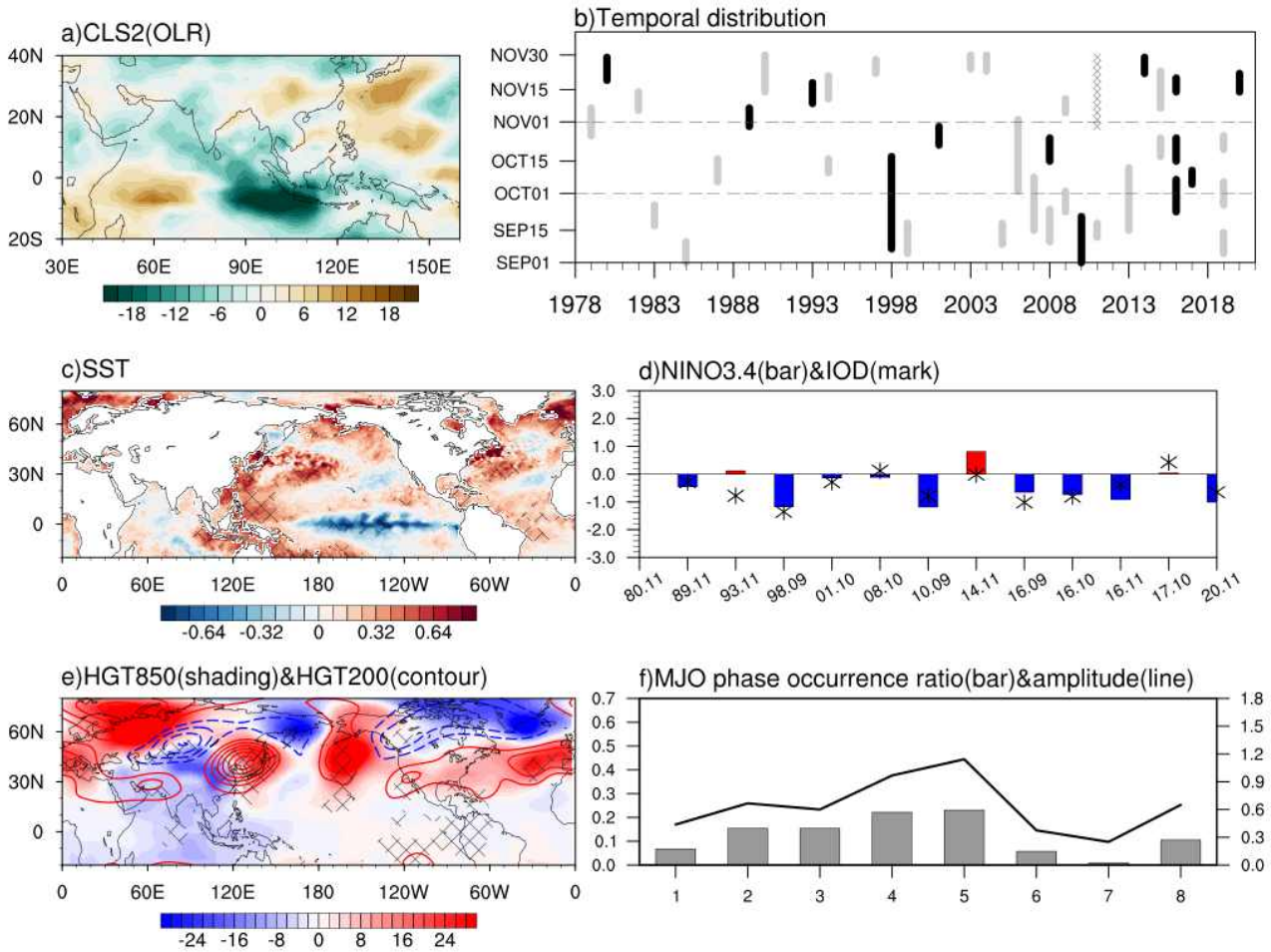


Figure 25. Same figure as in Figure 23 but for the second cluster.

두 번째 cluster의 대류 구조와 관련된 대기 순환 구조는 Figure 25e에서 확인할 수 있다. 특히 200 hPa 상층 대기에서 특징적인 부분은 유라시아 대륙을 따라 나타나는 뚜렷한 대기 파동 구조인데 북유럽부터 중앙아시아 그리고 동아시아까지 고기압, 저기압, 고기압성 순환의 파동 구조가 나타나고 이는 북대서양 지역의 North Atlantic Oscillation(NAO)과 관련되어 나타난다. 두 번째 cluster와 관련된 대기 순환구조의 특징을 좀 더 자세히 확인하기 위해서 Figure 26에 진화 과정을 포함한 합성도 패턴을 나타내었다. 동인도양의 대류 강화 신호와 서태평양부터 중태평양까지 대류 억제 신호는 발달 단계에서부터 확인할 수 있으나 그와 관련된 대기 순환 구조의 특징은 뚜렷하게 나타나지 않는다. 반면에 특징적인 대기 순환 구조는 북대서양과 카라-바렌츠해 그리고 우랄산맥 동쪽을 지나는 파동 구조로서 이는 상, 하층 대기에 모두 뚜렷하게 나타난다. 두 번째 cluster의 최성기에 들어서는 동인도양 지역으로 대류가 더욱 강해진 반면 서태평양과 중태평양의 대류 억제 신호는 다소 약화된 특징을 보인다. 이 때 대기 반응에서 특징적인 부분은 인도 대륙과 아열대 서태평양 지역에서 뚜렷한 경압대기 특성을 보이는 것으로 각각 북인도양 지역의 대류 강화 신호로 하층 저기압, 상층 고기압성 순환, 그리고 서태평양 지역의 대류 억제 신호로 하층 고기압, 상층 저기압성 순환의 특징을 나타낸다. 특히, 인도 대륙에서 경압 대기 구조와 유라시아 대륙을 가로지르는 대기 파동 구조는 잘 알려진

CGT 패턴을 연상케 하는 구조이다. 실제로 인도 지역에서 강한 대류 현상이 CGT 패턴을 유도하는 주요 메커니즘임을 고려할 때 두 번째 cluster에서 나타난 이러한 구조 역시 CGT 패턴과 비슷한 메커니즘으로 형성되었음을 유추할 수 있다. 뿐만 아니라, 선행 연구에서는 북대서양의 양의 NAO가 CGT 패턴 형성에 있어 또 다른 중요 요소로 제시되었는데 (Lin et al., 2016), NAO로부터 연결된 유라시아 대륙의 파동 형태가 인도 지역의 열적 forcing에 의해 동아시아까지 도달할 수 있음이 제시되었다. 이러한 형태는 Figure 26의 북대서양 대기 패턴 및 850 hPa에서 인도 지역에서 북쪽으로 방출되는 wave activity flux에서도 확인할 수 있다. 종합하면, 두 번째 cluster는 라니냐 및 그와 관련된 동인도양과 북인도양의 대류 활동 강화 신호가 열적 forcing으로 작용하여 유라시아 대륙을 가로지르는 대기 파동 구조가 동아시아까지 영향을 미쳐 고온 현상을 유도하는 메커니즘을 나타낸다.

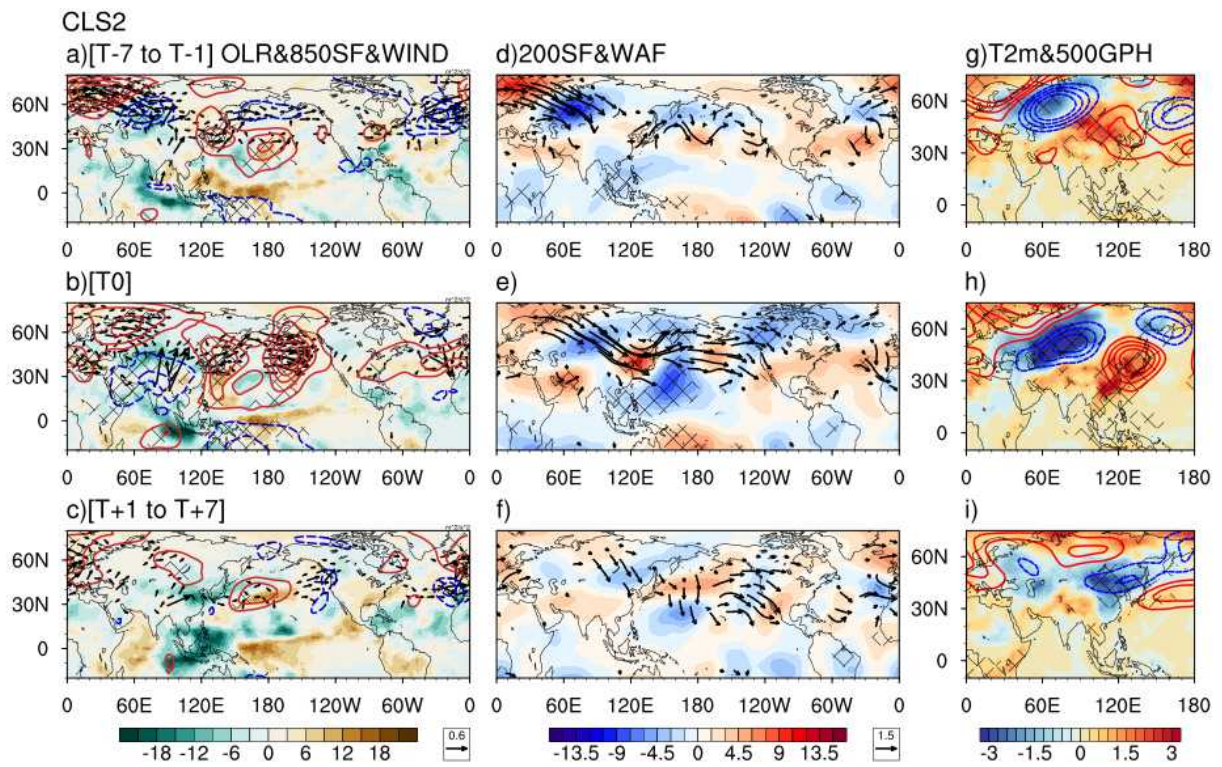


Figure 26. Same figure as in Figure 24 but for the second cluster.

마지막으로 세 번째 cluster의 특징을 Figure 27과 Figure 28에 나타내었다. 총 10개의 사례가 세 번째 cluster에 포함되는데, 세 cluster 가운데 가장 적은 사례이다. Figure 27b에서 확인할 수 있듯이 이 10개의 사례는 대부분 10월이나 11월에 집중되어 나타난다. 이는 첫 번째 cluster가 대체로 9월에 나타나는 것과 비교해 보면 각 cluster 별로 가을철 내 시간 규모에서 고온 현상을 유도하는 서로 다른 물리적 메커니즘이 있음을 의미한다. 세 번째 cluster의 대류 구조는 서인도양에서 대류 강화 신호와 동인도양 및 서태평양에서 대류 억제 신호가 나타난다. 이러한 서인도양과 동인도양의 대비되는 대류 구조는 양의 IOD의 전형적인 구조로 알려져 있다 (Saji et al., 1999; Cai et al., 2011). 특히, 양의 IOD는 대체로 엘니뇨가 최성기로 발달하는 겨울철 전, 가을철에 주로 발달한다. 세 번째 cluster의 SST 합성도 패턴에서 이러한 특징을 확인할 수 있는데 (Figure 27c), 열대 동태평양을 중심으로 양의 해수면 온도가 나타나는 엘니뇨의 특징과 서인도양의 양의 해수면 온도 편차, 동인도양-서태평양의 음의 해수면 온도 편차의 양의 IOD의 특징이 뚜렷하게 나타난다. 개별 사례별로 Nino3.4 지수와 IOD 지수를 살펴보면 1982, 1987, 1997, 2009, 2015년과 같이 강한 엘니뇨 뿐만 아니라, 1994, 2019년과 같은 강한 양의 IOD를 확인할 수 있다 (Figure 27d). 그러나 모든 사례가 강한 엘니뇨와 IOD가 동시에 발생하는 것은 아니다. 예를 들면, 1994, 2019년 같은 경우 강한 IOD가 나타난 해이지만 엘니뇨의 강도가 매우 약했으며, 반면 2009, 2015년의 경우 매우 강한 엘니뇨가 나타난 해이지만 IOD의 강도가 매우 약했다. 그러므로, 세 번째 cluster는 양의 IOD와 엘니뇨와 밀접하게 관련된 대류 구조이지만, IOD와 엘니뇨가 항상 함께 발생해야 하는 것은 아니다. 한편, 세 번째 cluster의 MJO의 위상과 강도를 살펴보면 위상 1~2의 발생 빈도와 강도가 크게 나타나고 위상 5~8의 경우 거의 나타나지 않는다.

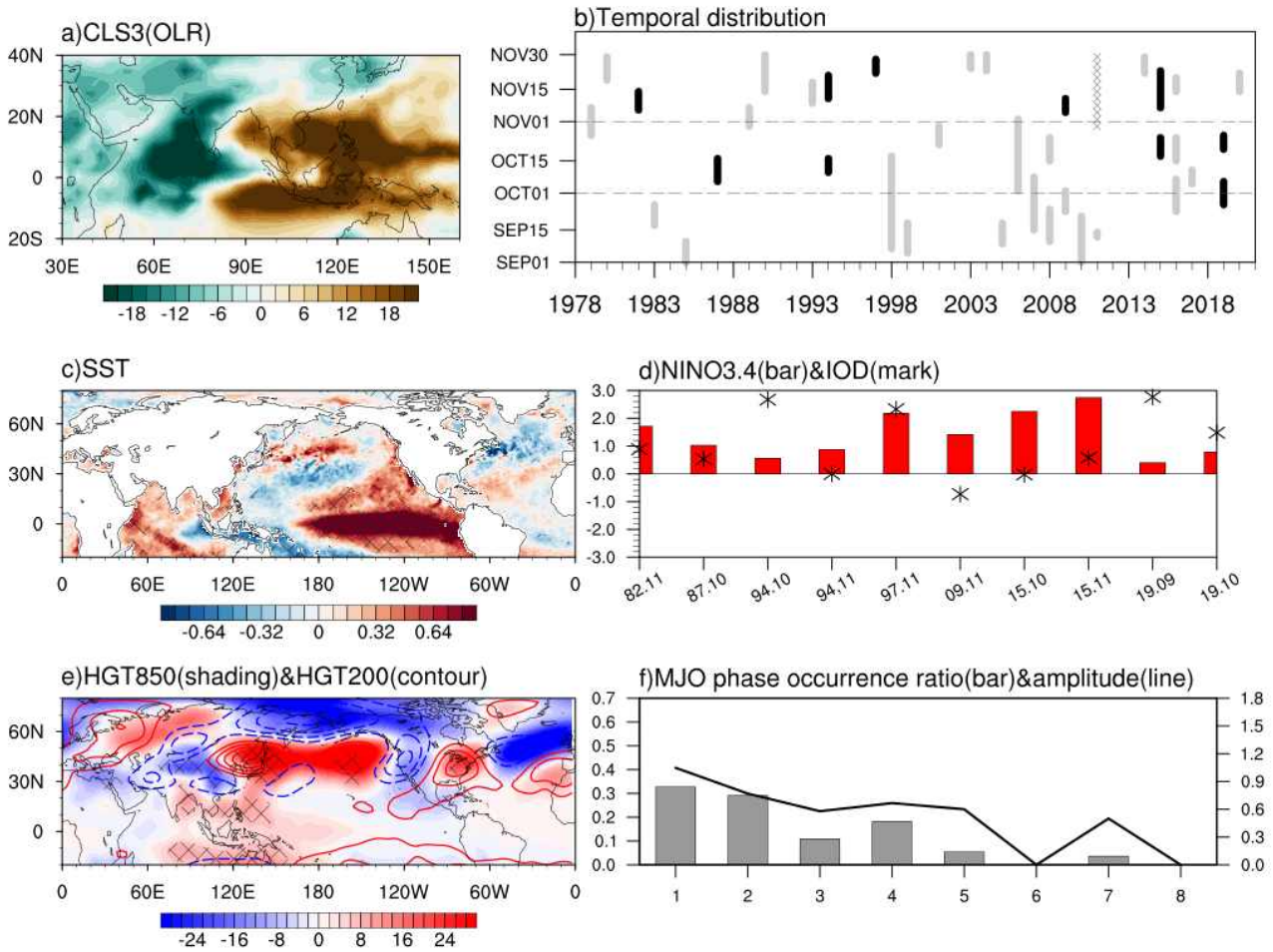


Figure 27. Same figure as in Figure 23 but for the third cluster.

엘니뇨와 IOD는 열대 태평양에서 나타나는 가장 중요한 모드인 만큼 그와 관련된 대규모 순환장의 특징은 많은 선행연구에서 자세히 밝혀졌다 (Alexander et al., 2002; Wang et al. 2000). 세 번째 cluster와 관련된 대규모 순환장 역시 이러한 잘 알려진 패턴을 나타내는데, 동인도양과 Maritime continent의 대류 활동 억제 신호와 관련된 하층 850 hPa 고기압성 순환 등을 확인 할 수 있다 (Figure 27e). Figure 28에 보다 자세한 대규모 순환장의 특징을 나타내었는데, 동인도양과 Maritime continent에서 하층의 고기압성 순환, 상층의 저기압성 순환의 경압대기가 뚜렷하게 나타나고, 또한 대류 활동 강화 신호가 나타나는 열대 중태평양 지역에서도 역시 하층의 저기압성 순환과 상층의 고기압성 순환의 경압 대기가 뚜렷하게 나타난다. 이와 같이, 열대와 아열대 지역에서는 뚜렷한 경압대기 구조가 나타난다면, 중위도 지역, 특히 동아시아와 북태평양 지역에서는 고기압성 순환이 하층부터 상층까지 발달한 순압대기의 특성이 뚜렷하게 나타난다. 특히, 동아시아 지역의 고기압성 순환은 선행연구에서 쿠로시오 고기압으로 명명되어 (Son et al., 2014), 이는 늦가을과 초겨울 시기에 열대 지역 ENSO 변동성과 우리나라 기후를 연결시켜주는 주요 요소로 제시되었다. 이 쿠로시오 고기압은 북서태평양 상층에서 대류억제에 의한 반응으로 수렴대가 나타나고 이것이 Rossby 파동 source로 작용하여 동아시아 지역으로 파동이 전파되어 상층부터 하층까지 고기압성 순환이 형성되는 것으로 해석된다. Figure 28e에 나타난 200 hPa의 wave activity flux를 살펴보면 북서태평양 지역에서 동아시아

시아지역으로 뚜렷한 파동 전파 패턴을 확인 할 수 있는데 이러한 부분이 위의 역학을 뒷받침 해 준다. 양의 IOD와 관련된 서인도양의 대류 강화 신호 역시 그 지역에 경압 대기 반응을 유도하고 그로부터 중위도 지역으로 Rossby 파동 전파가 나타난다. 동아프리카 지역에 상층 고기압성 순환이 형성되고 이로부터 Rossby 파동이 전파되어 중앙 유라시아 지역으로 저기압성 순환이 형성된 것을 확인 할 수 있다. 그에 따라 세 번째 cluster와 관련된 전반적인 대기 패턴 역시 두 번째 cluster와 비슷하게 유라시아 대륙을 가로지르는 파동 구조가 나타난다. 그러나 두 번째 cluster와 세 번째 cluster에서 우리나라 가을철 고온 현상을 유도하는 메커니즘은 서로 다르다. 두 번째 cluster에서는 유라시아 대륙의 파동 구조로부터 동아시아에 고기압성 순환이 유도됨으로서 고온이 유도되는 역학이 우세하게 나타났다면, 세 번째 cluster에서는 동인도양/서태평양 지역에서의 대류 억제 신호로부터 유도되는 경압 대기 구조와 그로부터 전파된 Rossby 파동의 영향으로 형성된 동아시아 고기압성 순환이 우리나라 고온 현상을 유도하는 주요 메커니즘이다. 두 번째 cluster와 세 번째 cluster의 비교는 특히 우리나라 가을철 기온과 ENSO 사이의 비선형적인 관련성을 제시한다. 즉, 두 번째 cluster의 경우 라니냐 상태일 때 우리나라가 고온이 유도되는 특징을 보여주는 반면, 세 번째 cluster의 경우 엘니뇨 상태일 때 우리나라가 고온이 유도되는 특징을 보여줌으로서 ENSO와 우리나라 가을철 기온 사이의 비선형적 관련성을 보여준다.

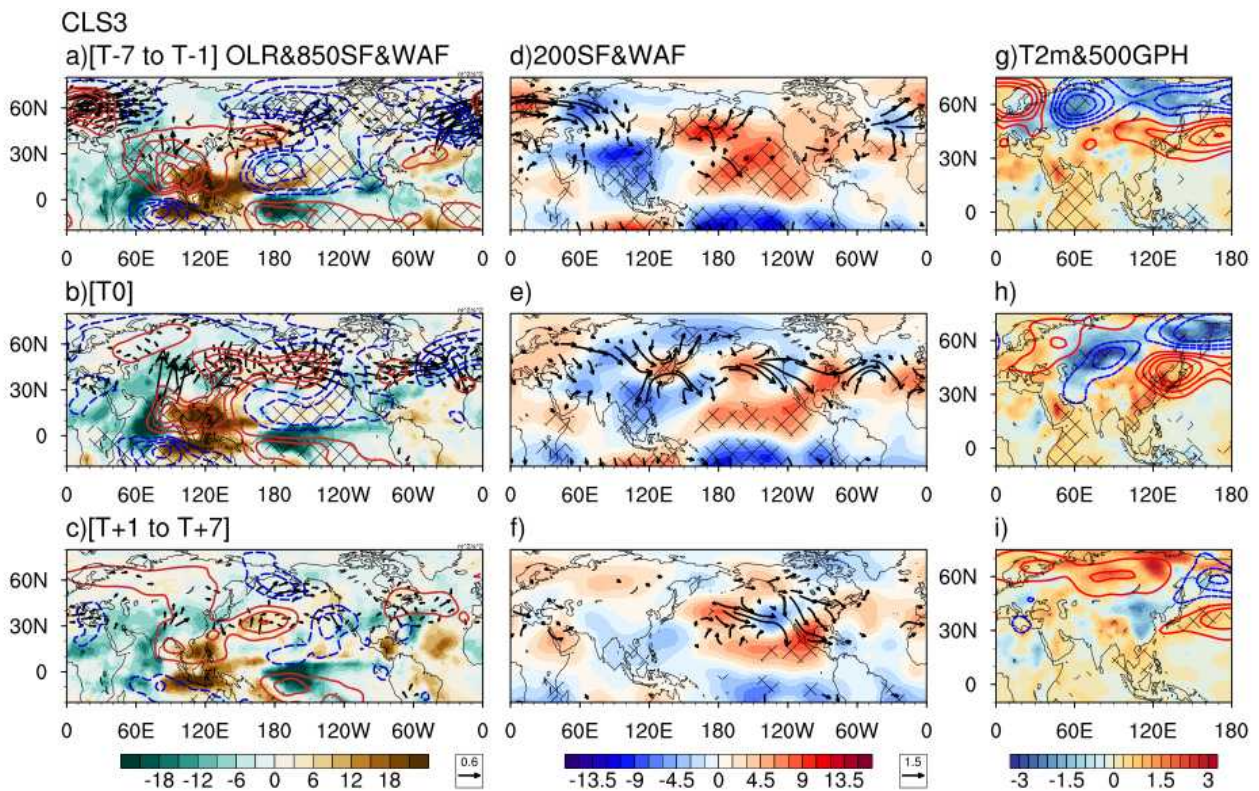


Figure 28. Same figure as in Figure 24 but for the third cluster.

(4) 요약과 결론

이 연구에서는 우리나라 가을철 고온 현상과 관련된 인도양-서태평양 지역의 세 가지 특징적인 대류 구조를 clustering 분석을 통해 살펴보았다. 첫 번째 cluster는 열대 동인도양, 북인도양부터 아열대 서태평양, 그리고 동아시아까지 남북 방향의 대류 구조를 보이며 이는 MJO의 위상 5와 밀접하게 관련된 패턴임을 확인하였다. 이와 관련하여 하층 대기의 순환 구조는 열대 동인도양부터 동아시아까지 북동 방향의 파동전과 구조를 나타내는데, 이는 대류 현상에 대한 열적 반응으로 해석할 수 있다. 한편, 상층 대기 순환장은 유라시아 대륙에서 동서 방향으로 확장된 고기압성 순환이 동아시아까지 영향을 미치는 패턴으로서, 우리나라는 하층부터 상층까지 발달한 고기압성 순환의 영향으로 가을철 고온 현상이 나타나게 된다. 두 번째 cluster는 동인도양과 북인도양을 중심으로 대류활동 강화 신호가 나타나는데, 이는 라니냐 현상과 밀접하게 관련되어 있다. 이와 관련된 대기 순환 패턴은 북대서양 양의 NAO로부터 연결되는 유라시아 대륙의 파동 구조로서, 인도양의 대류 강화 신호가 이러한 파동 구조에 열적 forcing으로 작용하여 동아시아까지 파동 구조가 연결되는 것으로 보인다. 이는 잘 알려진 CGT 메커니즘과 비슷하다. 마지막으로 세 번째 cluster는 서인도양에서 대류 강화 신호가, 동인도양/서태평양 지역에서 대류 억제 신호가 나타나는 구조로 이는 엘니뇨와 양의 IOD 현상과 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 동인도양/서태평양 지역의 대류 억제 신호로부터 유도된 경압 대기 구조와 그와 관련된 상층 Rossby 파동 전파로 동아시아 지역으로 고기압성 순환이 형성되어 우리나라에 고온 현상이 유도되는 메커니즘을 보인다.

위에서 요약한 것과 같이 이 연구에서는 우리나라 가을철 고온 현상을 유도하는 서로 다른 세 가지의 인도양-서태평양 지역의 대류 구조를 규명하였다. 세 가지 대류 구조는 MJO, ENSO, IOD 등, 서로 구별되는 물리적 메커니즘을 나타내기 때문에 가을철 기후 예측 및 분석에 적용할 수 있다.

라. 인도양의 열적 강제력과 관련된 우리나라 12월 기후 변동성 분석

(1) 연구 배경

이 연구는 인도양의 열적 강제력과 관련된 유라시아 대륙의 상층 대기 패턴을 규명하고 그와 관련된 우리나라 12월 기후 변동 특성을 규명하는 것을 목표로 한다. 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 겨울철 기후 변동성은 이른 겨울철인 12월과 늦은 겨울철인 1월, 2월의 변동 특성이 상이하게 나타나는데, 엘니뇨-남방진동(ENSO)을 포함한 열대 지역 변동성의 영향은 12월에 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있다 (Son et al., 2014). 따라서 이 연구에서는 열대 지역 변동성과 관련된 우리나라 겨울철 기후 특성을 이해하기 위해 12월에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. ENSO 변동성을 나타내는 Nino3.4 지수와 우리나라 12월 기온과의 상관 계수는 1979-2020 기간에 0.40으로 통계적으로 유의한 값을 나타낸다. 그러나 엘니뇨와 라니냐 사이에 비선형적인 특징이 나타나는데, 엘니뇨 해였던 12개 사례에 대해서는 1 사례를 빼고 모두 우리나라 12월 기온이 평년보다 높은 특징을 나타내었지만, 라니냐 해 14개 사례에 대해서는 우리나라 12월 기온이 높은 사례 4개, 평년과 비슷했던 사례 5개, 그리고 평년보다 낮았던 사례가 6개로서, 엘니뇨 시기와 달리 라니냐 시기에는 ENSO와 우리나라 12월 기온과의 관련성이 뚜렷하지 않은 특징이 있다.

이와 같은 ENSO와 우리나라 12월 기후 변동성 사이의 비선형적 관련성에 영향을 미치는 요소로는 개별 ENSO 사례별로 다양하게 나타나는 열대 대류 구조 또는 ENSO가 열대 지역의 다른 기후 변동 모드, 예를 들면, 인도양 기후 변동성과 맺는 관련성이 개별 사례별로 다르게 나타나기 때문에 고려할 수 있다. 특히, 인도양의 대기-해양 변동성은 남아시아 지역의 상층 고기압성 순환, 또는 아열대 북서태평양 지역의 대기 순환을 변화시킴으로써 ENSO가 동아시아 기후에 미치는 영향을 조절할 수 있다. 예를 들면, 1998년과 2017년 12월 모두 라니냐가 발생하였지만, 1998년의 경우 평년보다 기온이 높았던 반면, 2017년은 평년보다 낮은 기온을 기록하였는데, 두 해의 가장 큰 차이는 남아시아 지역의 상층 고기압성 순환의 발달 유무이다. 1998년의 경우 티벳 고원 남쪽으로 동서방향으로 발달한 고기압성 순환이 우리나라까지 확장되면서 차가운 대륙 고기압이 우리나라까지 영향을 미치는 것을 저지하는 역할을 하면서 평년보다 높은 기온을 기록했다면, 2017년의 경우 남아시아 지역 subtropical jet를 따라서 상층 대기 파동 구조가 나타났었는데, 아라비아 반도 부근에 저기압성 순환, 인도-차이나 반도에 고기압성 순환, 그리고 동아시아 지역으로 저기압성 순환이 발달하면서, 우리나라에 저온 편차가 나타났다.

이와 같이 겨울철 subtropical jet가 지나가는 지역에서 subtropical jet의 남-북 방향 이동으로 인한 상층 고-저기압성 순환의 형성, 그리고 jet를 따르는 상층 파동 전파가 우리나라 12월 기후 변동성에 미치는 영향이 뚜렷하므로, 이 연구에서는 아열대 유라시아 대륙의 상층 대기 변동성에 초점을 맞추어 이 변동성이 ENSO와 인도양 지역의 열적 변동성과 어떠한 관련성을 가지고, 또 우리나라를 포함한 동아시아 지역 12월 기후에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

(2) 자료와 방법

우리나라 12월 기온과 강수 자료는 기상청에서 제공하는 종관기상관측시스템(Automated

Synoptic Observing System, ASOS)의 62개 지점을 평균한 1979년부터 2020년 자료를 사용하였다. 대규모 순환장 분석을 위한 대기 변수의 경우 National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy (NCEP/DOE) Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) 자료를 사용하였다. 또한 대류 구조를 분석하기 위해 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 상향장파복사 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) (Liebmann and Smith, 1996) 자료를 사용하였다. 해수면 온도 (Sea Surface Temperature; SST)는 NOAA의 Extended Reconstructed SST version 5 (ERSST.v5; Huang et al., 2017)를 사용하였다. 이 연구에서는 아열대 유라시아 대륙의 주요 상층 대기 변동성을 분석하기 위해 Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석 방법을 적용하였다.

(3) 아열대 유라시아 대륙의 상층 대기 변동 모드와 관련된 우리나라 12월 기후 변동 특성

Figure 29은 1979년부터 2020년 기간 12월의 30-120E, 20S-40N 영역의 300 hPa 유선함수 (stream function)에 대한 EOF 분석 결과를 나타낸다. 첫 번째 모드는 전체 변동성의 32.2%를 나타내는데, 그 공간 구조는 티벳 고원 남쪽으로 동-서 방향으로 길게 발달한 저기압성 순환과 인도양 지역으로 고기압성 순환이 나타난다. 즉, 이 공간 구조는 열대 인도양과 아열대 유라시아 대륙의 남-북 방향 contrast로 이해 할 수 있는 한편, 기후적으로 이 지역에 위치하는 subtropical westerly jet를 고려하였을 때, 이 구조는 subtropical westerly jet가 남하한 특징을 나타내는 것으로도 해석이 가능하다. 첫 번째 모드의 PC 시계열과 우리나라 기온, 강수와의 상관 계수는 각각 0.04, 0.33로서, 기온과의 선형적인 상관관계는 통계적으로 유의하지 않지만, 강수의 경우 통계적으로 95% 수준에서 유의한 관련성을 나타낸다. 한편, NINO3.4 지수와의 상관관계는 0.53으로서, 이 모드는 ENSO 변동성과 밀접한 관련성을 나타낸다. 그러나 인도양의 IOD 변동성을 나타내는 지수와의 상관 계수는 0.15로서, IOD와는 선형적인 관련성이 나타나지 않는다.

Figure 29c에 나타난 두 번째 모드는 전체 변동성의 20.9%를 나타내며, 공간 구조는 아라비아 반도, 인도-차이나 반도, 동아시아까지 북동 방향으로 뚜렷한 대기 상층의 파동 형태를 나타낸다. 첫 번째 모드가 subtropical jet의 남-북 방향 이동을 의미한다면, 두 번째 모드는 subtropical jet를 wave guide로 하여 아열대 유라시아 대륙을 가로질러 동아시아까지 전파되는 파동 구조로 해석할 수 있다. 두 번째 모드의 PC 시계열과 우리나라 12월 기온, 강수와의 상관 계수는 각각 0.70, 0.18로 이 모드는 우리나라 기온 변동성과 매우 높은 상관 관계를 나타낸다. NINO3.4 지수 및 IOD 지수와의 상관 관계도 각각 0.39와 0.40으로 유의미하게 나타난다. 특히, ENSO와의 상관 관계는 첫 번째와 두 번째 모드 모두 통계적으로 95% 신뢰도 수준에서 유의미하게 나타나는데, 이는 ENSO와 아열대 유라시아 대륙의 상층 대기 순환 패턴 사이의 비선형적인 관련성을 의미하는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 엘니뇨 및 라니냐 시기에 subtropical jet의 남-북 방향 이동의 형태로 대기 패턴이 반응 할 수도 있고, subtropical jet를 따라서 아라비아 반도부터 동아시아까지 파동 전파 패턴의 대기 반응이 나타날 수도 있음을 의미한다. 따라서 이 연구에서는 어떠한 조건이 엘니뇨, 라니냐에 의한 상층 대기 반응을 결정하는 지 규명하는 것이 필요하다. 하나의 가능성은 두 번째 모드와 IOD 지수와의 높은 관련성에서 유추 할 수 있듯이 인도양의 열적 변동성이 두 가지 서로 다른 대기 반응을 유도하는데 역할을 했을 가능성이 있다.

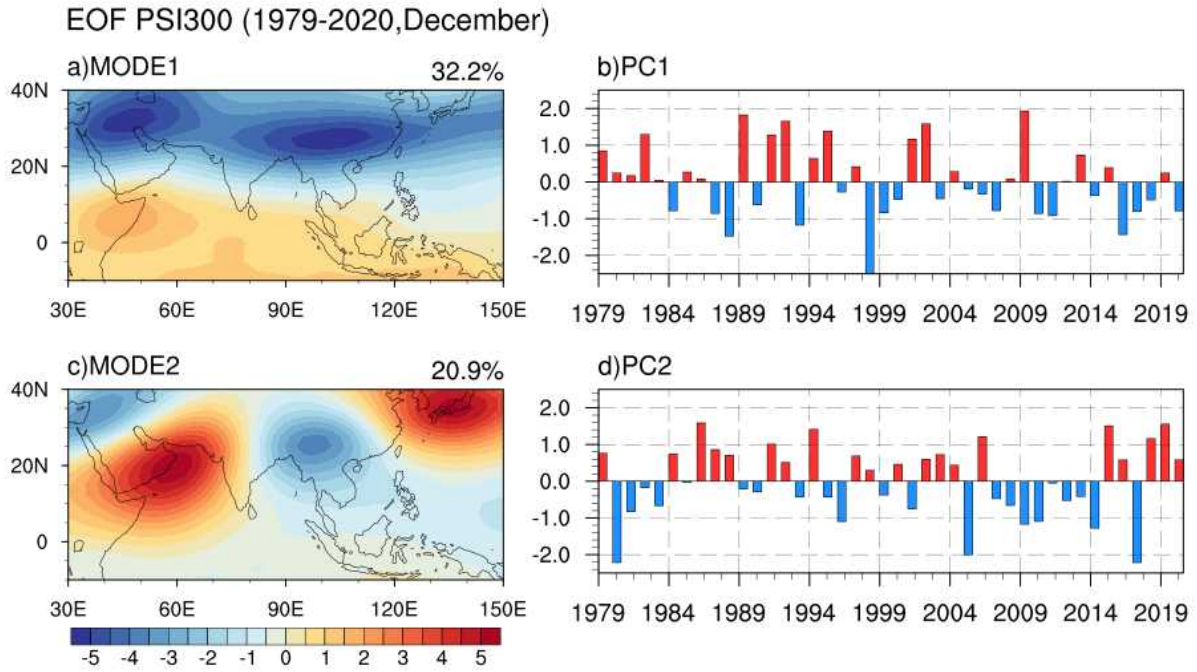


Figure 29. The spatial pattern and the corresponding principal component time series of the (a) and (b) first and (c) and (d) second empirical orthogonal functions modes of the stream function anomaly at 300 hPa during December from 1980 to 2020.

두 모드와 관련된 ENSO와 인도양의 열적 상태 그리고 대규모 순환장의 특징을 살펴보기 위해 두 모드의 PC 시계열을 기준으로 합성도 분석을 수행하였다. 각 PC 시계열의 1 표준편차를 기준으로 4가지 카테고리로 나누어 각 특징을 살펴보았다. 즉, 첫 번째 PC 시계열이 1 표준편차 이상이면 두 번째 PC 시계열의 강도보다 큰 경우를 Positive PC1 사례로 정의하였고, 비슷한 방식으로 Negative PC1, Positive PC2, 그리고 Negative PC2로 분류하였다. 그 결과 각 카테고리에 속하는 연도를 Figure 30에 나타내었다.

이 연도를 바탕으로 Positive PC1 사례의 SST, OLR, 300 hPa, 850 hPa 유선함수 편차의 합성도 분석을 수행한 결과를 Figure 31에 나타내었다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 티벳 고원 남쪽에서 동-서 방향으로 발달한 저기압성 순환, 즉 subtropical jet의 남하 현상은 열대 중태평양을 중심으로 나타나는 약한 엘니뇨 현상과 관련되어 있음을 알 수 있다. 개별 사례별로 살펴보면, 1979, 1982, 1991, 2002, 2009년의 엘니뇨 사례와, 1989, 1992, 2001년의 중립 사례, 그리고 1995년의 라니냐 사례가 포함되어 있다. 인도양에는 뚜렷한 SST 편차가 나타나지 않지만, 서태평양과 열대 대서양의 음의 해수면 온도 편차가 유의하게 나타난다. 아열대 유라시아 대륙의 상층 저기압성 순환은 인도양 북부 지역의 하층의 고기압성 편차와 함께 나타나며 뚜렷한 경압 대기 구조를 나타내는데 이를 통해 이 지역에서 열적인 forcing으로부터 유도된 대기 패턴임을 유추할 수 있다. 실제로 OLR 패턴을 살펴보면, 인도양 북부 지역으로 대류 억제 신호가 나타나고, 인도 대륙 북쪽으로는 대류 강화 신호가 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

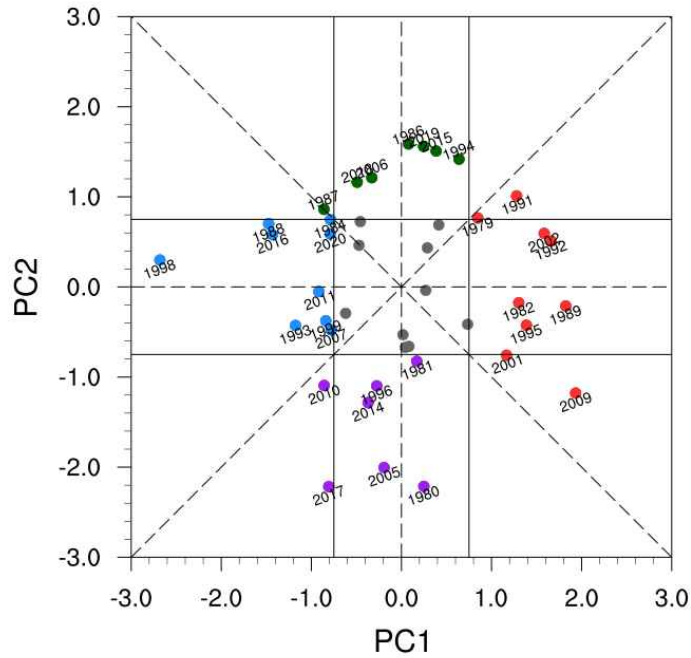


Figure 30. A scatter plot of normalized PC1 versus PC2. The classified categories are designated by colored dots.

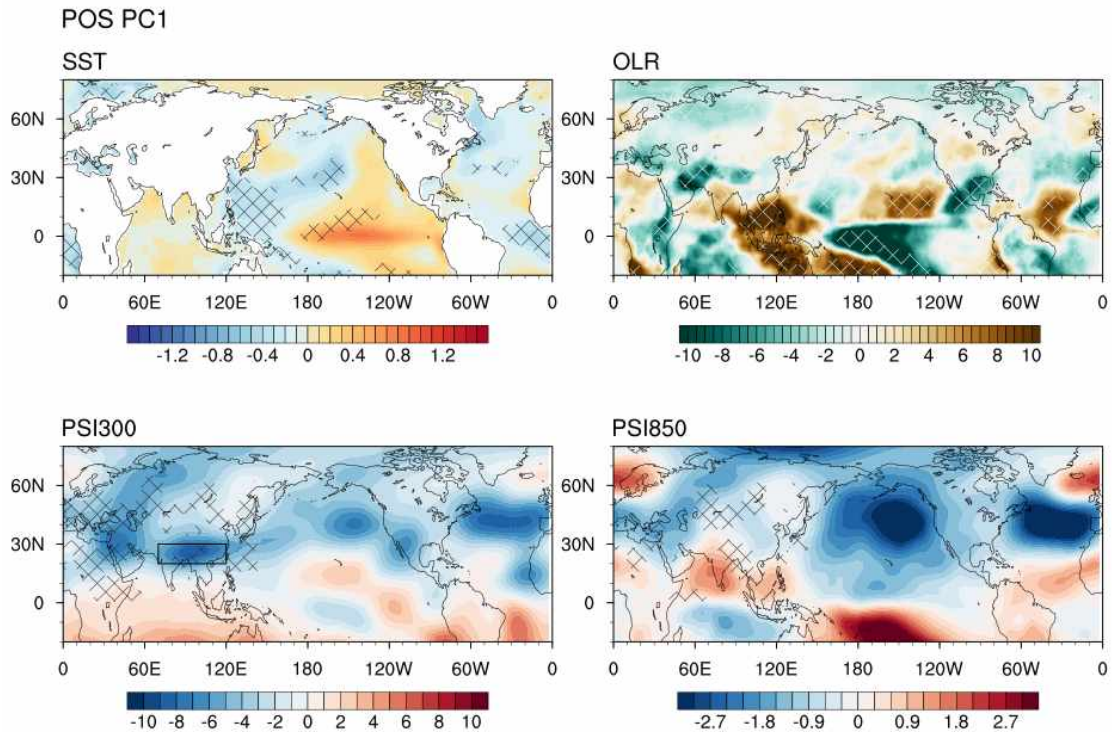


Figure 31. Composite maps of (a) sea surface temperature (SST), (b) outgoing longwave radiation (OLR) (c) stream function at 300 hPa and (d) at 850 hPa anomalies during December of positive PC1 category. Streamfunction anomalies are scaled by $1 \times 10^6 m^2 s^{-1}$. The statistically significant anomalies at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

첫 번째 모드가 positive phase일 때의 역학 과정, 즉, 아열대 유라시아 대륙 상층에 동-서 방향 저기압성 순환이 형성되는 과정을 좀 더 자세히 살펴보기 위해, 계절내 시간규모에서의 변화를 Figure 32에 나타내었다. 이는 positive PC1 카테고리 에 속한 각 연도 별로 12월의 5일 평균 자료 (pentad) 에 대해 아열대 유라시아의 상층 저기압성 순환을 인덱스로 설정하여 (70-120E, 20-30N의 300 hPa stream function의 영역 평균), 이 인덱스가 가장 적은 값을 나타내는 pentad를 선정하였다. 이 pentad를 유라시아 아열대 저기압이 peak인 시기로 설정하고 이로부터 1 pentad부터 3 pentad 전까지의 상·하층 대기 및 OLR, 850 hPa 바람장, SST, 2m 기온의 합성 패턴을 나타내어 아열대 유라시아 대륙에 저기압성 순환이 형성되는 과정을 살펴보았다.

Figure 32의 대륙 구조 변화를 살펴보면, Maritime Continent부터 동인도양까지 대륙 억제 신호와 중태평양의 대륙 강화 신호가 지속적으로 유지되는 특성을 확인 할 수 있다. 이러한 대륙 구조에 대한 Gill-type 반응으로서, 특히 peak-1P 시기에 하층에 대륙 억제, 대륙 강화 신호의 북서쪽으로 각각 고기압, 저기압성 순환이 형성된다. 특히, 인도양 북부 지역으로 하층 고기압성 순환의 형성과 상층에는 저기압성 순환의 뚜렷한 경압 구조 형태가 나타나는데, 이 지역 (60-100E)을 영역 평균한 latitude-height vertical cross section을 살펴보면 인도양 북부 지역에서 하강기류로 인한 하층 고기압성 순환, 그리고 아열대 유라시아 대륙에서 상승기류로 인한 저기압성 순환의 local Hadley circulation의 특징을 나타낸다 (Figure 33). 즉, 첫 번째 모드가 positive phase일 때는, 약한 중태평양 엘니뇨 신호에 따라 서태평양-북인도양에서 대륙이 억제되고, 중태평양에서 대륙 강화 신호가 나타나면서 인도양 북부 하층에서 고기압성 순환, 상층에서 저기압성 순환의 경압 대기 반응으로 인한 특성으로 해석할 수 있다.

이러한 대기 패턴과 관련한 우리나라 12월 기후 특성을 살펴보면, 전반적으로 대륙 고기압의 발달이 나타나지 않으면서 우랄 산맥 동쪽으로는 대체로 높은 기온 편차가 나타난다. 우리나라에 직접적으로 영향을 미치는 기압계나 풍계가 뚜렷하게 나타나지 않으면서 대륙의 따뜻한 공기의 영향을 받아 우리나라 12월 기온은 대체로 평년과 비슷하거나 높은 경향이 우세하다 (Table 6). 또한 강수의 경우 우리나라로 하층에 동풍 편차가 우세하게 나타나면서 편향상에 의해 강수가 많은 경향이 나타나는 것으로 보인다 (Table 6).

POS PC1, Subseasonal Variability

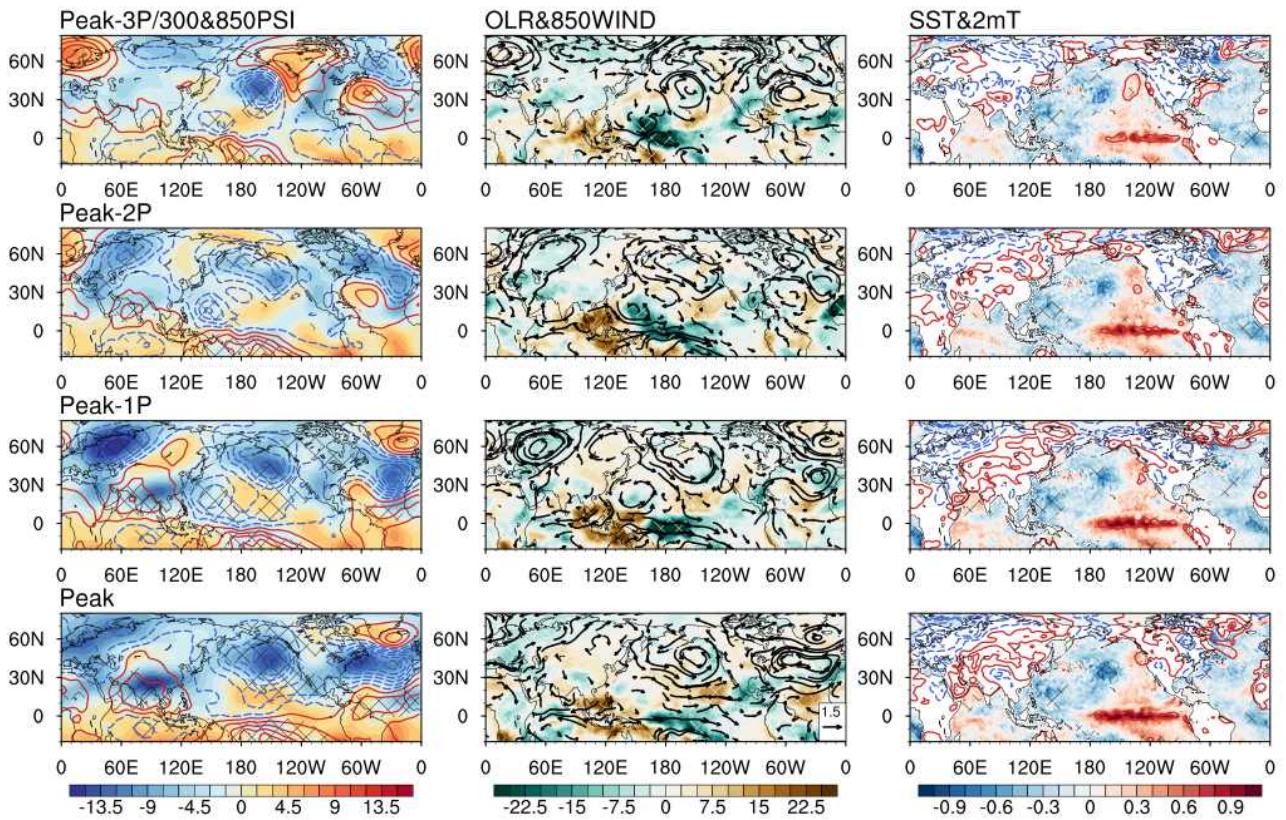


Figure 32. Anomalous composite of 300 hPa and 850 hPa stream function, 850 hPa wind, OLR, SST, and 2m air temperature for the positive PC1 category. The 5-day averaged composite maps before the peak pentad of upper level low pressure anomaly over the subtropical Eurasian continent are presented.

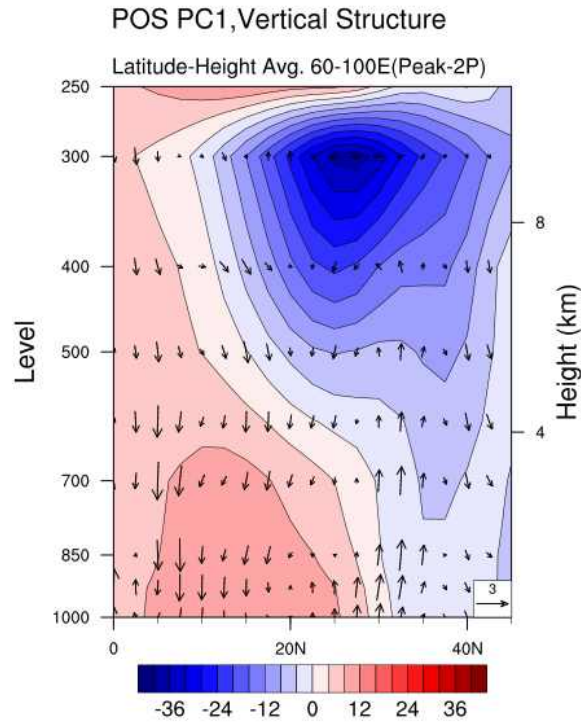


Figure 33. Latitude-Height cross section of the geopotential height averaged over the 60-100E for the peak-2P period of the positive PC1 category.

Table 6. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the positive PC1 category.

Year	NINO3.4	Temperature	Precipitation
1979	0.6	1.0	36.1
1982	2.2	-0.2	30.2
1989	-0.1	1.3	22.5
1991	1.5	1.7	61.4
1992	-0.1	1.1	51.3
1995	-1.0	-1.7	5.8
2001	-0.3	-0.8	28.5
2002	1.1	0.8	46.1
2009	1.6	-0.5	30.0

첫 번째 모드가 negative phase일 때의 특성을 Figure 34에 나타내었다. 이 경우 positive phase의 엘니뇨 신호와 비교했을 때 라니냐 패턴이 매우 뚜렷하게 나타난다. 즉, 첫 번째 모드는 엘니뇨보다 라니냐의 특성을 더욱 뚜렷하게 나타내며 ENSO와의 관련성에서 비 선형적인 특징을 나타낸다. 실제 개별 사례를 살펴보면, 1993년을 제외하고 이 카테고리에 속한 해들은 모두 라니냐가 나타났다 (Table 7). SST 이외에 OLR과 상·하층 대기 패턴은 positive phase와 반대 패턴으로서, 아열대 유라시아 대륙에 동·서 방향으로 길게 확장된 상층 고기압성 순환과, 인도양 북부 지역의 하층 저기압성 순환이 뚜렷한 경압 대기 형태를 나타내며, 이는 Maritime Continent와 북인도양 지역의 대류 강화 신호와 함께 나타난다.

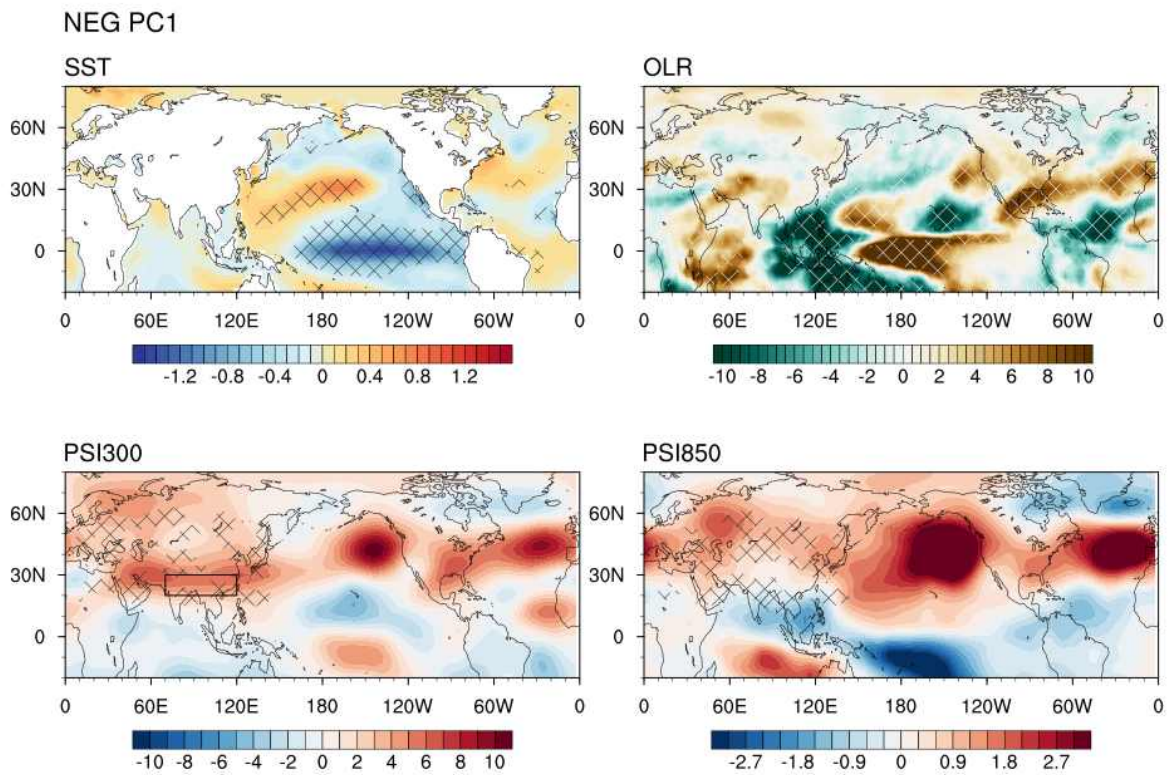


Figure 34. Same figure as in Figure 31 but for the negative PC1 category.

이 경우의 상세 역학 과정을 살펴보기 위해 계절내 변화의 특징을 Figure 35에 나타내었다. 아열대 유라시아 대륙의 상층 고기압이 peak로 나타나기 이전 3 pentad 전부터의 대류 특징을 살펴보면 Maritime continent, 동인도양, 북인도양까지 대류 강화 신호가 열대 중태평양에는 대류 억제 신호가 나타난다. 그에 따라 열대 중태평양에는 동풍 편차가, 인도양에는 서풍 편차가 나타나고, 북인도양 부근으로 하층 저기압성 편차가 형성된다. 열대 중태평양 지역에는 반대로 하층에 고기압성 순환, 상층의 저기압성 순환이 나타나고, Rossby 파동 전파를 통해 Pacific-North America pattern과 유사하게 북동태평양 지역으로 barotropic 구조의 고기압성 순환이 나타난다. 인도양 북부 대류 강화에 따른 하층 저기압성 순환, 그에 따른 상승기류와 인도 북부 지역에서 하강기류로 인한 상층 고기압성 순환의 특징을 Figure 36의 latitude-height vertical cross section을 통해 확인 할 수 있다. 이후 점차 시간이 지남에 따라 대류 강화의 중심은 Maritime Continent로 이동하는 특징을 보이며 그에 따라 인도 북부의 상층 고기압성 순환 중심 역시 동쪽으로 이동하여 Peak 시기에는 그 중심이 인도차이나 반도 북부 지역에 위치하며 우리나라까지 확장된 특징을 보인다. 이는 첫 번째 모드가 positive phase일 때 상층 저기압성 순환이 우리나라까지 확장되지 않는 특성과는 구별되는 특징이다.

이러한 대기 패턴과 관련한 우리나라 12월 기온, 강수 경향을 살펴보면, 유라시아 대륙 전반적으로 하층 고기압, 즉 차가운 대륙 고기압이 발달하여 중앙 유라시아 지역으로 저온 편차가 우세하게 나타나지만, 아열대 유라시아 대륙의 상층 고기압성 순환의 영향으로 유라시아 남부~동아시아까지 고온 편차가 나타난다. 따라서, 유라시아 대륙의 기온 패턴을 살펴보면, 스칸디나비아 반도부터 유라시아 남부까지 남-북 방향으로 고온-저온-고온 편차의 특징이 나타난다. 구체적으로 우리나라 기온은 Table 7에 나타난 것과 같이 평년과 비슷하거나 높은 경향이 우세하게 나타난다. 평년보다 기온이 낮게 나타난 사례는 2회가 있었는데, 그 경우에도 평년 비슷 수준에서 약간 낮은 수준으로 크게 기온이 떨어진 사례는 나타나지 않았다. 즉, 대륙 고기압이 발달하여 우리나라가 추울 수 있는 조건은 형성되어 있지만, 아열대 유라시아 대륙에 상층 고기압성 순환이 한기의 남하를 막아주는 역할을 하여 기온이 크게 떨어지지 않고 때로는 고온 편차가 나타나는 것으로 해석된다. 강수는 평년보다 낮은 경향이 우세하게 나타나는데 이는 우리나라가 전반적으로 고기압성 순환의 영향을 받기 때문으로 해석된다.

NEG PC1, Subseasonal Variability

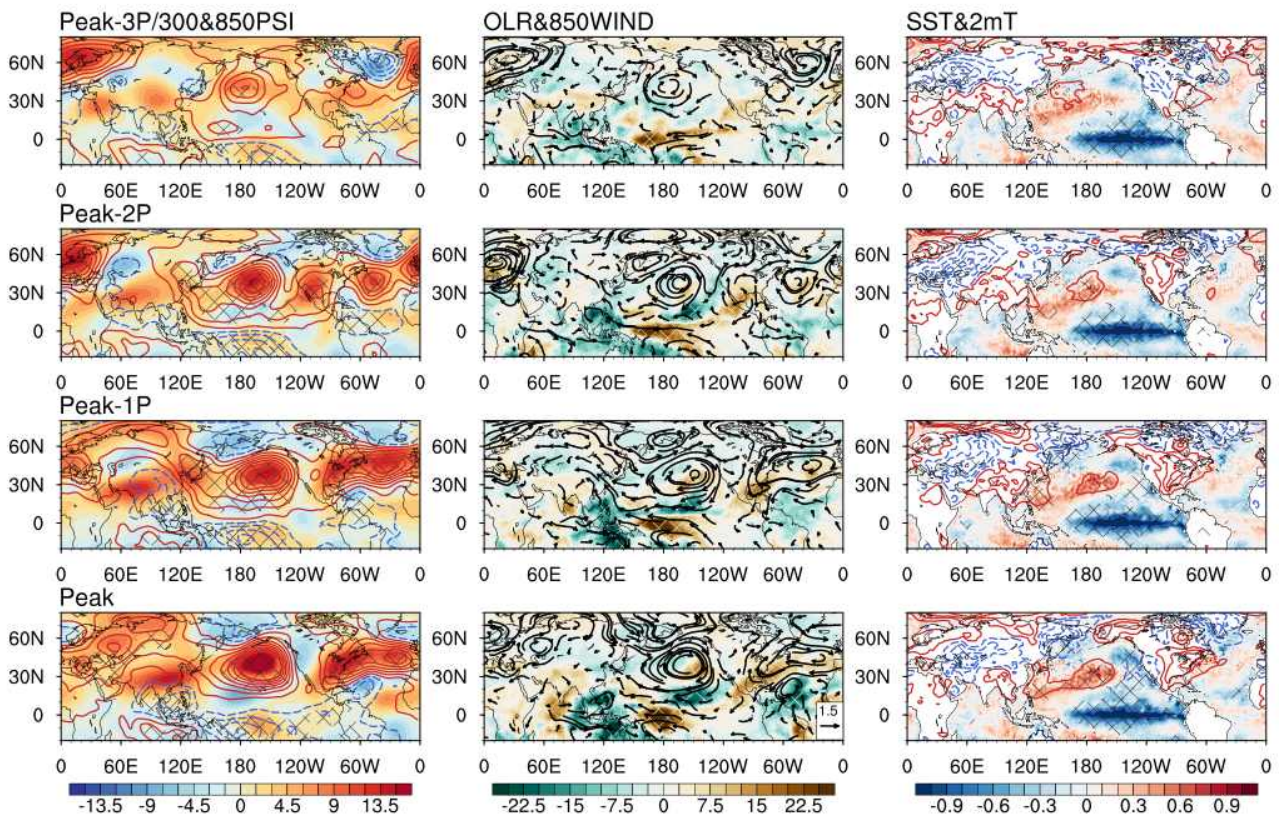


Figure 35. Same figure as in Figure 32 but for the negative PC1 category.

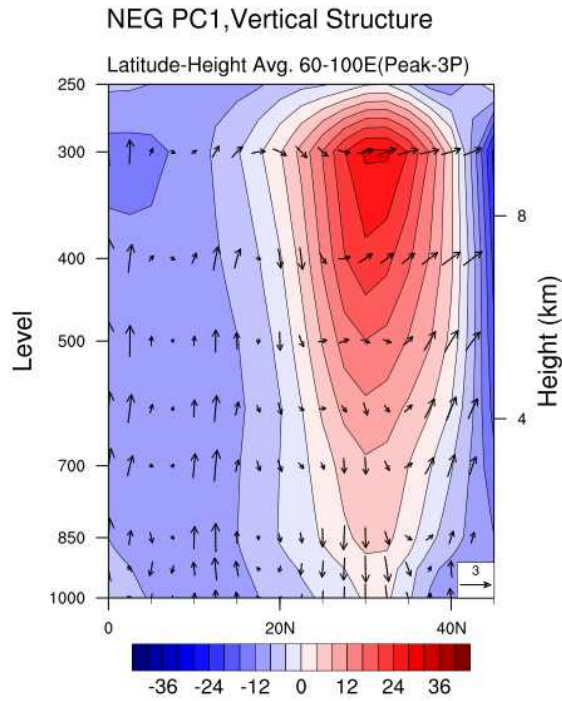


Figure 36. Same figure as in Figure 33 but for the negative PC1 category.

Table 7. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the negative PC1 category.

Year	NINO3.4	Temperature	Precipitation
1984	-1.1	-0.3	21.4
1988	-1.8	-0.1	15.2
1993	0.1	-0.4	21.7
1998	-1.6	1.4	6.3
1999	-1.7	-0.1	9.0
2007	-1.6	1.2	29.7
2011	-1.0	-0.8	16.0
2016	-0.6	1.6	65.0
2020	-1.2	-0.7	7.8

다음으로 두 번째 모드의 특징을 살펴보았다. Figure 37에 두 번째 모드가 positive일 때 합성도 패턴을 나타내었는데, SST 패턴을 살펴보면 매우 뚜렷한 엘니뇨 형태를 나타낸다. 이는 첫 번째 모드가 positive일 때 약한 엘니뇨 signal이 나타나는 것과 대비되는 특징이다. 개별 사례를 살펴보면 해당 연도 모두 강한 엘니뇨의 특징을 보인다 (Table 8). 특히, 첫 번째 모드와 달리 인도양에서 양의 해수면 온도 편차가 유의하게 나타나는데, 이는 IOD와의 유의한 관련성에서 비롯된 것으로 해석된다. 또한 첫 번째 모드에서는 서태평양 지역에서 음의 해수면 온도 편차가 유의하게 나타났는데, 두 번째 모드에서는 이러한 특징이 나타나지 않고 우리나라 남쪽 해역에서 양의 편차가 유의하게 나타난다. 대서양 SST를 살펴보면, 그린란드 남쪽 북대서양에서 유의한 음의 편차가 나타나는데 이는 첫 번째 모드에서 열대 대서양의 음의 편차가 유의하게 나타나는 것과 구별되는 특징이다. 대류 특성을 살펴보면, 동인도양-서태평양 지역의 대류 억제, 중태평양 지역의 대류 강화 신호는 첫 번째 모드와 유사하게 나타나지만, 서인도양 지역의 대류 강화 신호는 두 번째 모드에서 더욱 유의하게 나타난다. 이 역시 IOD와의 유의한 관련성을 나타내는 현상으로 해석된다. 한편, 상층 대기 패턴은 아라비아 반도, 인도-차이나, 그리고 동아시아로 파동이 전파되는 특징을 나타내는데, 이는 겨울철 subtropical jet를 따르는 파동 전파 패턴으로 보인다. 하층에서는 동인도양-서태평양 지역의 대류 억제 신호에 따라 하층 고기압성 순환이 나타나고, 아라비아 반도 지역으로는 약하지만 저기압성 순환이 나타나 서인도양과 동인도양에 각각 경압 대기 구조를 나타낸다. 반면 동아시아 지역에서는 Rossby wave 전파를 통해 하층부터 상층까지 고기압성 순환이 나타나며 고온 편차에 영향을 미친다.

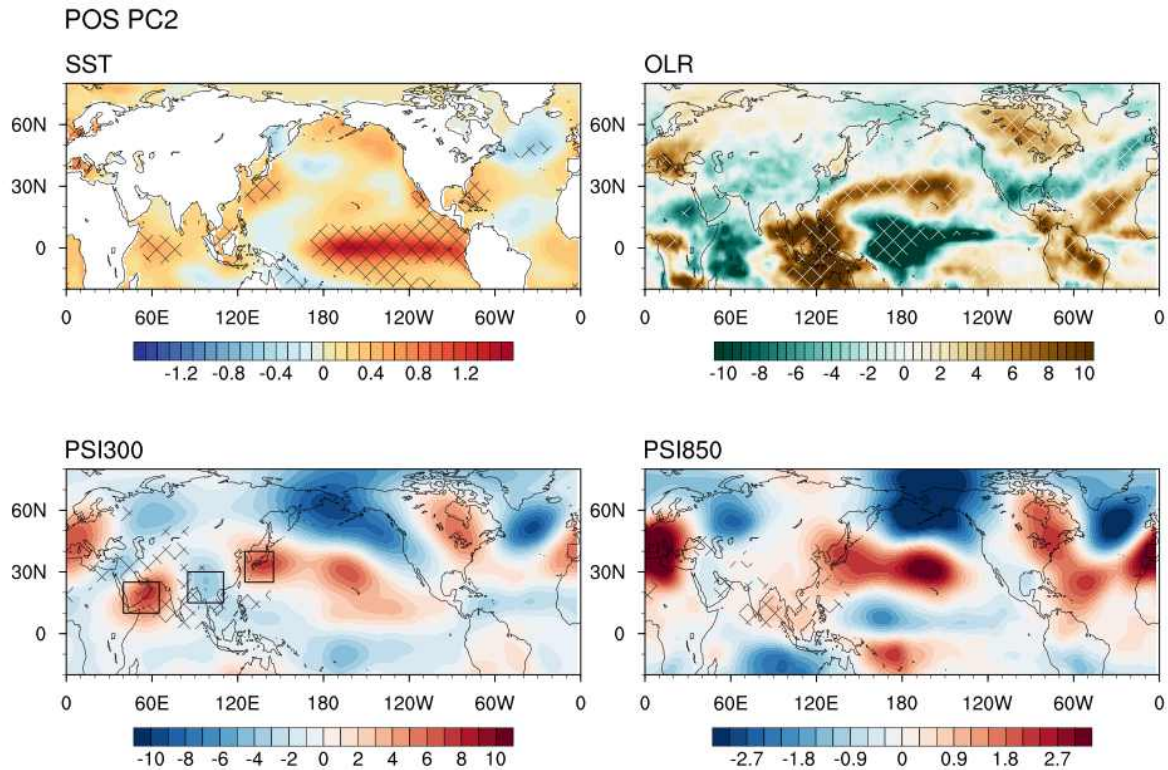


Figure 37. Same figure as in Figure 31 but for the positive PC2 category.

두 번째 모드가 positive인 경우, 즉 아라비아 반도부터 동아시아까지 상층 고-저-고기압의 파동 구조가 형성되는 상세 역학을 살펴보기 위해 계절내 변화를 Figure 38에 나타내었다. 첫 번째 모드와 비교해서, 대류 억제 구역이 약간 동쪽으로 이동하면서 인도양 전반적으로 나타났던 동풍 편차가 두 번째 모드에서는 동인도양 지역까지 한정되어 나타난다. 그에 따라 하층에 고기압성 순환은 인도-차이나 반도 지역에 나타나고 그 상층에는 저기압성 순환의 열대 지역 열적 forcing에 의한 경압 대기 구조가 형성된다. 인도-차이나 반도 상층 저기압성 순환으로부터 Rossby 파동 전파를 통해 동아시아에 상층부터 하층까지 순압 구조의 고기압성 편차가 형성되어 우리나라에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 이러한 메커니즘은 서태평양 지역 (90-120E) 영역 평균한 Latitude-Height vertical cross section을 통해서 확인할 수 있다 (Figure 39). 한편, 아라비아 반도의 상층 고기압성 순환의 형성은 두 가지 루트로 생각해 볼 수 있는데, 먼저 북대서양의 음의 해수면 온도 편차로부터 유도된 북대서양 저기압성 순환, 유럽 고기압성 순환, 우랄산맥 동쪽의 저기압성 순환의 파동 구조가 형성되는데, 이는 East Atlantic-West Russia pattern으로 알려진 구조이다. 이 파동 구조의 일환으로써 아라비아 반도 지역으로 상층 고기압성 순환이 영향을 받은 것으로 분석된다. 또 다른 루트로는 서인도양의 대류 강화 신호를 생각할 수 있는데, 관련 열적 forcing으로 인해 하층에 저기압성 순환, 아라비아 반도 상층에 고기압성 순환이 형성된 것으로 보인다.

두 번째 모드와 관련해서는 순압 구조의 고기압성 순환의 중심이 우리나라에 위치하는 만큼 우리나라 12월의 고온 경향성이 매우 뚜렷하게 나타난다 (Table 8). 반면, 강수는 평년과 비슷하거나 높은 경향이 우세한데 고기압성 순환의 중심이 우리나라에서 약간 동쪽으로 치우치면 강수가 증가할 수 있는 조건이지만, 중심의 위치가 우리나라에 위치한다면 강수가 적을 수 있는 구조로서, 기온처럼 강수에는 뚜렷한 경향성이 나타나지는 않는다.

POS PC2, Subseasonal Variability

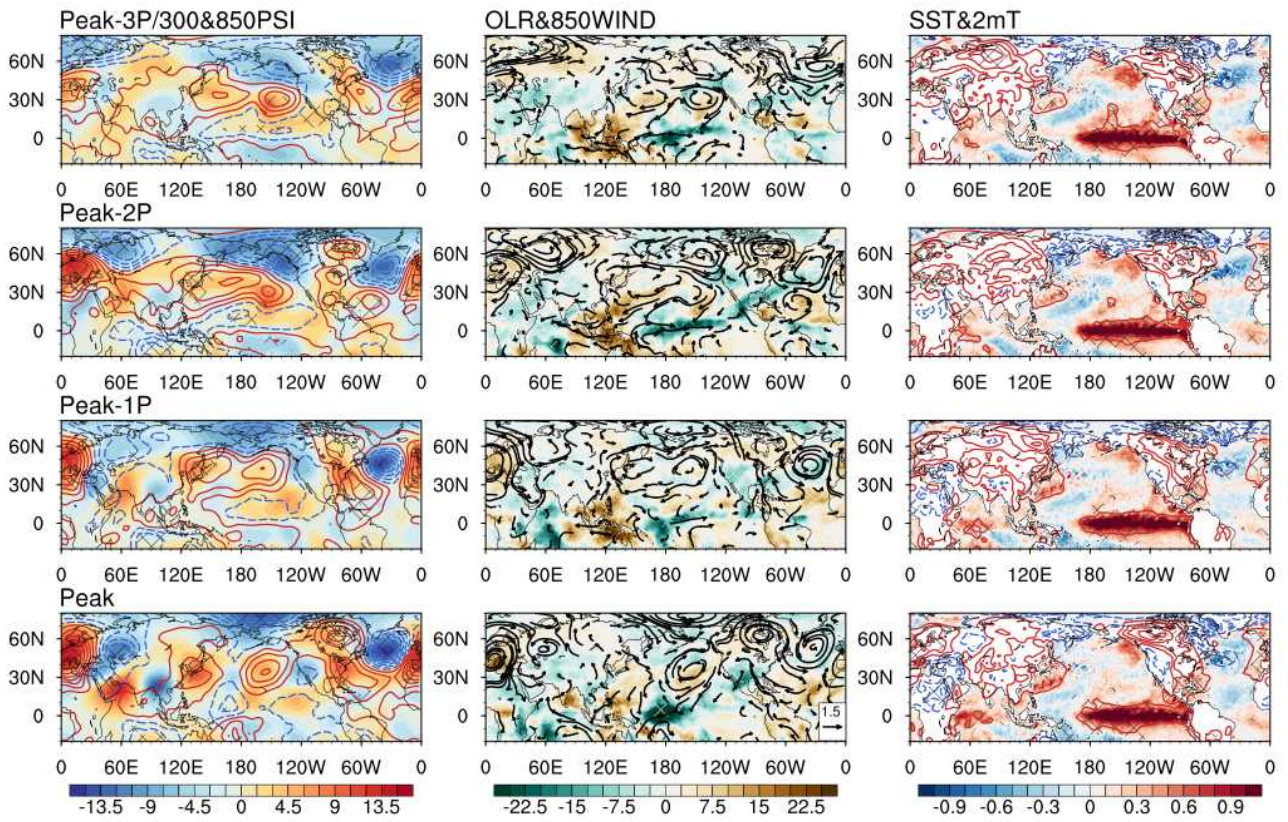


Figure 38. Same figure as in Figure 32 but for the positive PC2 category.

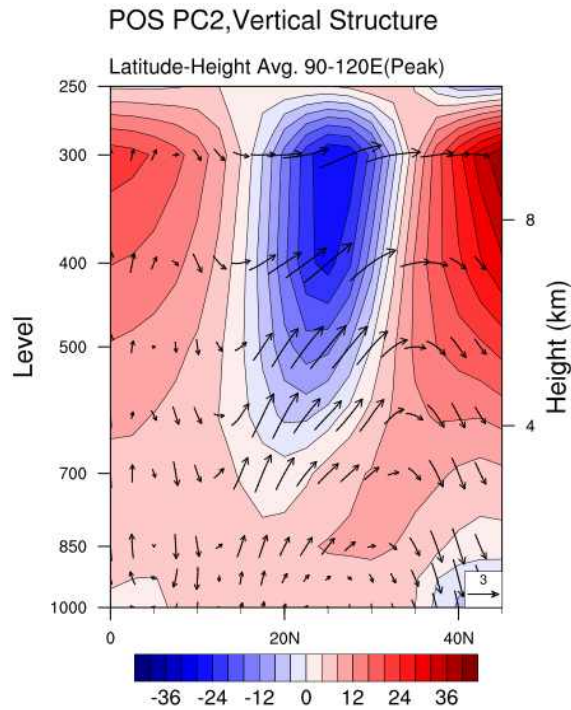


Figure 39. Same figure as in Figure 33 but for the positive PC2 category.

Table 8. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the positive PC2 category.

Year	NINO3.4	Temperature	Precipitation
1986	1.2	1.8	45.9
1987	1.1	0.4	4.8
1994	1.1	0.9	15.2
2006	0.9	0.6	20.9
2015	2.6	2.1	40.6
2018	0.8	-0.3	28.4
2019	0.5	1.4	26.5

마지막으로 두 번째 모드가 negative phase인 경우의 특성을 살펴보았다. Figure 40의 SST 패턴을 살펴보면, 열대 중·동 태평양의 음의 해수면 온도 편차, 즉 라니냐의 형태가 나타나지만, 통계적으로 유의한 편차는 동태평양 일부 지역에 한정되어 뚜렷한 라니냐 패턴을 나타내지 않는다. 이는 첫 번째 모드가 negative phase 일 때 뚜렷한 라니냐 형태가 나타나는 것과 구별되는 현상이다. 즉, 장의 서두에 두 EOF 모드가 모두 Nino3.4 지수와 상관계수가 0.4 이상으로 높게 나타나는 점을 언급하였는데, 이는 첫 번째 모드가 라니냐와 밀접한 관계, 두 번째 모드가 엘니뇨와 밀접한 관계를 나타내기 때문으로 엘니뇨와 라니냐가 두 EOF 모드와 맺는 비대칭적인 관련성을 보여준다. SST 패턴을 좀 더 살펴보면, 첫 번째 모드의 라니냐 패턴과 구별되는 특징으로는 인도양의 음의 해수면 온도 편차와 그린란드 남쪽의 양의 해수면 온도 편차를 확인 할 수 있다. 대류 패턴 및 상·하층 대기 패턴은 두 번째 모드가 positive phase일 때와 전반적으로 반대 부호를 나타낸다. 즉, 서인도양 대류 억제, 서태평양 대류 강화, 중태평양 대류 억제의 뚜렷한 zonal tripole 구조를 나타내고, 상층 대기는 아라비아 반도, 인도-차이나 반도, 동아시아의 파동 구조 및 대서양의 음의 NAO 패턴과 관련하여 유럽 저기압, 우랄산맥 동쪽 고기압성 순환의 East Atlantic-West Russia 패턴을 나타낸다. 하층 대기는 인도양 북부 지역 저기압성 순환, 동아시아 지역으로 저기압성 순환으로 인도양 지역으로는 경압 대기 구조를, 동아시아 지역으로는 순압대기 구조를 나타낸다.

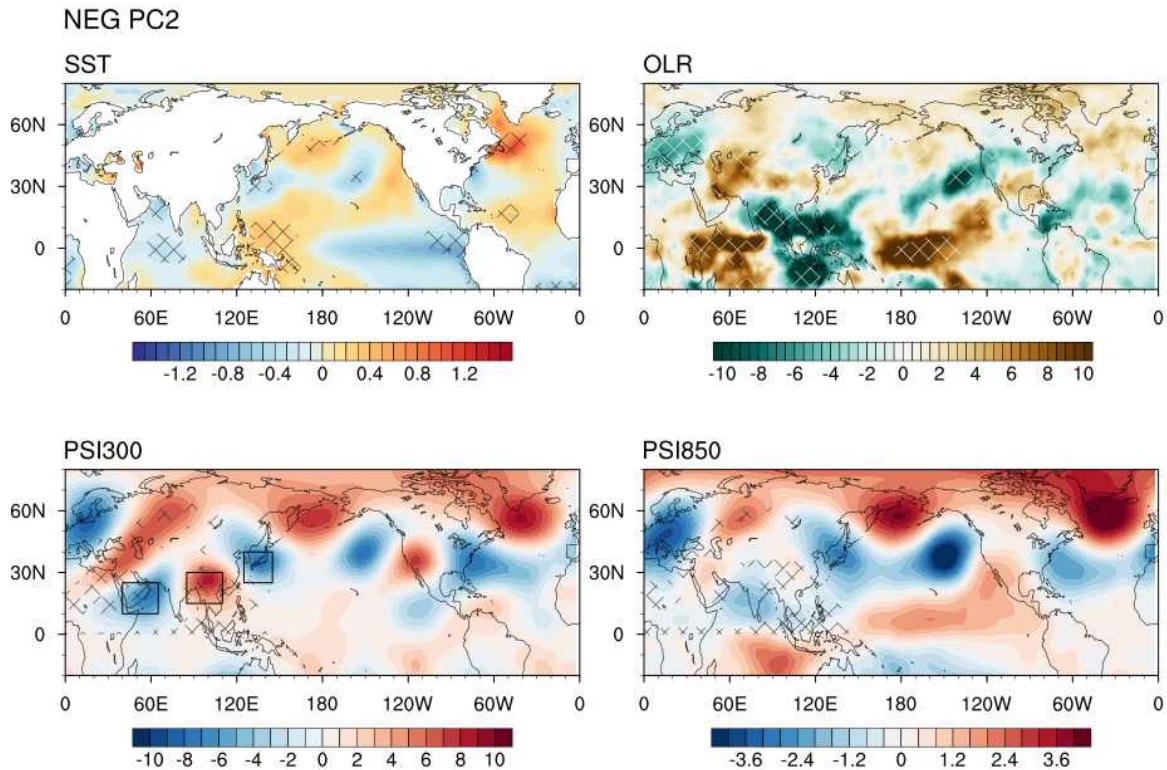


Figure 40. Same figure as in Figure 31 but for the negative PC2 category.

Figure 41은 두 번째 모드가 negative phase일 때 나타나는 상층 대기 순환 패턴 형성의 계절 내 시간 규모에서 상세 메커니즘을 나타낸다. 두 번째 모드의 positive phase에서 설명된 바와 같이 서태평양 지역의 대류 강화 신호와 관련된 하층의 저기압성 순환과 상층의 고기압성 순환, 그리고 동아시아로 파동 전파를 통해 하층부터 상층까지 저기압성 순환이 형성되는 모습을 확인 할 수 있다. 이러한 역학 과정은 Figure 42의 서태평양 지역 Latitude-Height vertical cross section을 통해서도 확인 가능하다. 아라비아 반도의 상층 저기압성 순환의 경우 북대서양의 양의 해수면 온도 편차로부터 유도된 음의 NAO signal이 유럽 저기압성 순환, 우랄 산맥 동쪽 고기압성 순환을 나타내는 East Atlantic-West Russia 패턴을 만들어 내고, 다시 인도양 방향으로 파동이 전파되어 아라비아 반도로 상층 저기압성 순환이 형성된 것으로 보인다.

Table 9에 나타난 우리나라 12월 기온과 강수 경향을 살펴보면, 우리나라를 중심으로 하층부터 상층까지 저기압성 순환이 위치하면서 뚜렷한 저온 편차가 나타난다. 강수의 경우 평년과 비슷하거나 많은 경향이 있다. 이는 첫 번째 모드가 negative phase일 때 우리나라 12월 기온이 평년과 비슷하거나 높은 경향이 있는 것과는 구별되는 특징이다. 즉, 라니냐 phase 일 때 우리나라 12월 기온이 높을 수 있는 메커니즘과 낮을 수 있는 메커니즘이 모두 나타나는 것으로 라니냐와 우리나라 12월 기온과의 비선형적인 관련성을 나타낸다. 첫 번째 모드와 두 번째 모드가 각각 positive, negative phase일 때 Nino3.4 지수, 12월 우리나라 기온, 강수 경향을 한 눈에 알아볼 수 있는 자료를 Figure 43에 나타내었다.

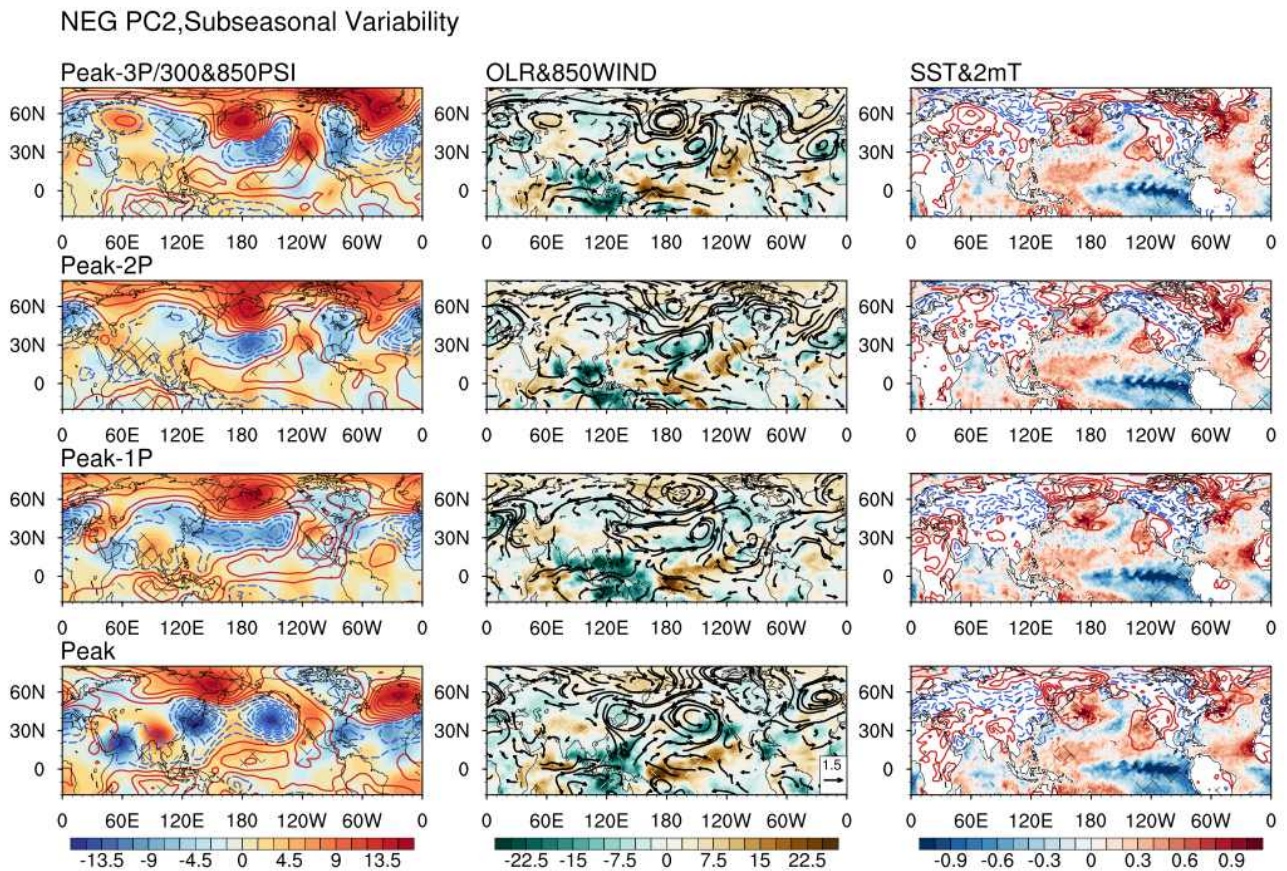


Figure 41. Same figure as in Figure 32 but for the negative PC2 category.

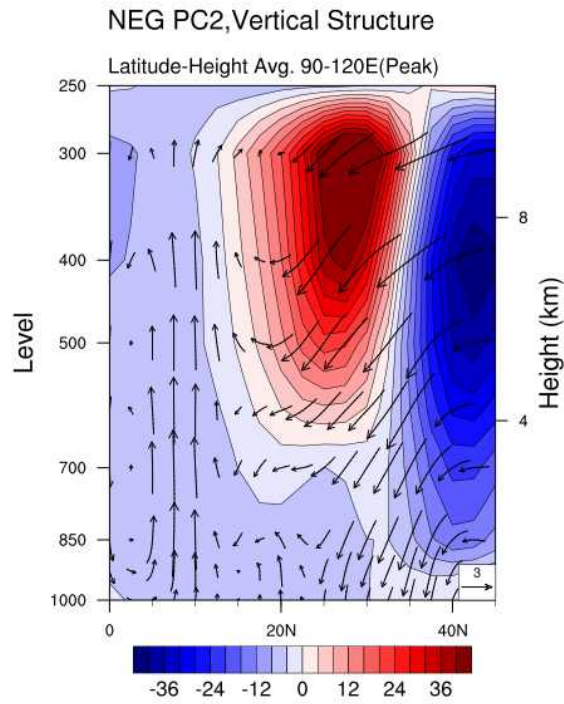


Figure 42. Same figure as in Figure 33 but for the negative PC2 category.

Table 9. The Nino3.4, Korean temperature and precipitation anomaly for the individual year of the negative PC2 category.

Year	NINO3.4	Temperature	Precipitation
1980	0.0	-2.9	35.1
1996	-0.5	0.3	25.7
2005	-0.8	-3.7	16.1
2010	-1.6	-0.6	28.8
2014	0.7	-2.0	25.5
2017	-1.0	-1.6	22.0

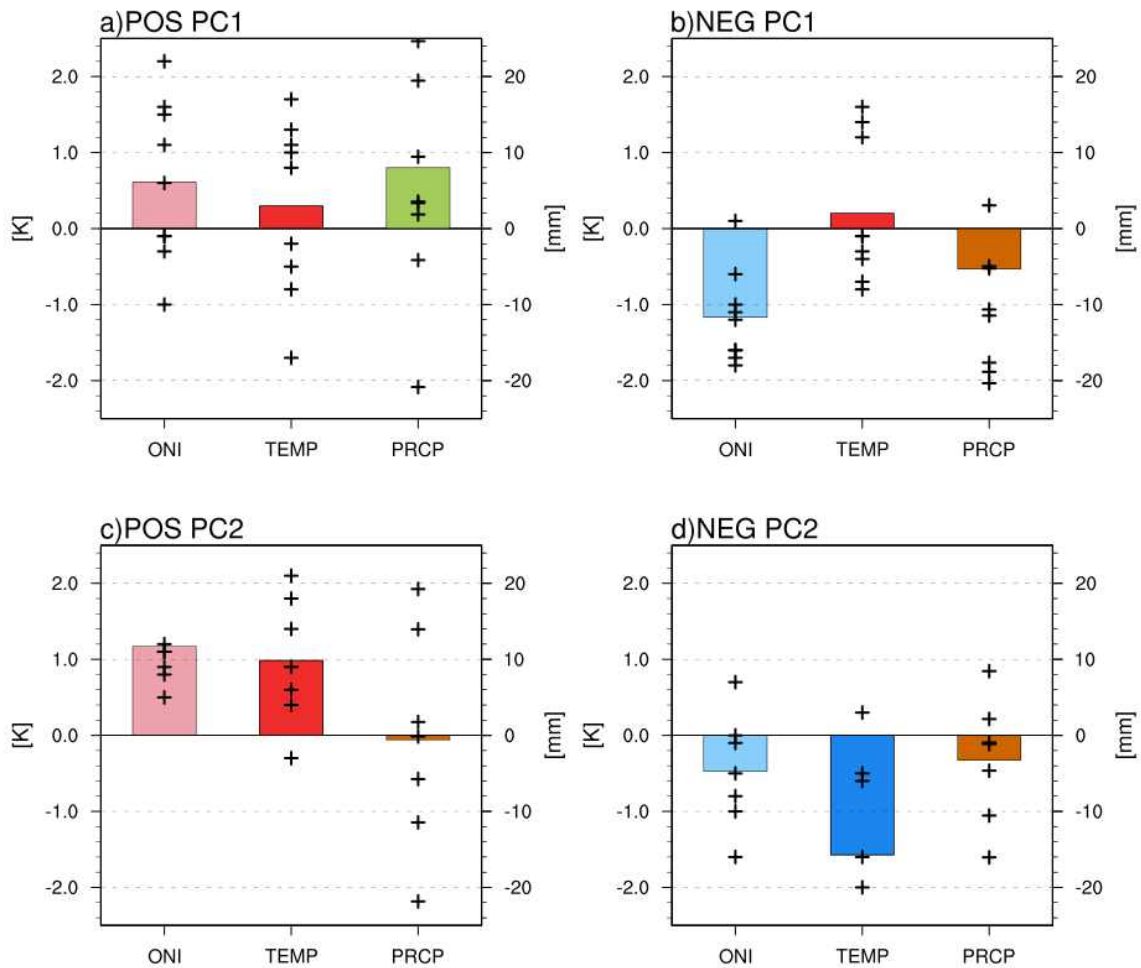


Figure 43. The composite of monthly ONI, Korean SAT and precipitation anomaly for December for the positive and negative phases of first and second EOF modes. The overlaid marks denote individual cases comprising the composite.

(4) 요약과 결론

이 연구에서는 인도양의 열적 강제력과 관련된 아열대 유라시아 대륙 대기 상층 순환 패턴을 규명하고 우리나라 12월 기온, 강수와의 관련성을 살펴보았다. EOF 분석을 통해 두 가지 모드가 추출되었는데, 첫 번째 모드는 아열대 유라시아 대륙에 동·서 방향으로 길게 발달한 저(고)기압성 순환 패턴이고, 두 번째 모드는 아라비아 반도-인도차이나 반도-동아시아 지역으로 뚜렷한 파동 전파의 형태가 나타난다. 첫 번째 모드는 negative phase 일 때 라니냐의 특성이 positive phase 일 때 엘니뇨 특성보다 뚜렷하게 나타난다. 상층의 동서 방향 저(고)기압성 순환은 주로 인도양 북부 지역의 대류 억제(강화)로 인한 경압 대기 반응으로 형성된 것으로 보인다. 인도양에는 뚜렷한 해수면 온도 편차가 나타나지 않고 열대 대서양에 각각 저(고)온 편차가 유의하게 나타난다. 두 번째 모드는 positive phase 일 때 엘니뇨의 특성이 negative phase 일 때 라니냐의 특성보다 뚜렷하게 나타난다. 특히 그린란드 남쪽 북대서양의 저(고)온 편차와 인도양의 고(저)온 편차가 유의하게 나타난다. 인도차이나반도와 동아시아의 파동 전파

구조는 서태평양의 대류 억제(강화) 신호로부터 유도되는 Rossby 파동 전파로 이해할 수 있는 한편, 아라비아 반도의 상층 대기 패턴은 서인도양의 대류 및 대서양의 NAO로부터 유도된 East Atlantic-West Russia pattern의 영향으로 해석 가능하다.

우리나라 12월 기온은 라니냐 시기일 때 그 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않는데, 이 연구를 통해 그 메커니즘을 일정 부분 설명 할 수 있다. 즉, 라니냐 발달 시 열대 대서양 warming signal을 동반하는 경우, 아열대 유라시아 대륙에서 상층 고기압성 순환이 발달하면서 차가운 대륙 고기압이 우리나라로 영향을 미치는 부분을 상쇄 시켜주는 역할을 하여 평년과 비슷하거나 높은 기온을 나타낸다. 1998, 2007, 2016년의 경우 강한 라니냐가 나타났지만 이러한 메커니즘이 작용하여 평년보다 높은 기온을 기록한 바 있다. 반면에 라니냐와 함께 북대서양에 고온 편차가 나타나고, 인도양에 저온 편차가 나타나는 경우 아라비아 반도부터 파동 전파 패턴을 통해 우리나라 기온이 낮아지는데, 2005, 2017 라니냐의 경우 우리나라 12월에 강한 한파를 동반한 바 있다. 이와 같이 ENSO, 인도양, 대서양의 해수면 온도 감시를 통해서 라니냐 시기에 우리나라 12월 기온, 강수 변동성이 어떻게 나타나는지 예측에 활용할 수 있다.

3. 여름철과 겨울철 기후 전망을 위한 선행 예측인자 개발

가. 여름철 수시 기온 예측을 위한 제안

(1) 연구배경

여름철은 장기예보의 활용도가 가장 높은 계절 중 하나로써 장기예보를 활용한 방재나 에너지 계획을 보다 효율적으로 수립하기 위해서 예측 정보의 제공 시점이 중요하다. 이 과제에서는 기존 예측 정보 제공 시점(5월)보다 한 달 앞선 4월(수시)에 여름철 예측을 가능하도록 수시 여름철 기온 전망을 위한 예측인자를 제시하고 이에 더해 예측력 향상을 위한 기법을 개발하고 검증하였다. 여름철은 다른 계절에 비해 기온 예측인자의 수가 많은 편이므로 예측인자를 새롭게 발굴하기보다 기존의 인자를 효과적으로 사용하는 방법을 모색하였다. 첫째, 지속성이 있어 인자의 시점을 앞당겨도(예, 3월 값 사용) 예측성이 유지되는 인자를 선별하고자 한다. 둘째, 예측인자가 3~5개월의 시차를 두고 한반도 여름 기온에 영향을 미치는 상세기작을 이해하고 이러한 기작이 예측 시점에 구현되고 있는지를 모니터링하는 기법을 개발하여 실질적인 예측성 향상을 도모하고자 한다.

(2) 자료

본 연구에서 사용된 자료는 NCEP-NCAR Reanalysis 1 로써 200h Pa, 500 hPa, 850 hPa의 월별 지위고도(각각, HGT200, HGT500, HGT850), 500 hPa 수직운동(OMG500)을 사용하였다(Kalnay et al. 1996). SST의 경우 ERSST v5, OLR의 경우 NOAA monthly interpolated OLR를 이용하였다. 대기 원격상관 패턴(Polar/Eurasian 패턴, East Atlantic/Western Russia 패턴)은 NOAA Climate Prediction Center archives로부터 획득하였다(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>).

(3) 예측인자 시점 앞당김 및 상세기작 유사성 예측법

(가) 예측인자 시점 앞당김

연구에 사용된 6월, 7월, 8월 기온 예측인자를 Table 10에 나열하였다. 이 예측인자들은 장기예보 가이드스(KMA, 2018)와 Xie et al. (2009), Ham et al. (2013), Lim and Seo (2019), Myoung (2021)의 최신 연구 결과에 기반한 인자들이다.

Table 10. Predictors of June mean temperature

Predictor	Variable	Location	Month	Reference
NI4Jan	SST	145E-180E/10S-15N	Jan	KMA (2018)
SNC	Snow cover	103E-133E/45N-50N	Mar	KMA (2018)
NAD	SST	60W-20W/40N-60N minus 60W-40W/20N-40N	Apr	Lim&Seo (2019)
NP	SST	160W-120W/20N-40N	May	Lim&Seo (2019)
WP	SST	120E-140E/0-20N	Apr	Lim&Seo (2019)
PE_DJF	Polar/Eurasia		Dec~Feb	Myoung (2021)
PE_FMA	Polar/Eurasia		Feb~Apr	Myoung (2021)
N.TAApr	SST	300E-330E/0-30N	Apr	Ham et al. (2013)
TA	SST	300E-358E/30S-30N	Apr	Ham et al. (2013)
IO_lrg	SST	40E-100E/10S-20N	Apr	Xie et al. (2009)

Table 11. Predictors of July mean temperature

Predictor	Variable	Location	Time	Reference
NAmE850	HGT850	265E-300E/20N-40N minus 225E-295E/50N-65N	Apr	KMA (2018)
EU500	HGT500	10E-40E/25N-45N plus 60E-90E/20N-50N minus 0-45E/55N-70N	Mar	KMA (2018)
BerSea	SST	180E-205E/55N-65N	Mar-Apr	KMA (2018)
SNC_JA	Snow cover	120E-140E/40N-50N	Apr	KMA (2018)
IOApr	SST	90E-105E/10S-0N	Apr	KMA (2018)
PacTri	SST	90E-120E/25S-40S plus 120E-140E/0-20S minus 90E-110E/10S-5N	Apr	KMA (2018)
NAD	SST	60W-20W/40N-60N minus 60W-40W/20N-40N	Apr	Lim&Seo (2019)
NP	SST	160W-120W/20N-40N	May	Lim&Seo (2019)
WP	SST	120E-140E/0-20N	Apr	Lim&Seo (2019)
PE_DJF	Polar/Eurasia		Dec~Feb	Myoung (2021)
PE_FMA	Polar/Eurasia		Feb~Apr	Myoung (2021)
TA	SST	300E-358E/30S-30N	May	Ham et al. (2013)

Table 12. Predictors of August mean temperature

Predictor	Variable	Location	Time	Reference
N.AusFeb	SST	110E-145E/20S-15N	Feb	KMA (2018)
SNC_A	Snow cover	105E-135E/48N-60N minus 50E-70E/45N-55N	Apr	KMA (2018)
SNC_JA	Snow cover	120E-140E/40N-50N	Apr	KMA (2018)
IOApr	SST	90E-105E/10S-0N	Apr	KMA (2018)
NAApr	SST	320-E360E/55N-65N	Apr	KMA (2018)
NAD	SST	60W-20W/40N-60N minus 60-40W/20N-40N	Apr	Lim&Seo (2019)
NP	SST	160-120W/20N-40N	May	Lim&Seo (2019)
WP	SST	120E-140E/0-20N	Apr	Lim&Seo (2019)
PE_DJF	Polar/Eurasia		Dec~Feb	Myoung (2021)
PE_FMA	Polar/Eurasia		Feb~Apr	Myoung (2021)
TA	SST	300E-358E/30S-30N	Jun	Ham et al. (2013)
IO	SST	40E-100E/10S-20N	Jun	Xie et al. (2009)

여름철 기온 및 강수에 대한 4월 수시 예측 시 기존 여름철 예측인자를 사용하는데 있어 문제점은 가용한 대기 및 해양 자료가 최대 3월까지인 반면 여름철 예측인자는 대부분 4~5월 자료를 사용한다는 점이다. 예를 들어 Table 11의 7월 기온 예측인자 12개 중 수시 예측시 가용한 예측인자는 두 개(EU500, PE_DJF)뿐이다.

이러한 상황에서 4월 수시 예측을 위한 인자 발굴을 위해 새로운 예측인자를 개발하기 보다는 가용한 예측인자 중 인자 추출 시점을 3월로 앞당길 경우에도 예측성 하락이 크지 않은 인자들을 선별하여 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 예를들어, 지속성 있는 예측인자(SST등)의 경우에는 4월 시점의 인자를 3월 시점으로 앞당겨도 예측성 변화가 크지 않을 수 있기 때문이다.

이러한 가설을 검증하기 위해 예측인자 시점 앞당김에 따른 예측성의 변화를 살펴보았다. 예측성은 각각의 감시 인자에 대한 3분위 예측성을 테스트하였는데 예측인자와 7월의 평균온도에 대하여 각 변수가 정규분포를 따른다고 가정한 후 1981~2010년의 30년(구평년)에 대한 $\pm 0.43 \times$ 표준편차(σ)의 기준값에 대해 Above-Normal(AN), Below-Normal(BN), Near-Normal(NN)의 3분위로 구분하였다.

Accuracy(ACC)는 33년의 기간(1981-2013년, $T=33$)에 대하여 AN, BN, 또는 NN을 적중한

경우의 수를 nAN , nBN , nNN 이라 했을 경우

$$ACC = \frac{(nAN+nBN+nNN) \times 100}{T} \quad [1]$$

로 계산하였다.

Heidke Skill Score(HSS)는 NOAA Climate Prediction Center의 정의를 따라

$$HSS = \frac{(nAN+nBN - T/3) \times 100}{T \times 2/3} \quad [2]$$

로 계산하였다.

인자의 시점 앞당김에 따른 ACC의 변화를 Figure 44에 나타내었다. 4월 이후의 값을 기반으로 한 인자들의 경우는 시점을 3월로 앞당겼으나 기본적으로 3월 또는 그 이전의 값을 기반으로 하는 인자의 경우는 기준 월을 바꾸지 않았다. 6월 기온 예측의 경우 인자의 시점을 3월로 앞당길 경우 NP 인자의 경우를 제외한 나머지 인자들에서 예측성이 유지되거나 오히려 증가하는 형태를 보였다. 7월의 경우 NAm850의 대기변수는 예측성이 감소하지만 대부분의 인자에서 예측성이 유지되거나 상승하였고 8월의 경우 눈덮임 인자들은 예측성이 약간 감소하였으나 NP, WP, TA인자 같은 SST 기반 인자의 경우 예측성이 상승하였다. 이러한 결과들을 종합해 보면 지위고도 기반 인자 또는 눈덮임 기반 인자의 경우 예측성이 약간 하락하는 반면 SST 기반 인자는 3월 시점으로 앞당겨도 예측성이 유지되거나 오히려 증가하여 수시 예측에 해당 인자를 사용할 수 있음을 의미한다. HSS의 결과도 유사한 결과를 보였다(그림 없음).

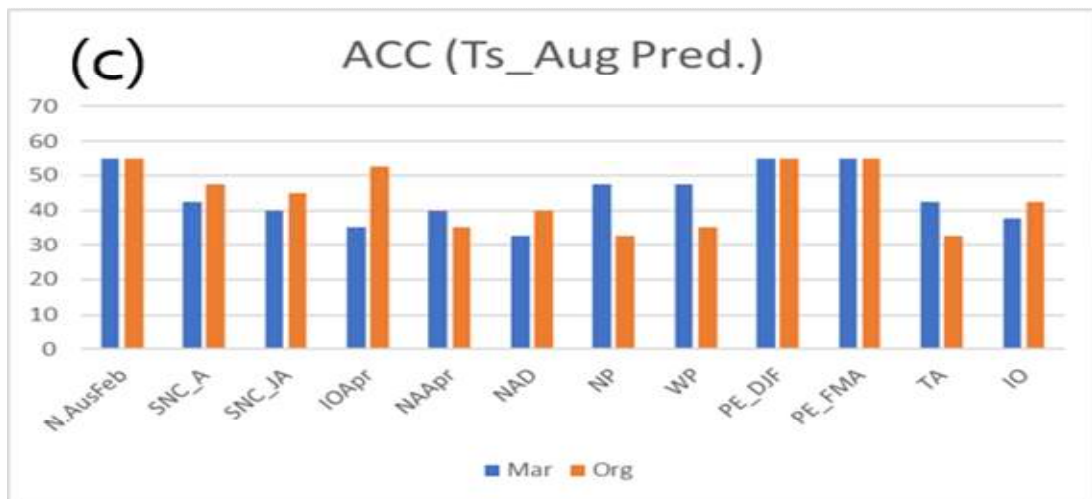
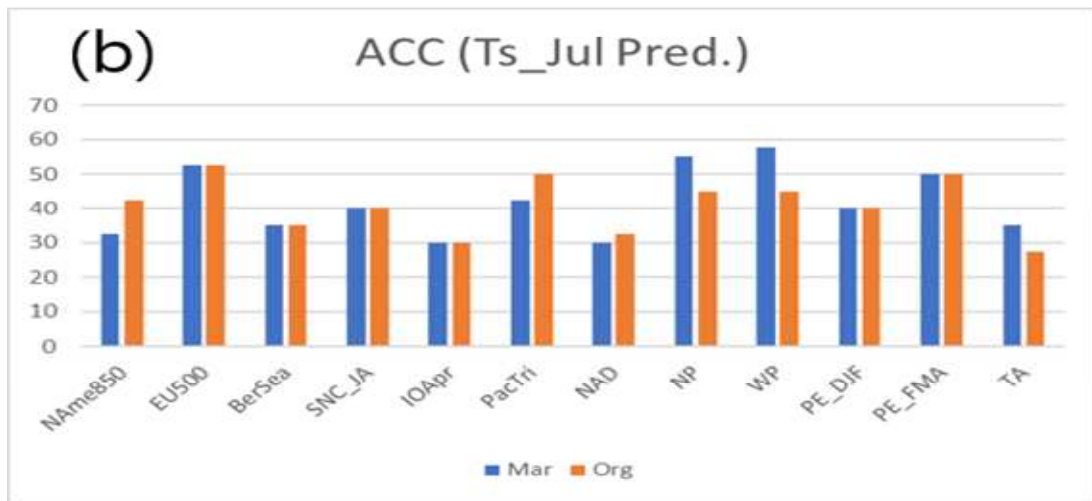
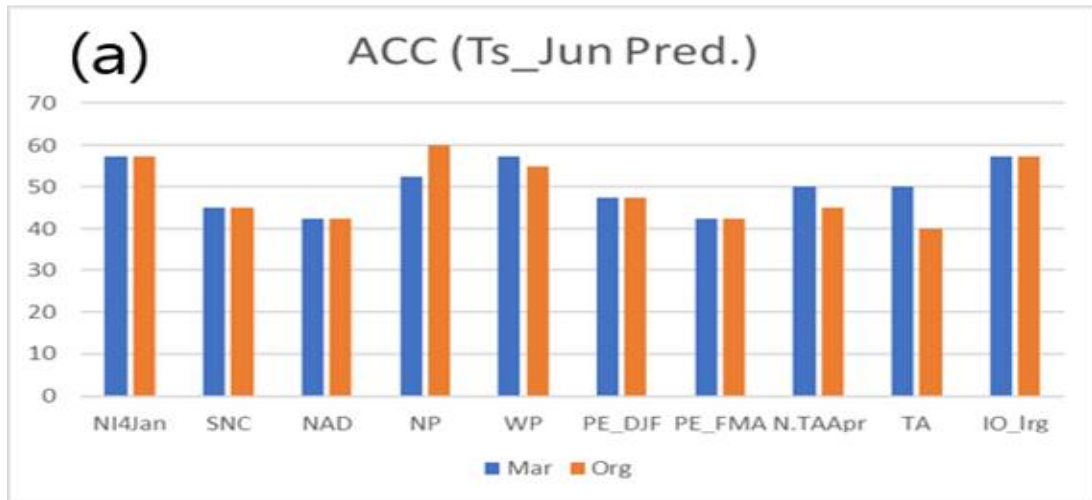


Figure 44. Accuracy (ACC) of predictors (1981-2013) in (a) June, (b) July, and (c) August. Blue (orange) bars indicate accuracy based on the values in March (original month in Tables 10-12).

예측 값을 3월 값으로 대체할 경우 구평년 기간(1981-2010년)에서 신평년 기간(1991-2020년)으로의 평년 변경에 따른 예측성 변화 역시 살펴보았다. 평년 기간의 변동은 예측인자와 월 평균 기온 두 변수에 동시 적용하였고 이는 인자 및 기온 편차의 변화뿐 아니라 표준편차 σ 의 변화도 의미한다. Figure 45(ACC)와 Figure 46(HSS)에 따르면 6월의 경우 대부분의 인자에서 예측성의 하락이 나타나는데 이는 6월 평균기온의 경우 온난화 경향이 강하여(0.3°C/10년) 평년 변경에 의해 예측성이 하락하는 것으로 추측된다.

온난화 경향이 크지 않은 7월과 8월의 경우는 6월과는 달리 신평년 변경에 의한 예측성 하락이 적은 편으로 대부분의 인자에서 예측성이 유지되거나 증가하였다.

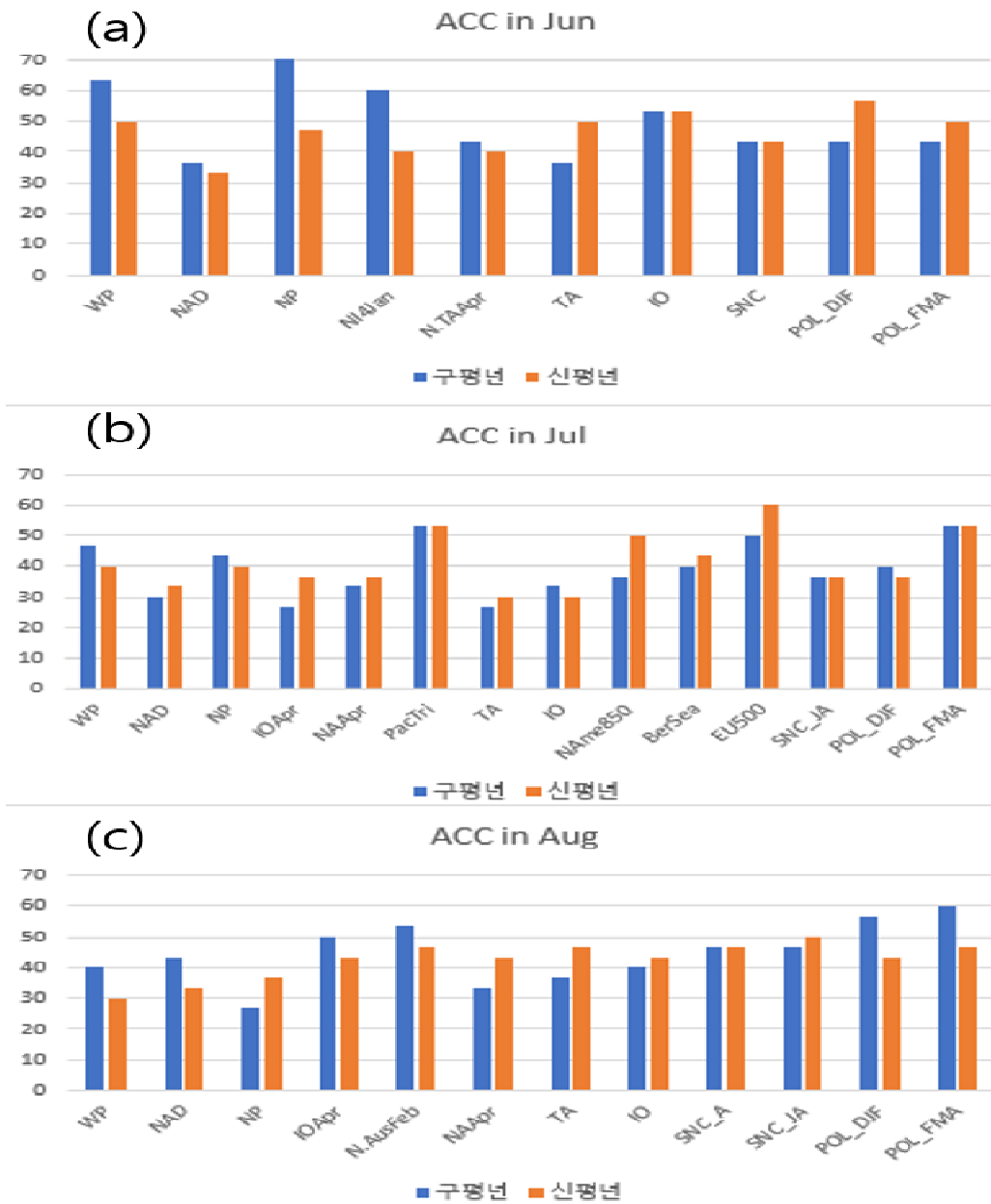


Figure 45. Accuracy (ACC) of predictors (1991-2020) in (a) June, (b) July, and (c) August. Blue (orange) bars indicate accuracies based on the past climatology period, 1981-2010 (new climatology period, 1991-2020).

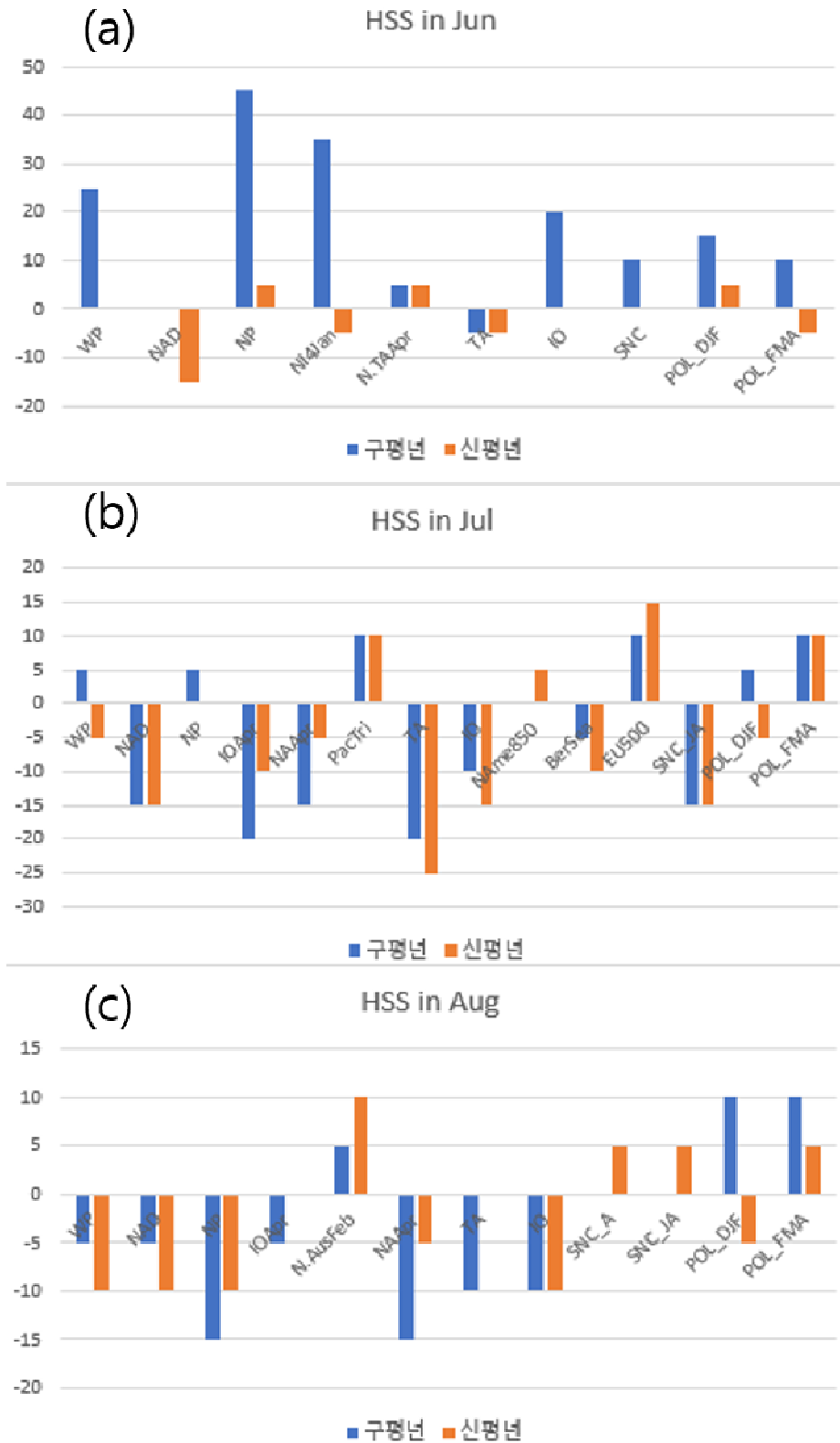


Figure 46. Heidke Skill Score (HSS) of predictors (1991–2020) in (a) June, (b) July, and (c) August. Blue (orange) bars indicate accuracies based on the past climatology period, 1981–2010 (new climatology period, 1991–2020).

(나) 상세기작 유사성 예측법 개발 및 적용

시점 앞당김을 통해 예측인자를 확보한다 하여도 대다수 예측인자의 ACC는 50% 미만이라는 한계가 존재한다. 예측인자를 이용한 여름철 기온 예측이 실질적으로 예측성 향상에 기여하기 위해서는

- 1) 예측인자가 한반도 기온에 영향을 미치는 상세적인 기작에 대한 이해,
- 2) 이러한 상세기작이 예측 시점에 잘 작동하고 있는지에 대한 모니터링

이 필요하다. 즉, 단순히 감시 인자의 편차에 따른 예측 월의 기온 편차(평년 이상 또는 평년 이하)를 전망하는 것이 아니라 감시 인자가 대기와 해양에 미치는 영향을 이해하고 이러한 영향들이 예측 시점에 잘 나타나고 있는지를 함께 모니터링할 경우 예측성 향상을 꾀할 수 있다. 이러한 필요성에 따라 2020년 “이상기후 장기예보 개선을 위한 전망정보 표현방식 연구” 과제에서 예측인자 상세 역학과정 검증 시스템을 개발하여 해당 해에 잘 구현된 또는 구현되지 못한 예측인자를 구별하는 시스템(Figure 47)을 개발하였었다. 개발된 상세 역학 과정 검증 시스템은

- 1) 예측인자와 lead/lag를 고려한 대기 변수(월평균 HGT500, OMG500)와의 지점별 상관관계(과거 33년, 1981-2013)를 예측인자가 한반도 주변 대기에 미치는 영향으로 규정(Figure 47a and b),

- 2) 예측하고자 하는 월에 해당 대기 변수의 편차장(지점별)을 계산(Figure 47c and d),

- 3) 1)과 2)의 공간적 유사성을 동아시아 지역(EA: 90-165E/10-50N)에 대해 패턴상관계수(Pattern Correlation Coefficient, PCC)로 계산함(Figure 47e and f의 붉은 박스 안의 값)

으로써 해당 예측 인자가 중층 지위고도와 중층 수직운동장에 미치는 영향이 해당 해와 월에 잘 구현되었는지(즉, 상세기작 유사성)를 확인을 시스템이다. 이러한 시스템을 이용하여 인자의 경향성 뿐 아니라 감시 인자가 대기와 해양에 미치는 영향을 함께 모니터링할 경우 예측성이 향상됨을 밝힌 바 있다.

예측인자와 월별
lead/lag 상관관
계: 예측인자 vs
대기변수 과거
연관성 구축
(1981-2013)

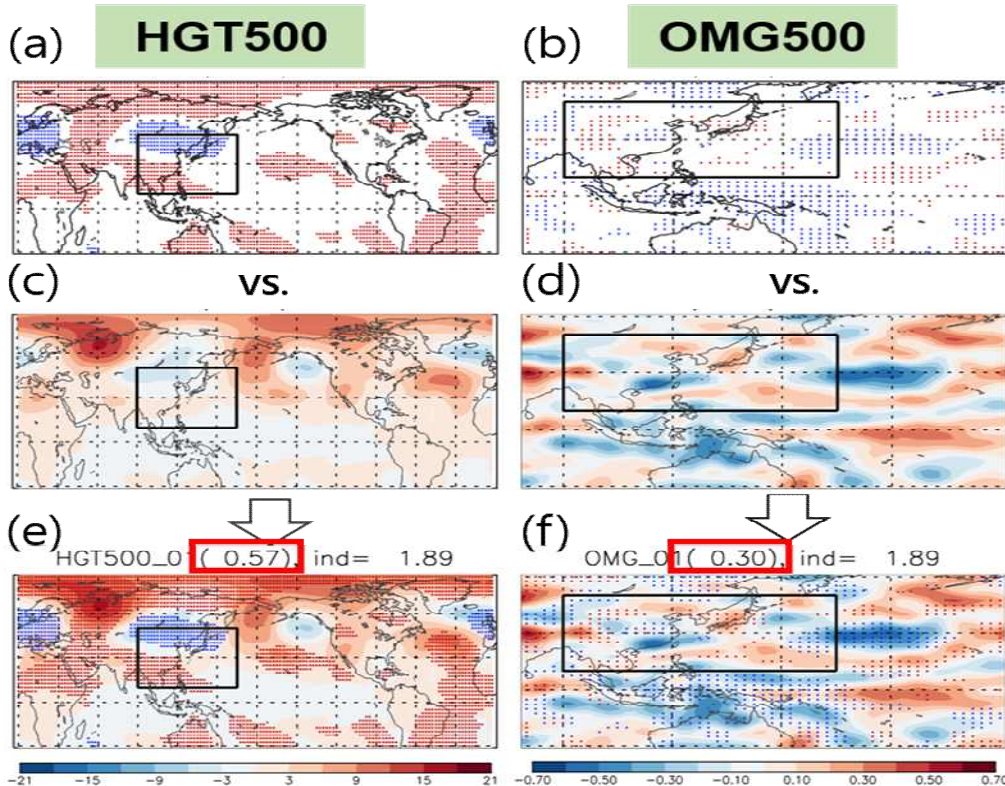


Figure 47. Lead/lag correlation (1981-2013) maps of a predictor (PE_DJF) (a) with HGT500 and (b) with OMG500. Red and blue dots indicate statistically positive and negative significant correlations at the 80% level, respectively.. Anomaly maps of (c) HGT500 and (d) OMG500 in a specific month of prediction. (e) is (c) overlaid by (a) while (f) is (d) overlaid by (b). The number in the red box of (e) is pattern correlation coefficient (PCC) between the correlation values and the anomaly values of HGT500 in the black solid box of East Asia. The number in the red box of (f) is that of OMG500 not of HGT500.

2021년에는 이 시스템을 1~3월 결과에 적용하여 수시 예측을 시도하는 상세기작 유사성 예측법을 고안하여 적용하였다(Figure 48). 즉 기존의 예측 방법은 예측인자가 예측 목표 월 기온과 양의 상관관계를 갖을 경우 예측인자가 0.43σ 이상일 경우 고온을 예측하는 반면 상세기작 유사성 예측법은

- 1) 예측인자가 0.43σ 이상,
- 2) HGT500에 대한 PCC가 0.15 이상,
- 3) OMG500에 대한 PCC가 0.15 이상

의 세가지 기준을 동시에 충족한 경우에만 고온을 예측하는 방법으로 일종의 예측 기준을 강화한 것이라 볼 수 있다. 그 반대로 예측인자가 -0.43σ 이하이며 HGT500에 대한 PCC가 -0.15 이하, OMG500에 대한 PCC가 -0.15 이하의 세가지 기준을 동시에 충족한 경우에는 저온을 예측한다. 수시 예측에서는 1월, 2월, 3월 중 최소 한번 이상 상세기작이 유사하게 나타난 경우, AN 또는 BN으로 예측한다.



Figure 48. Prediction method based on similarity in detail-processes.

이러한 상세기작 유사성 예측법을 7월 기온 예측인자인 PE_DJF인자(Table 11)에 적용해보았다. PE 패턴은 극지역인 동시베리아 해로부터 열대 서태평양에 걸친 지역에 파동 형태의 지위고도 편차를 유도하는 것으로 알려져 있으며 겨울철 음의 PE 패턴은 대기 저층 남아시아에 저기압성 흐름, 북서태평양에 고기압성 흐름을 유도하여 열대 서태평양 및 필리핀 해에 남풍을 유도, 봄철 필리핀해 SST를 증가시킨다(Figure 55). 이때 필리핀해 주변에서 상층 양의 지위고도 편차와 하강기류가 나타나 대류는 억제된다. 여름철이 되면 가열된 필리핀해 주변에서 대류가 활발해지며 그 보상작용으로 북쪽에 위치한 한반도와 동아시아에 하강기류와 함께 큰 고기압이 발달하여 한반도에 고온과 폭염이 발생하게 된다. 이러한 역학기작은 2020년 “이상기후 장기예보 개선을 위한 전망정보 표현방식 연구” 과제에서 밝힌 바 있다. PE_DJF와 7월 기온과 상관수는 $-0.50(1991-2020)$ 로써 최근들어 상당히 높은 상관성을 보이고 있어 수시 여름철 기온 예측을 가능하게 한다(Figure 44 and Figure 45).

2018년 여름은 역대급 폭염이 한반도를 강타하며 7월 기온 편차는 2.0°C 를 기록하였다. 그해 PE_DJF 인자의 값은 -1.89 의 매우 낮은 값으로 고온을 예측하였다. 상세기작 유사성 예측법을 적용하여 Figure 49에 2018년 1월~7월의 대기장 편차장(컨투어) 위에 PE_DJF와 대기장과의 과거 상관관계(점)를 겹치고 동아시아 지역의 PCC 값을 괄호안에 나타내었다. Figure 49에서 보이듯이 1월과 2월에 동시베리아의 고기압성 흐름과 동아시아의 저기압성 흐름이 강하게 나타나는 등 음의 PE_DJF가 강하게 나타나면서 여름철엔 필리핀해의 대류현상이 활발해지며 한반도에 보상기작인 고기압성 흐름이 발달하는 형태가 상관관계와 편차장에 함께 나타나 1월, 2월, 6월, 7월, 8월에 $0.17\sim 0.7$ 의 PCC 값(Figure 50)을 갖는다. 이러한 결과는 PE_DJF 예측인자와 관련된 상세기작이 2018년에 1월과 2월에 잘 나타남을 의미하고 이러한 결과로 인해 7월 고온을 예측하였고 결국 적중하였다.

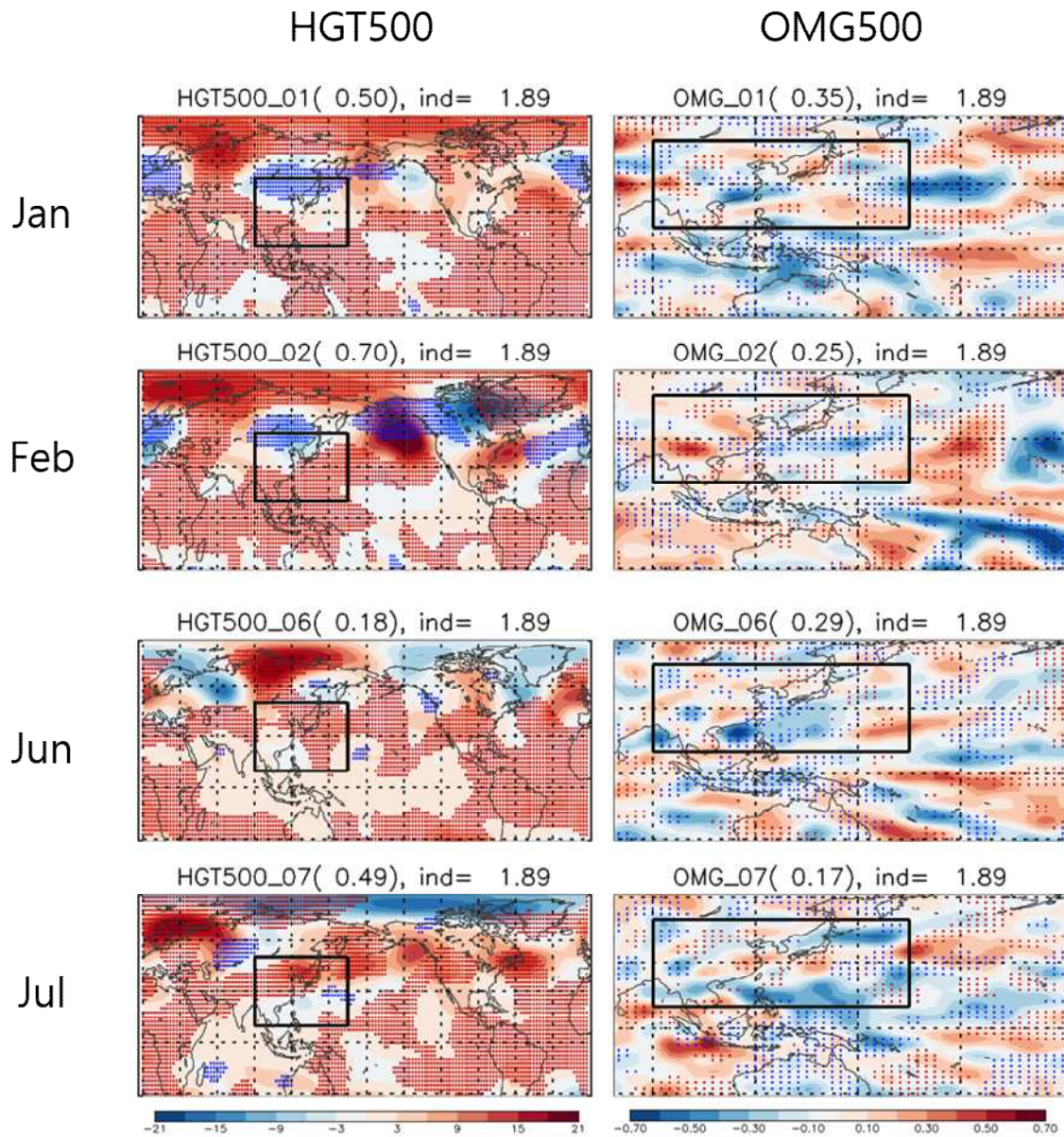


Figure 49. Monthly anomalies of HGT500 in 2018 (contours) overlaid onto the 33-year (1981-2013) correlations (dots) between PE_DJF and monthly HGT500 (dots) in January, February, June, and July (left column). Right column is for OMG500. Red and blue dots indicate statistically positive and negative significant correlations at the 80% level, respectively. Numbers in parentheses are the PCCs between the anomalies in 2018 and the 33-year correlation coefficients of each variable (i.e., HGT500 and OMG500) in the black solid box including Korean Peninsula.

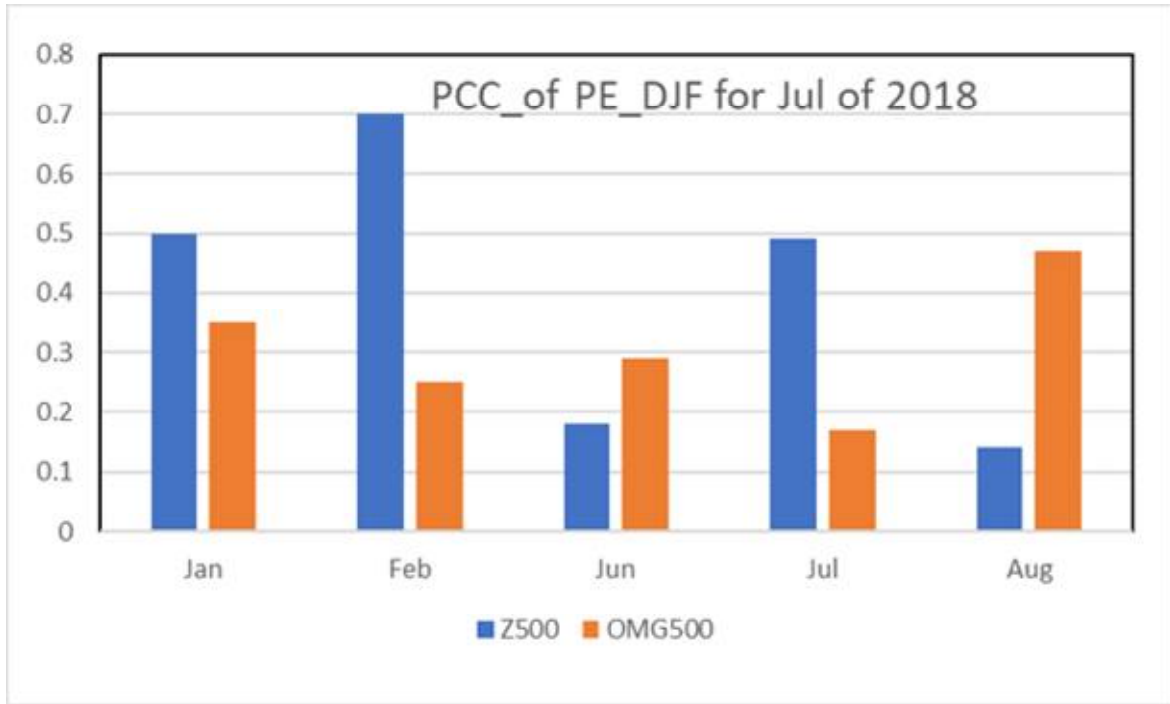


Figure 50. Monthly PCCs of HGT500 (blue) and OMG500 (orange) in 2018 for PE_DJF.

2018년 7월 기온 예측을 위해 모든 수시 예측인자에 상세기작 유사성 예측법을 적용한 결과를 Figure 51에 요약하였다. 12개의 인자중에 인자의 경향성만을 고려한 경우 AN, NN, BN을 예측한 인자의 개수는 각각 5개(NP, PacTri, WP, PE_DJF, PE_FMA), 4개(EU500, SNC_JA, IOApr, NAD), 3개(NAmer850, BerSea, TA)로 나타났다. 이중 상세기작까지 유사한 인자(1~3월 기간)는 NP, PacTri, WP, PE_DJF, 4개의 인자로서 모두 고온을 예측한 반면 저온을 예측한 인자들은 상세기작이 나타나지 않았다. 결과적으로 2018년 7월은 예측인자의 경향성만으로도 고온이 우세하였지만 상세기작 유사성의 관점에서도 고온을 예측하였고 결국 적중하였다.

	인자(Mar)	상세기작(동아시아: HGT500/OMG500)		
		Jan	Feb	Mar
NAmE850	BN			
BerSea	BN			
EU500				
SNC_JA				
IOApr				
NAD				
NP	AN		AN	AN
PacTri	AN		AN	
WP	AN	AN	AN	
PE_DJF	AN	AN		
PE_FMA	AN			
TA	BN			

AN	인자만 AN
AN	인자+기작 AN
BN	인자만 BN
BN	인자+기작 BN

Figure 51. Prediction and verification of July mean temperature in 2018 using 12 predictors itself and with the similarity of detail-processes. Blue and pink colored cells show BN and AN based on predictor itself, respectively. Red colored cells show AN based on the similarity of detail-processes. AN_tru indicates success of AN temperature based on the similarity of detail-processes.

이와는 반대로 2020년 7월에는 -2.1°C 로 역대 5위의 저온이 발생하였다. 3월 인도양 SST(IO, Table 11)의 경우 7월 기온과 음의 상관관계를 보인다. Xie et al. (2009)에 따르면 이전 겨울철에 발생했던 엘니뇨가 봄철이 되어 약화됨에도 불구하고 서태평양에서 고기압성 흐름이 여름철까지 유지되는 현상으로 그 배경에는 봄철 고온의 인도양에 기인한 북인도양의 고온 현상에 의해 발생한 켈빈파가 서태평양으로 동진하며 열대 서태평양 고기압성 흐름을 여름철까지 유지시키는 기작이 존재하기 때문이다 (Indian Ocean Capacitor Effect). 이렇게 발생한 여름철 강한 열대 서태평양 고기압성 흐름으로 인해 한반도에는 저기압성 흐름이 발달하기 쉬워지며 이로 인해 저온 편차가 나타날 가능성이 높아진다. 2019/20년 겨울에는 엘니뇨가 발달함에 따라 3월 IO는 역대 2위의 높은 양의 값을 보임으로써 7월 저온을 예측하였다. 상세기작의 관점에서 5월~7월 기간동안 Z500과 OMG500의 PCC가 모두 -0.15 이하의 값을 보였으나(Figure 52 and Figure 53) Z500의 경우 1~3월에 양의 PCC값을 보여(Figure 53) 4월 수시 예측시 음의 기온을 예측하는 상세기작 유사성은 나타나지 않았다. 이렇듯 4월 수시 예측에서 7월 저온을 예측하지는 못하였지만 예측인자 상세기작 유사성을 모니터링할 경우 5월과 6월 결과를 바탕으로 7월의 저온 예측은 가능했었을 것으로 보인다. 아래 섹션에서는 상세기작 유사성 예측법의 고도화 중 인자에 따른 PCC 계산 지역의 최적화를 통해 2020년 4월 수시 예측에서도 IO 인자의 상세기작 유사성 예측법을 이용하여 7월 저온 예측이 가능했음을 보여준다.

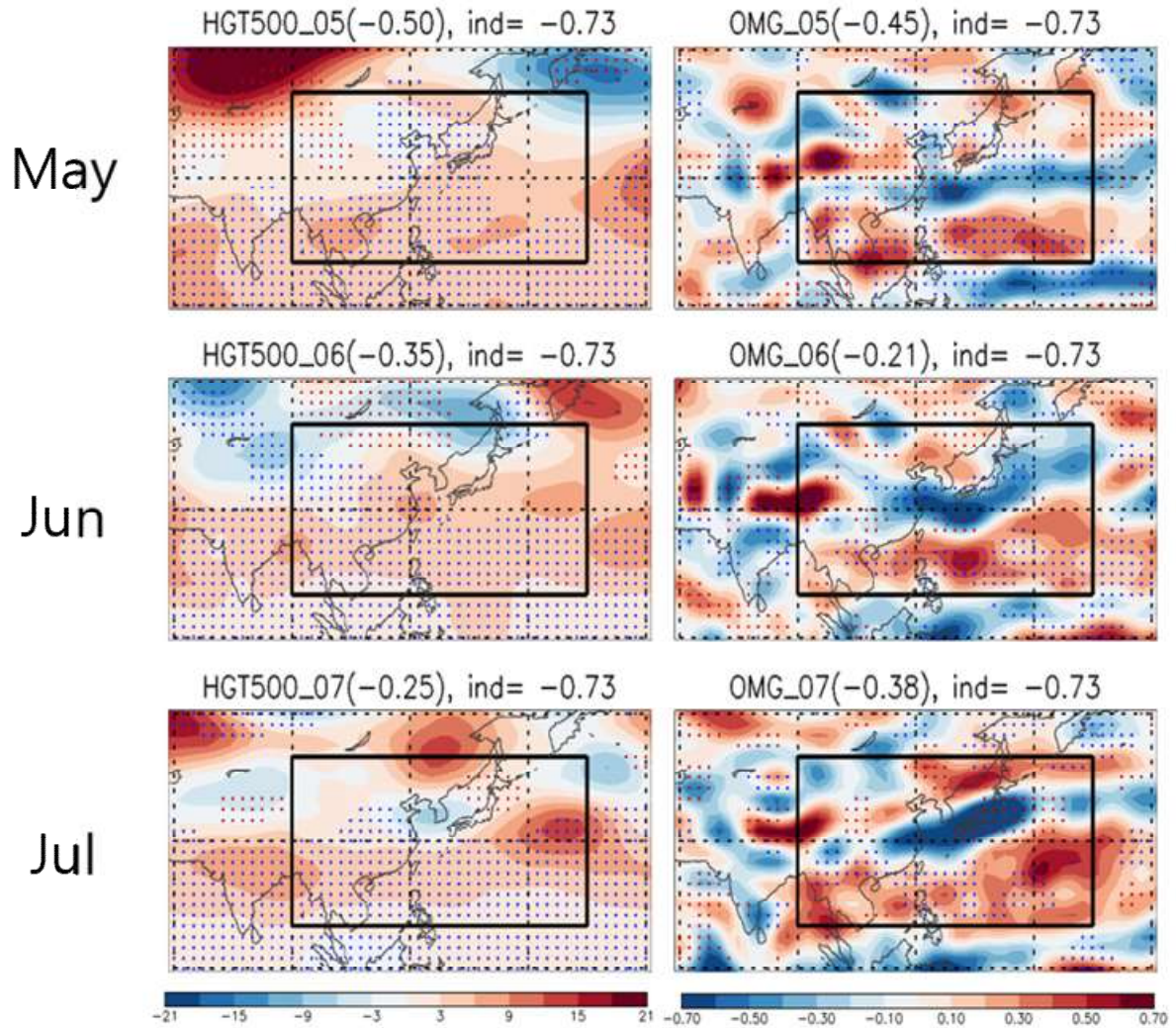


Figure 52. Monthly anomalies of HGT500 in 2020 (contours) overlaid onto the 33-year (1981-2013) correlations (dots) between IO and monthly HGT500 (dots) in May, June, and July (left column). Right column is for OMG500. Red and blue dots indicate statistically positive and negative significant correlations at the 80% level, respectively. Numbers in parentheses are the PCCs between the anomalies in 2020 and the 33-year correlation coefficients of each variable (i.e., HGT500 and OMG500) in the black solid box including Korean Peninsula.

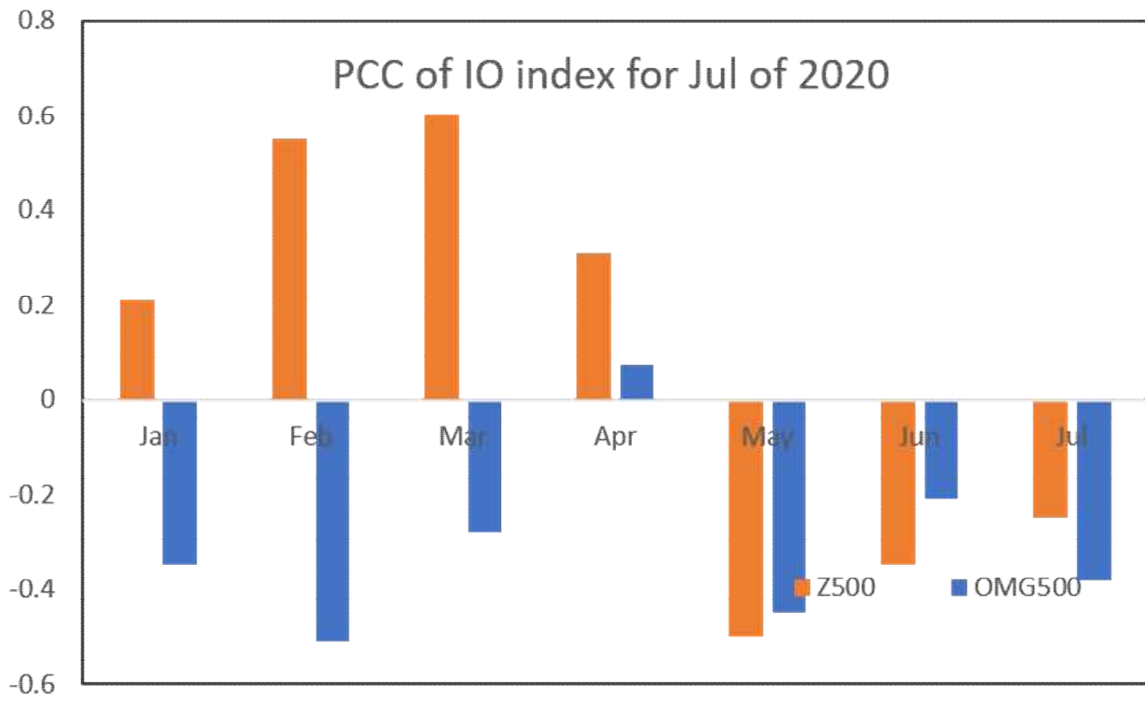


Figure 53. Monthly PCCs of HGT500 (blue) and OMG500 (orange) in 2020 for IO.

(4) 상세기작 유사성 예측법 고도화

(가) 고도화 I: 장기추세 제거 및 합성장 이용

지구 온난화로 인해 최근 월평균 기온의 고온(AN) 현상이 더 자주 발생함에 따라 장기추세의 영향을 살펴보았다. 이를 위해 인자, 기온, 대기 변수에서 장기 추세선(1973-2020)을 각각 제거하기 전과 후의 예측 성능의 변화를 살펴보았다. Figure 54a에서 보이듯이 장기추세선 제거시 고온 적중률은 낮아지지만 저온 적중 케이스는 크게 증가하며 저온 적중 실패 케이스는 하락하는 것을 확인할 수 있다.

한편 인자와 관련된 합성장의 비선형성이 강한 경우 선형성을 전제로 하는 상관관계에 기반하면 예측성이 낮을 수 있다. 따라서 PCC 계산시 상관관계를 이용하는 대신 인자의 합성장을 이용하여 예측성을 테스트하였다. 즉, 인자가 기온과 양의 상관관계를 갖는 경우, 1981~2013의 경우 중 월별로 인자가 0.8σ 보다 큰 케이스와 -0.8σ 보다 작은 케이스로 구분하여 합성장을 구성(1981-2013년 기준)하였다. 임계치 기준값으로 $\pm 0.5\sigma$ 이상 $\pm 1.0\sigma$ 이하 값에 대해 0.1σ 의 간격으로 각각 테스트한 결과 $\pm 0.8\sigma$ 의 임계치 예측 성능이 대체적으로 가장 높았다. Figure 54b 와 c에서 볼 수 있듯이 상관관계 대신 합성장을 이용할 경우 장기추세선을 제거하지 않은 경우, 저온(BN)의 예측성능이 향상됨을 확인할 수 있고 장기추세선을 제거할 경우 역시 고온(AN)과 저온(BN) 모두 예측성이 향상됨을 확인할 수 있다.

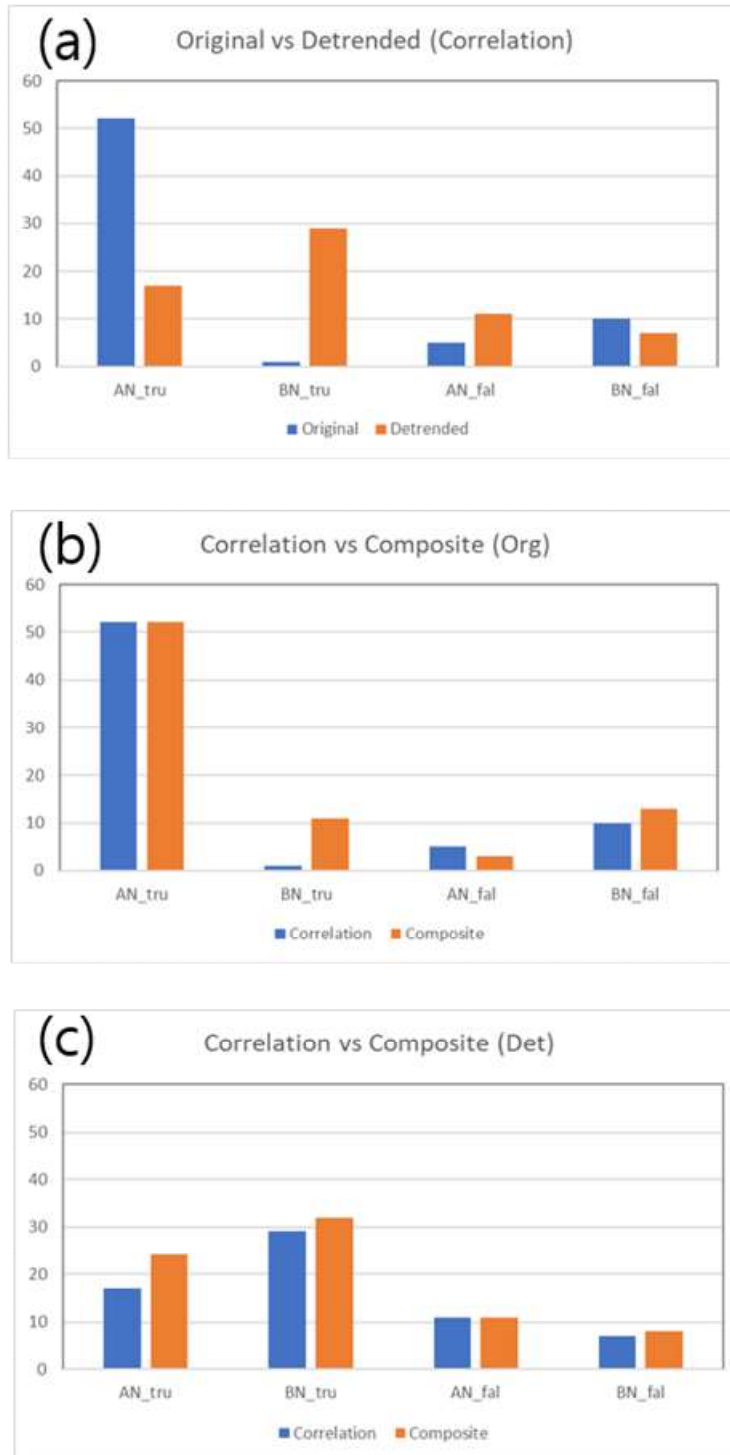


Figure 54. Number of cases of true AN, true BN, false AN as BN, and false BN as AN for June, July, and August temperature predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020. In (a), blue (orange) indicates original (detrended) values. In (b), blue (orange) indicates predictions based on correlations (composites) values using the original values. In (c), blue (orange) indicates predictions based on correlation (composite) values using the detrended values.

(나) PCC 계산 지역 최적화

PCC 계산 지역을 동아시아에 한정하였으나 인자에 따라 주요한 지역과 시기가 각각 다를 수 있다. 본 연구에서는 PE_DJF가 한반도 여름 기온에 미치는 영향 분석하고 그 결과에 따라 PCC 계산 지역을 최적화 하여 예측성 향상을 시도하였다.

PE_DJF*(-1.0)과 겨울철 HGT200의 상관관계(1991-2020) 그림에서 나타나듯(Figure 55) PE_DJF는 동시베리아 해(고기압성 흐름)에서 동아시아(저기압성 흐름), 인도차이나반도~필리핀 해(고기압성 흐름)에 걸쳐 영향을 미치지만 유럽(저기압성 흐름), 중동지역(고기압성 흐름), 아라비아반도 및 아라비아 해(저기압성 흐름) 지역에서도 강한 상관관계를 보인다(Figure 55a). 저층인 Z850에서도 고위도와 중위도에는 비슷한 경향이 나타나는 반면 (barotropic atmosphere) 인도양과 인도차이나 반도 등에 저기압성 흐름이 자리잡는 것으로 보아 열대지역에서는 baroclinic한 구조를 보이고 있으며 아라비아 해의 대류가 활발하다(Figure 55b). 이러한 유럽~아라비아 해의 파동 형태는 음의 East Atlantic/Western Russia(EA/WR) 형태와 매우 유사하다. 겨울철 평균 EA/WR과 PE는 0.61(1991-2020)의 상관관계를 보이는 것으로 보아 서로 밀접히 관련되어 있음을 짐작할 수 있다.

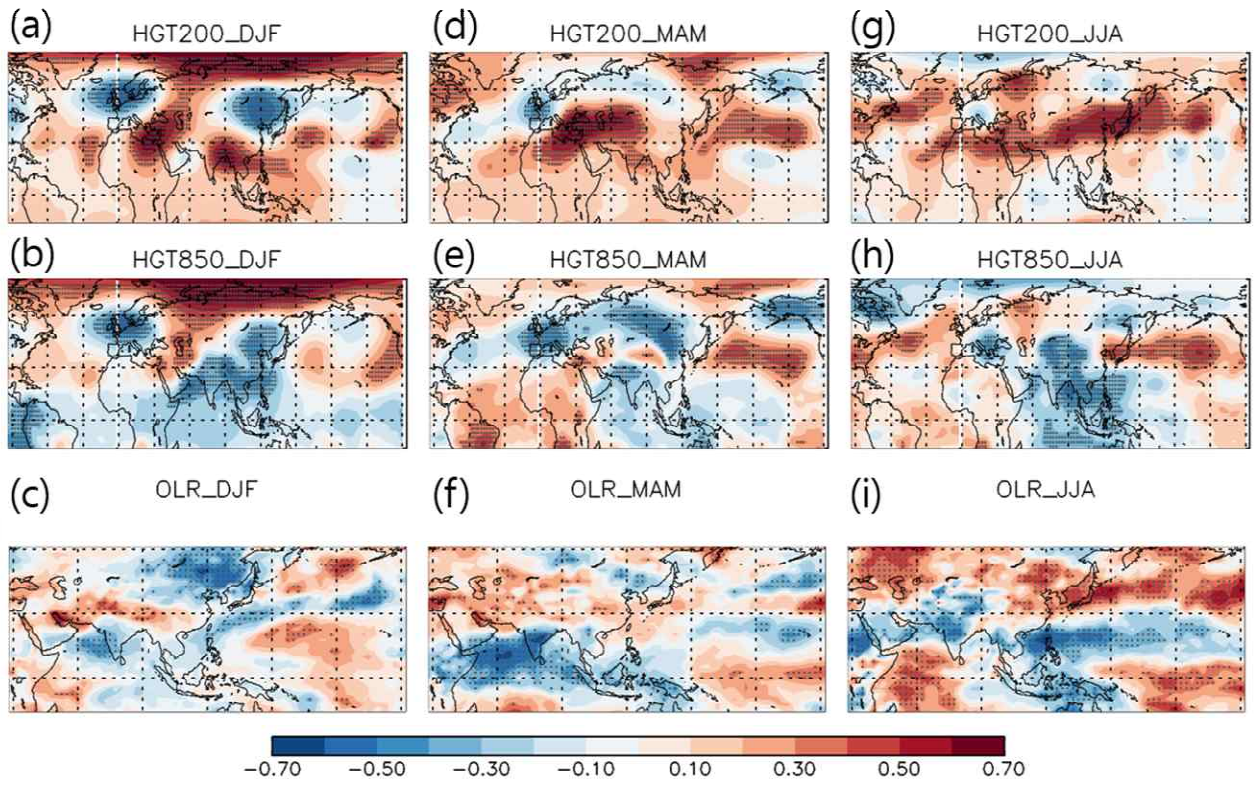


Figure 55. Correlations of the PE_DJF with (a) HGT200, (b) HGT850, and (c) OLR in DJF for 1991-2019. (d)-(f) Present the same correlations in MAM and (g)-(i) in JJA. Statistical significance at the 95% level is indicated by dots.

이러한 대기 특성은 강도는 봄철까지 이어지며 (Figure 55d and e), 아라비아 해 대류는 서인도양까지 확대되어 더 활발해지며 필리핀해에 남서풍을 유도하여 필리핀해를 가열시키게 된다. 여름이 되면 더워진 필리핀해 북부에 대류가 활발해지며 북쪽으로 과동을 전파하여 한반도에 고기압성 흐름을 유도하게 됨에 따라 한반도에 고온과 폭염이 발생하게 된다(Figure 55g, h and i). 이러한 세부 기작들을 Figure 56의 모식도에 자세히 도시하였다.

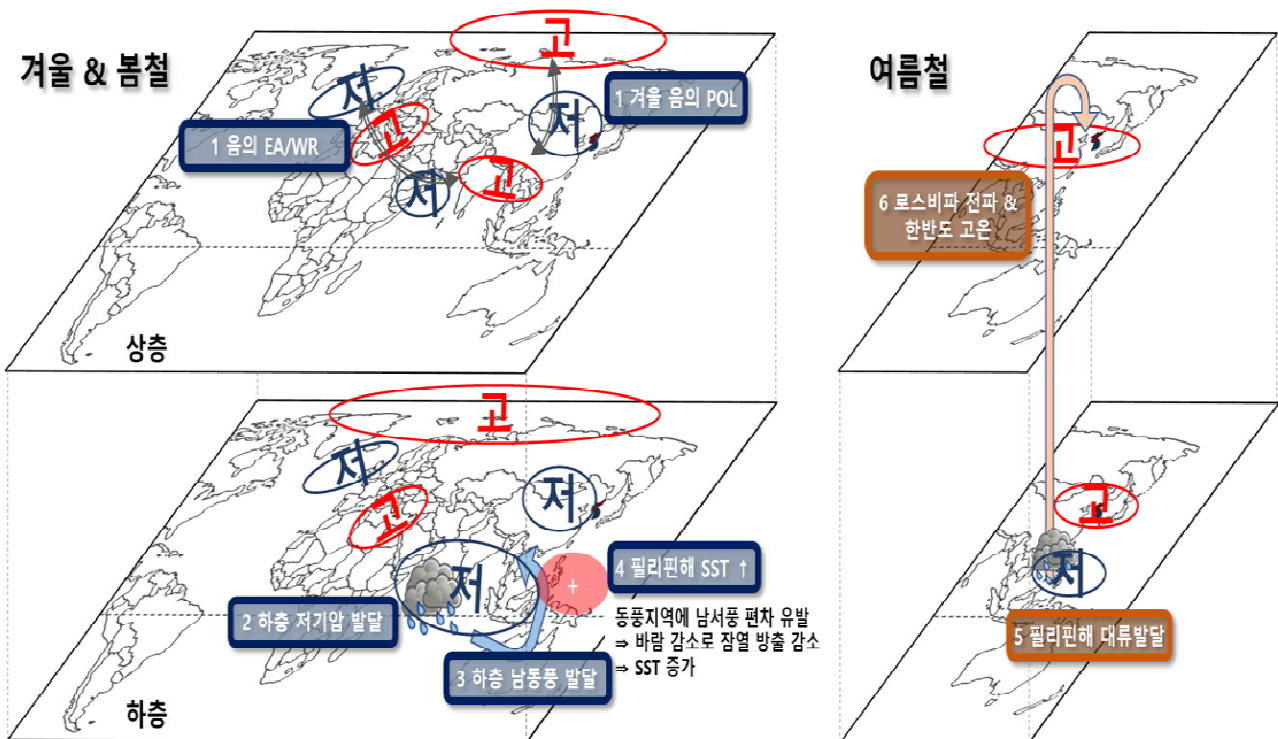


Figure 56. Schematic diagram of the pathway impacts of PE_DJF on summer circulations and temperature in Korea.

이러한 분석을 통해 밝혀낸 상세기작들은 겨울철 중위도/고위도 대기 변동성인 PE_DJF가 한반도에 여름철 고기압성 흐름을 유도하는 중요 과정에 인도양과 필리핀해의 기압계 및 대류 현상에 미치는 영향이 중요함을 의미한다.

따라서 PCC 계산 지역을 동아시아(EA: 90-165E/10-50N)에서 인도양/열대서태평양(IO/WP, 30-155E/10S-30N)으로 변경(Figure 57)하여 PCC 값의 변화를 Figure 58에 표시하였다. EA 지역에 대해서 Z500과 OMG500의 PCC 값을 동시에 고려한 것과는 달리 IO/WP에서는 OMG500의 PCC 값만 고려하였는데 그 이유는 열대지역에서 Z500은 공간적 변동성이 크지 않기 때문이며 OMG500만 고려했을 경우에도 예측성 하락이 미미하였기 때문이다(아래 Figure 59 참조). 고온과 폭염이 극심했던 2018년 7월의 경우 EA지역에 대해서(Figure 58a) 1월과 2월에는 Z500과 OMG500의 PCC가 모두 0.15 기준값보다 높아 상세기작 유사성이 나타나며 고온을 예측할 수 있었다. 하지만 3~5월 기간에는 HGT500의 PCC가 음의 값을 보이며 상세기작이 나타나지 않는 것처럼 보이다가 6월과 7월에는 다시 두 변수의 PCC가 0.15의 기준을 초과하며 유사성이 나타난다. 이러한 PCC 값의 변화는 수시 예측(1~3월중 상세기작 유사성이 한번 이상 나타나면 고온 또는 저온 예측)은 적중하였지만 그 이후 3~5월 기간 동안 상세기작이 잘 작동하고 있는지 모니터링에는 실패했음을 의미한다.

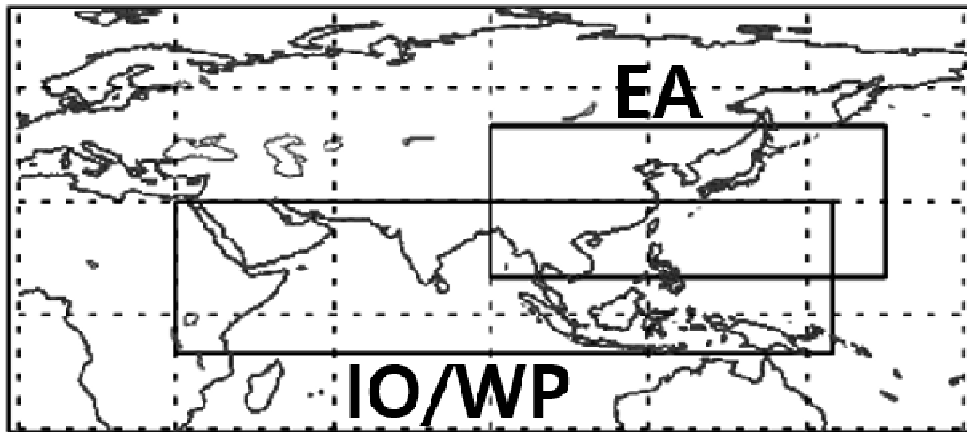


Figure 57. Two regions for computing PCC. EA stands for East Asia and IO/WP does for Indian Ocean and Western Pacific.

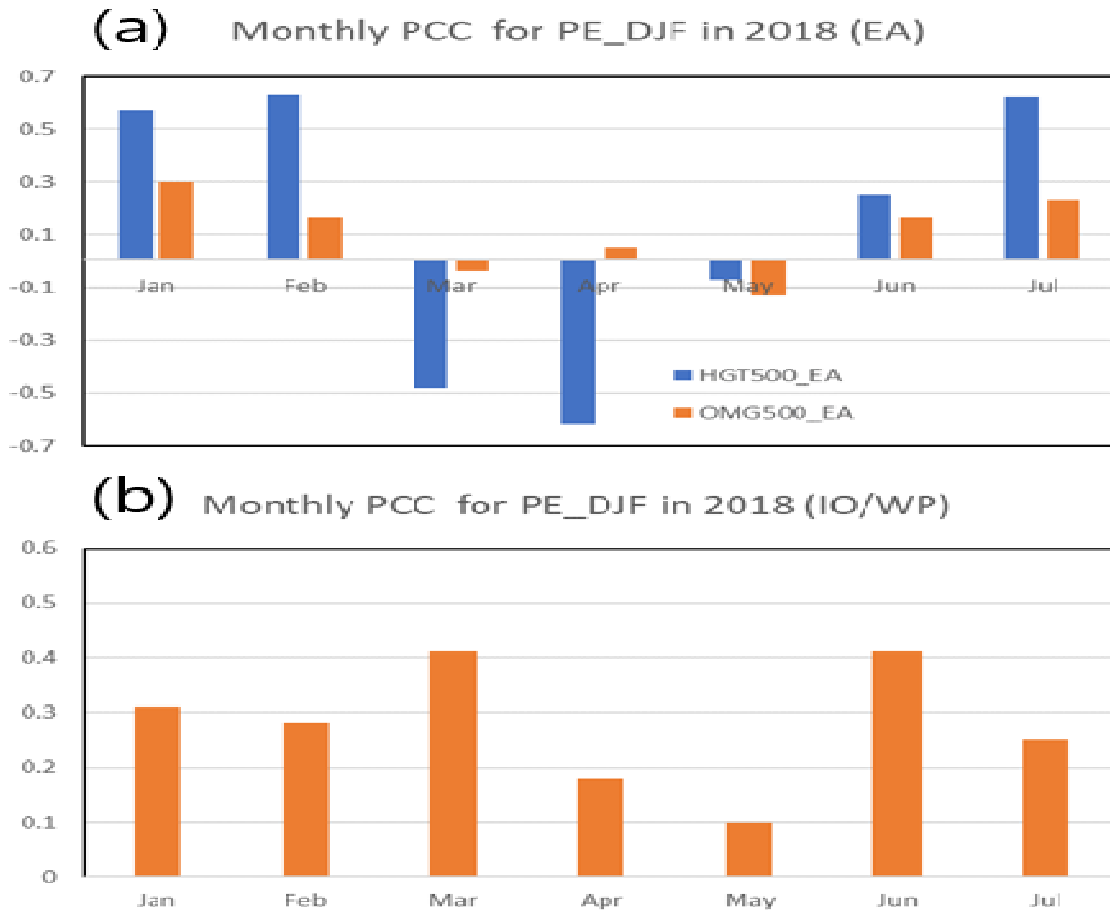


Figure 58. Monthly PCCs of (a) HGT500 (blue) and OMG500 (orange) for EA and (b) OMG500 (orange) for IO/WP in 2018 for PE_DJF.

PCC 지역을 IO/WP로 변경한 후에는 5월의 제외한 모든 월에 OMG500의 PCC가 0.15를 초과하는 결과를 보이는데 이는 수시 예측뿐 아니라 기작 모니터링에서도 향상된 결과를 보여준다.

이러한 향상된 결과에 기반하여 2018년뿐 아니라 2014~2020년(1981~2013년은 상관관계 구축에 사용됨)의 경우에도 적용해 보았다(Figure 59). EA에서 IO/WP 지역으로 변경했을 경우 2016년과 2018년 고온 예측은 두 경우 다 적중하였고 2015년의 예측 실패(NN을 BN으로 예측)의 경우가 제거되는 대신 2014년 예측은 실패(NN을 AN으로 예측)하게 되어 예측성에는 변화가 없었다. 한 가지 큰 차이점은 2016년과 2018년에 월별 상세기작 유사성이 EA의 경우 3월~6월에 잘 나타나지 않는 반면 IO/WP의 경우에는 지속적으로 나타난다는 것이다. 이러한 결과는 PE_DJF 인자의 경우 인도/서태평양 지역의 변동성을 통해 한반도 여름 기온에 영향을 미치며 이 지역의 기작 모니터링이 예측에 도움이 된다는 사실을 의미한다.

(a)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
2014							
2015		BN_NN					
2016		AN_AN			AN_AN		AN_AN
2017							
2018	AN_AN	AN_AN				AN_AN	AN_AN
2019						BN_NN	BN_NN
2020							

(b)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
2014	AN_NN	AN_NN					AN_NN
2015							
2016		AN_AN	AN_AN	AN_AN	AN_AN	AN_AN	AN_AN
2017							
2018	AN_AN	AN_AN	AN_AN	AN_AN		AN_AN	AN_AN
2019							
2020							

AN_AN	고온적중
BN_BN	저온적중
AN_NN	실패(중립)
BN_NN	실패(중립)
AN_BN	실패(반대)
BN_AN	실패(반대)

Figure 59. Prediction and verification of July mean temperature in 2014-2020 using PE_DJF with the similarity of detail-processes. (a) is for EA (HGT500 and OMG500) and (b) is for IO/WP (OMG500).

이러한 상세기작 유사성 예측법을 이용하여 최근 31년(1991-2021) 기간에 PE_DJF를 이용한 7월 기온 예측성을 검증하였다(Figure 60). 검증에 One-leave-out 방법을 사용하였는데 상관관계를 계산할 때(Figure 4a and b) 예측하고자 하는 년도를 제외한 1981-2013년 기간에 대해 계산하였다. PE_DJF는 1990년대 이후에 한반도 여름 기온과 높은 상관성을 보이기 때문에 1990년 이전의 기간은 고려하지 않았다. 3분위 예측시 인자만을 고려할 경우 31년 중 예측 적중률은 13년으로 42%의 ACC를 보였다. 상세기작 유사성을 고려하여 수시 예측한 경우에는 인자가 NN인 경우는 고려하지 않기에(그림에서 빗금으로 표시) 15개의 NN 경우가 무시되는데 이 중 12개 케이스가 예측 실패의 경우이다. NN을 고려하지 않은 경우, 2002년, 2015년, 2019년의 세 경우에는 인자가 BN을 가리키지만 상세기작 유사성은 나타나지 않기에 예측을 하지 않게 되는데 세 경우 모두 평년 수준의 기온(NN)의 기록하여 예측 실패를 피하게 되므로 적중률을 향상시키는 결과를 가져온다. 즉 인자의 편차만 고려하여 예측을 하였다면 BN을 예측하여 예측에 실패하게 되지만 상세기작 유사성을 고려하여 예측 실패를 피하게 된 것이다. 결국 상세기작을 고려하면 총 16년(인자가 NN인 해와 인자가 BN이었음에도 상세기작이 잘 나타나지 않은 3개 경우 포함 총 15개 경우 제외)중 10개의 경우에 예측을 적중, 62%의 적중률을 보여 상세기작 유사성 고려를 통해 20%의 ACC 상승을 가져오는 것으로 나타났다. 특히 PE_DJF는 2000년대 이후 고온에 대한 예측성이 매우 좋은 것으로 나타났다.

PE_DJF	기온	인자	적중	인자+기작	적중
1991	NN	BN	X	BN	X
1992	NN	BN	X	BN	X
1993	BN	BN	O	BN	O
1994	AN	NN	X		
1995	NN	BN	X	BN	X
1996	BN	BN	O	BN	O
1997	NN	BN	X	BN	X
1998	NN	NN	O		
1999	BN	NN	X		
2000	AN	AN	O	AN	O
2001	AN	AN	O	AN	O
2002	NN	BN	X		
2003	BN	BN	O	BN	O
2004	NN	NN	O		
2005	NN	AN	X	AN	X
2006	BN	NN	X		
2007	BN	NN	X		
2008	AN	NN	X		
2009	BN	NN	X		
2010	AN	AN	O	AN	O
2011	NN	NN	O		
2012	AN	AN	O	AN	O
2013	AN	NN	X		
2014	NN	AN	X	AN	X
2015	NN	BN	X		
2016	AN	AN	O	AN	O
2017	AN	NN	X		
2018	AN	AN	O	AN	O
2019	NN	BN	X		
2020	BN	NN	X		
2021	AN	AN	O	AN	O
# (적중/실패/Total)			13/18/31		10/6/16

Figure 60. Prediction and verification of July mean temperature for 1991-2021 using PE_DJF itself and with the similarity of detail-processes. Blue and pink colored cells show BN and AN.

이러한 결과들은 상세기작 유사성 예측법이 예측인자가 타겟 변수에 미치는 세부적 기작을 잘 이해하고 그 기작들이 예측 월에 잘 작동하고 있는지를 확인함으로써 인자 자체만으로 예측하는 전통적인 방법보다 예측의 신뢰도를 높일 수 있음을 의미한다.

(5) 2021년 예측 검증

2021년 7월 수시 주요 예측인자를 이용하여 상세기작 유사성 예측법을 적용한 결과를 Figure 61에 나타내었다. 12개의 7월 수시 예측인자(Table 11) 중 5개의 인자에서 상세기작 유사성이 나타났는데 그중 4개의 인자(PacTri, WP, NP, PE_DJF)는 고온을, 1개의 인자(TA)는 저온을 예측하였다: 위에서 PE_DJF의 경우 PCC 지역을 EA에서 IO/WP로 변경했을 경우 예측뿐 아니라 모니터링에서도 효과적인 결과를 보였는데 위의 다섯 인자들 모두 열대 지역에서의 변동성이 중요한 인자들이기 때문에 유사한 결과가 나타났다. 따라서 PCC 계산 지역을 IO/WP로 변경하여 OMC500에 대하여 상세기작 유사성 예측법을 적용하였다. 고온 예측인자들은 1월부터 7월(5월 제외)까지 0.15 이상의 PCC 값이 유지 되었으며 결과적으로 1.4°C의 고온 편차가 나타나 예측 적중하였다. TA 인자의 경우 역시 음의 PCC가 지속적으로 나타났으나 고온 인자에 비해 3월의 인자 편차 값이 그리 크지 않았다는 사실이 특이할 만하다. 이러한 결과는 인자의 편차가 크면 클수록, 그리고 인자 하나보다는 상세기작 유사성을 나타내는 다수의 인자들이 같은 예측 방향을 보일 경우 신뢰성이 높아짐을 암시한다.

2021년 수시 기온 예측 및 검증(7월)

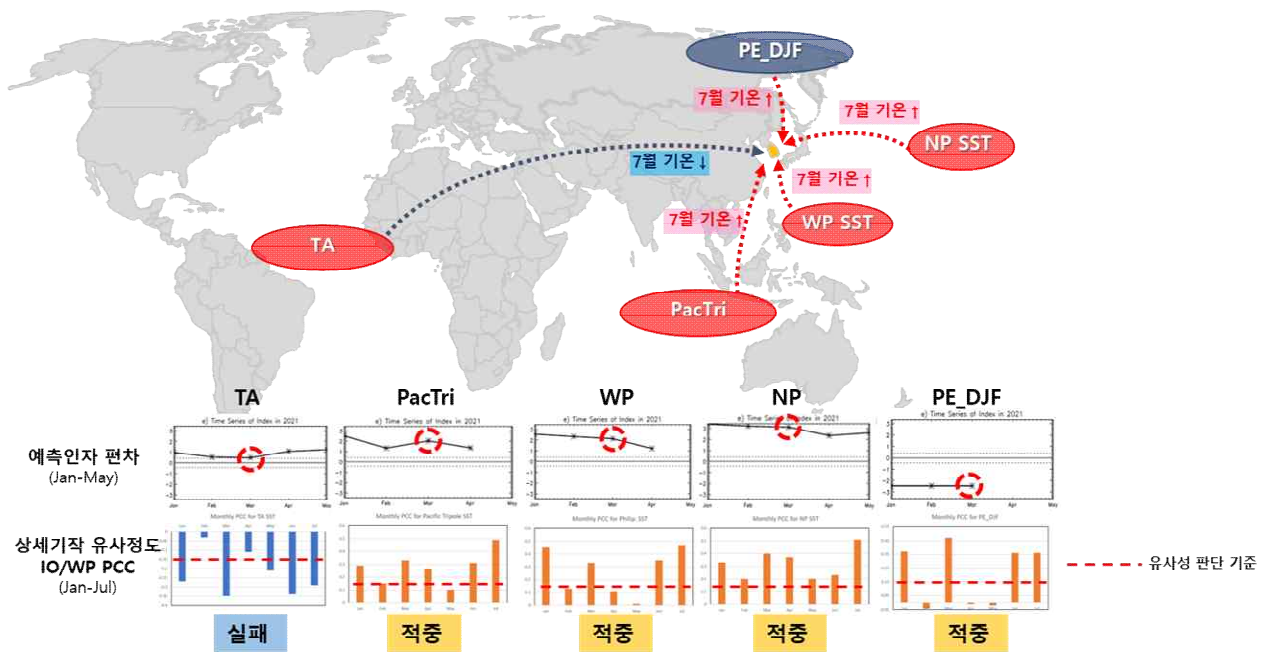


Figure 61. Summary of prediction of July mean temperature in 2021 (top). Five predictors having similarity of detail-processes and their anomalies and PCCs (bottom).

고온을 예측한 인자들 중 PacTri 인자의 상세기작 유사성에 대해 Figure 63에 표시하였다. 좌측은 과거 33년(1981-2013년) PacTri(3월 값) 인자와 월별 OMG500(1월, 3월, 6월, 7월)의 상관관계를 보여준다. 양의 PacTri은 고온의 필리핀해 및 호주 서부 해양, 저온의 인도양을 의미하며(Figure 62) 7월 한반도 기온과 양의 상관관계를 갖는다. 상관관계 지도(Figure 63a)에서 나타나듯 고온의 필리핀해에서 대류가 지속적으로 활발한 반면 저온의 열대 인도양에서는 대류 억제가 지속된다. 7월이 되면 필리핀 해 북쪽에서 대류가 활발해짐에 따라 한반도에 하강기류 및 고기압성 흐름이 나타나며 고온을 유도한다. 2021년 OMG500의 편차장(Figure 63b)도 상관관계장과 유사하게 필리핀해의 대류 활발과 열대 인도양에서의 대류 억제가 관찰되었다. 따라서 검은색 박스로 나타낸 IO/WP 지역에서 좌측과 우측 변수의 PCC가 0.29(1월), 0.33(3월), 0.31(6월), 0.49(7월)로 높은 양의 값을 보였다. 이러한 결과는 2021년 7월의 고온은 PacTri이 영향을 미치는 고온 사례와 상당히 유사하며 올해 7월 고온 예측에 일부 기여한 것으로 보인다.

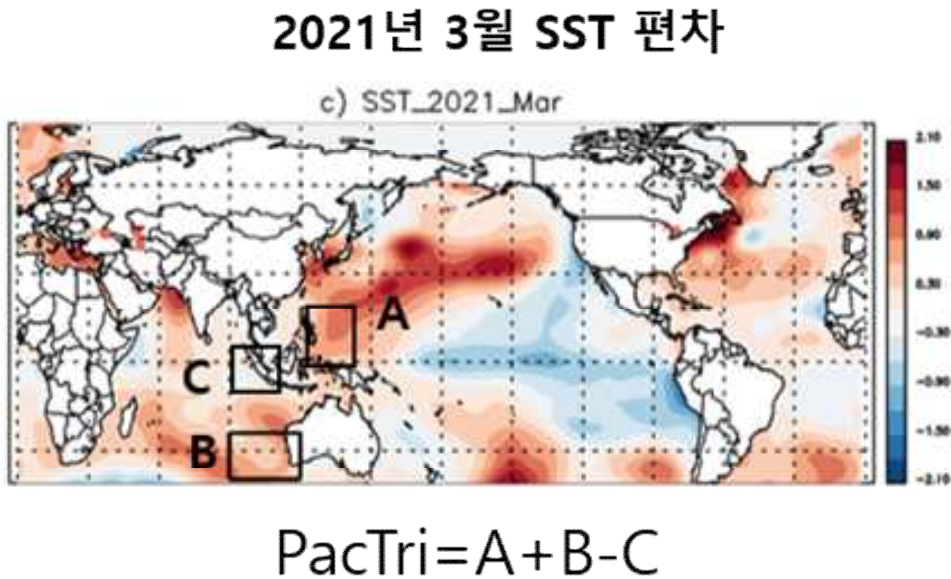


Figure 62. Definition of the predictor, PacTri with SST anomaly (contours) map in March, 2021.

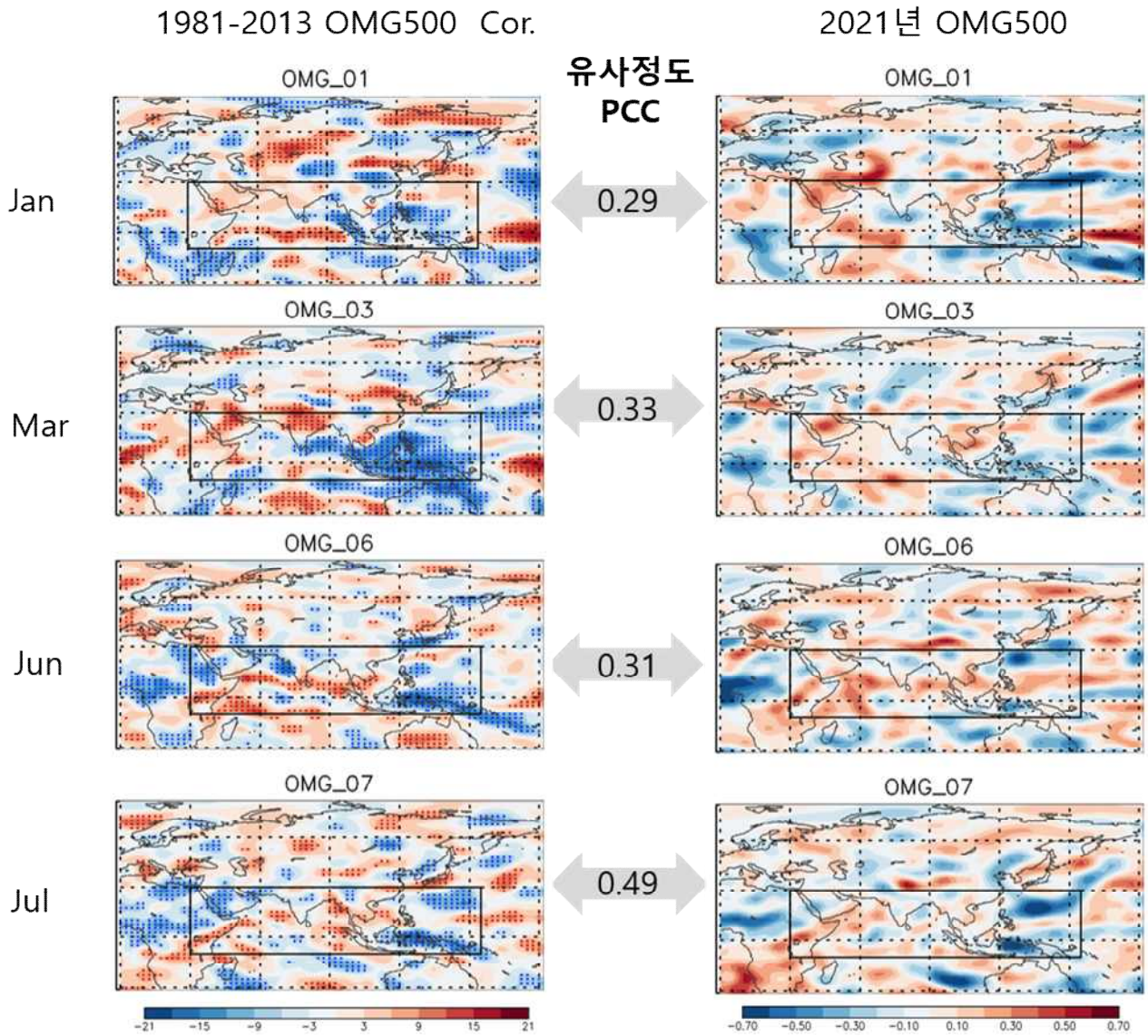


Figure 63. Monthly anomalies of HGT500 in 2021 (contours) overlaid onto the 33-year (1981-2013) correlations (dots) between PacTri and monthly HGT500 (dots) in January, March, June, and July (left column). Right column is for OMG500. Red and blue dots indicate statistically positive and negative significant correlations at the 80% level, respectively. Numbers between the columns are the PCCs between the anomalies in 2021 and the 33-year correlation coefficients of each variable (i.e., HGT500 and OMG500) in the black solid box (IO/WP).

(6) 요약과 결론

여름철 수시(4월) 기온 예측을 위해 3월 이후 값을 사용하는 인자들의 경우, 3월 값으로 대체하여 예측성을 테스트한 결과 SST 기반 인자들의 경우 기존의 예측성과 크게 다르지 않았다. 이는 인자의 시점 앞당김을 통해 많은 예측인자를 수시 예측에도 사용할 수 있음을 의미한다. 한편 다수의 예측인자를 확보한다 하여도 예측 시점과 타겟 시점사이 약 3~5개월 정도의 시차가 존재하기 때문에 예측인자 대부분의 예측성(ACC)은 50%를 초과하지 못하는 등의 한계가 존재한다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 예측인자가 한반도 기온에 영향을 미치는 상세적인 기작을 이해하고 이러한 상세 기작이 예측 시점에 잘 구현되고 있는지를 분별하는 상세기작 유사성 예측법을 개발하고 검증하였다. 상세기작 유사성 예측법은 1) 예측인자와 lead/lag를 고려한 대기 변수(e.g, OMG500)와의 지점별 상관관계(과거 33년, 1981-2013)를 예측인자가 한반도 주변 대기에 미치는 영향으로 규정하고 2) 예측하고자 하는 월의 대기 변수의 편차장(지점별)을 계산한 후, 3) 1)과 2)의 공간적 유사성을 중요 타겟 지역에 대해 패턴상관 계수(Pattern Correlation Coefficient, PCC)로 계산하여 기작의 유사성을 정량화 하는 방법이다. 이러한 방법을 적용하여 인자의 편차만을 고려한 예측보다 상세기작의 유사성을 함께 고려하는 경우 예측성이 향상되었는데 PE_DJF의 경우 42%에서 62%로 20%의 상승을 보였다. 또한 다양한 고도화를 시도하였는데 기온의 경우 장기추세를 제거할 시에 평년 이하의 기온(BN)에 대한 예측력이 상승하며 예측인자의 영향을 상관관계가 아닌 합성장을 이용하여 구할 경우 일부 인자의 예측력이 상승하였다. 또한 PCC계산 지역의 최적화를 시도하였는데 PE_DJF 인자의 경우 겨울~봄철 동아시아 지역보다 인도/서태평양 지역의 공간적 대류 구조가 중요함을 밝힌 후 그 지역에 대해 PCC를 이용할 경우 예측성은 유지되면서 효율적인 봄철 상세기작 모니터링이 가능해짐을 확인하였다. 이러한 상세기작 유사성 예측법을 적용하여 2021년 7월 고온 예측에 성공할 수 있었다. 상세기작 유사성 예측법에서 산출된 PCC 값은 예측(1~3월의 PCC)뿐만 아니라 예측 이후의 모니터링(4월부터 타겟 월 직전까지의 PCC), 그리고 사후 분석(타겟 월의 PCC)에도 이용할 수 있어 일관성 있는 예측, 감시, 사후분석을 가능하게 한다.

나. 여름철 수시 강수 예측을 위한 제안

(1) 연구배경

여름철 강수 수시 예측을 위해 여름철 기온 수시 예측을 위한 방법론, 즉 예측인자 시점 앞당김 및 상세기작 유사성 예측법을 적용하였다.

(2) 자료

본 연구에서 사용된 자료는 NCEP-NCAR Reanalysis 1 로써 200h Pa, 500 hPa, 850 hPa의 월별 지위고도(각각, HGT200, HGT500, HGT850), 500 hPa 수직운동(OMG500)을 사용하였다 (Kalnay et al. 1996). SST의 경우 ERSST v5 (Huang et al. 2017), OLR의 경우 NOAA monthly interpolated OLR를 이용하였다.

(3) 예측인자 추가 및 시점 앞당김

본 연구에서 사용된 6, 7, 8월 강수 예측인자를 Table 13와 Table 14에 나열하였다. 이 예측인자들은 장기예보 가이드스(KMA, 2018)에 기반한 인자들이며 6월, 7월 예측인자는 장마 강수 예측인자이다.

Table 13. Predictors of mean precipitation in June (and July).

Predictor	Variable	Location	Time	Reference
NAD4	SST	320-345E/55-60N minus 280-320E/30-45N	Apr	KMA (2018)
NP_cha	SST	160-210E/20-35N	Apr minus Mar	KMA (2018)
NINO	SST	200-220E/15S-10N	Apr	KMA (2018)
IO4	SST	67-85E/11-22N	Apr	KMA (2018)
Bering	SST	175-195E/55-65N	Mar	KMA (2018)

Table 14. Predictors of mean temperature in August.

Predictor	Variable	Location	Time	Reference
NADiff	SST	295-330E/60-65N minus 275-320E/25-50N	Apr minus Jan	KMA (2018)
IO	SST	60-110E/20S-25N	Apr and May	KMA (2018)
EAdiff	SST	115-150E/35-45N minus 125-180E/10-30N	May	KMA (2018)
NINO4	SST	140-160E/0-10N	0.62	KMA (2018)

인자의 시점 앞당김에 따른 예측성 변화를 살펴보면(Figure 64) 7월의 인도양 인자(IO4)와 8월의 인도양 인자(IO)의 경우를 제외하고는 예측성이 유사하거나 상승하는 경우가 대부분이었는데 ACC, HSS, 상관관계에 대해 대체적으로 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 4월 수시 예측에 기존의 예측인자의 시점을 앞당겨 3월 값을 이용할 수 있음을 의미한다.

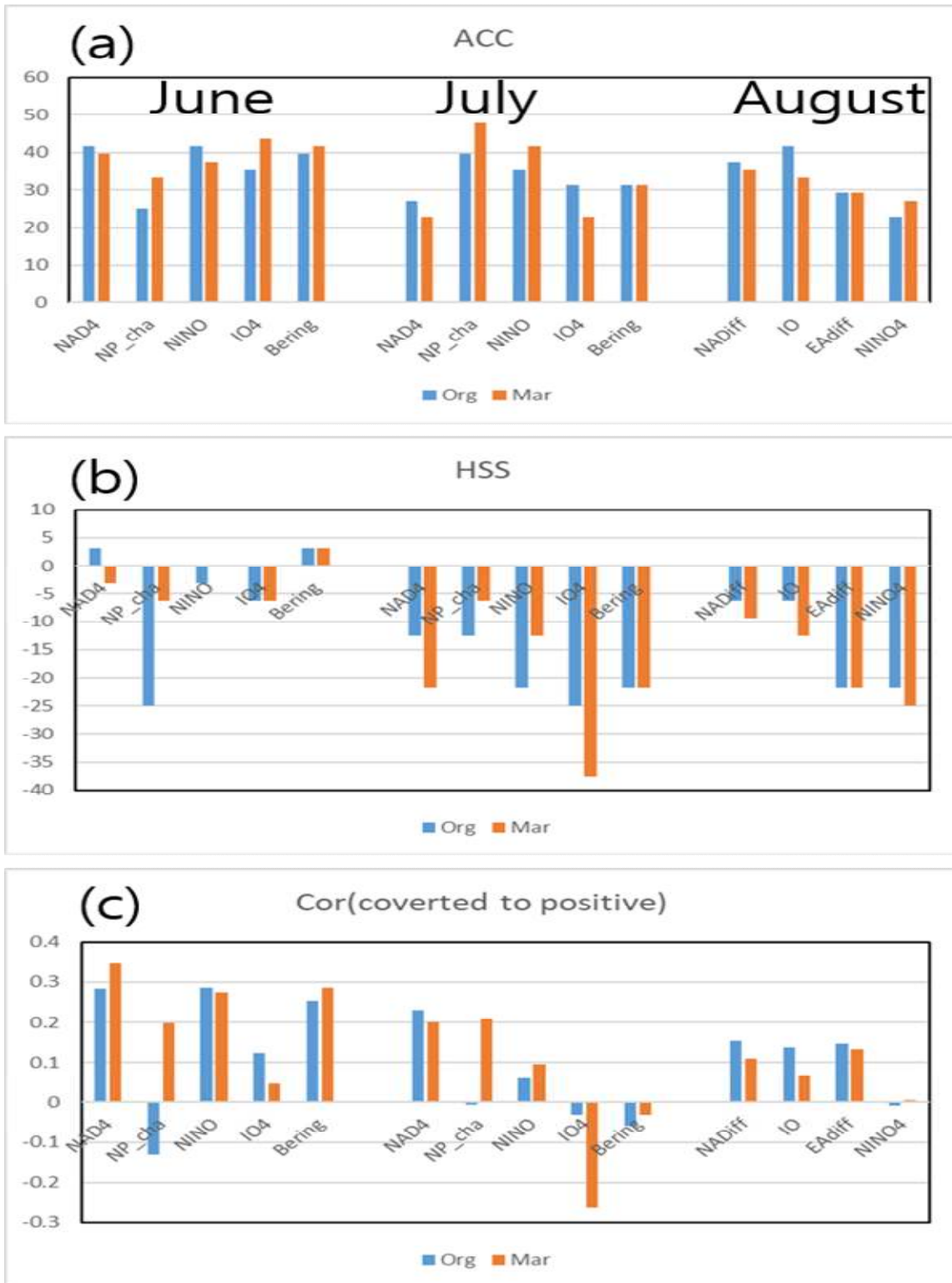


Figure 64. (a) Accuracy (ACC) of predictors of precipitation (1981-2013) in June, July, and August. Orange (blue) bars indicate accuracies based on the values in March (original month in Tables 13-14). (b) and (c) are the same as in (a) but HSS and correlation, respectively.

(4) 상세기작 유사성 예측법 적용

상세기작 유사성 예측법을 강수 예측인자에 적용한 결과를 Figure 65에 표시하였다. PCC 계산 지역은 EA 지역으로 Z500과 OMG500의 PCC 모두 ± 0.15 기준값을 사용하였다. 6월과 7월의 경우 AN을 적중한 경우(AN_AN)가 적중 실패(AN_NN과 AN_BN)의 경우보다 월등히 낮아 예측성이 낮은 것으로 보이거나 BN의 경우 적중한 경우(BN_BN, 25)가 적중 실패(BN_NN과 BN_AN, 21)의 경우보다 높게 나타나 AN 경우 보다는 예측성이 높았다. 8월의 경우는 AN과 BN 모두 예측성이 낮게 나타났다.

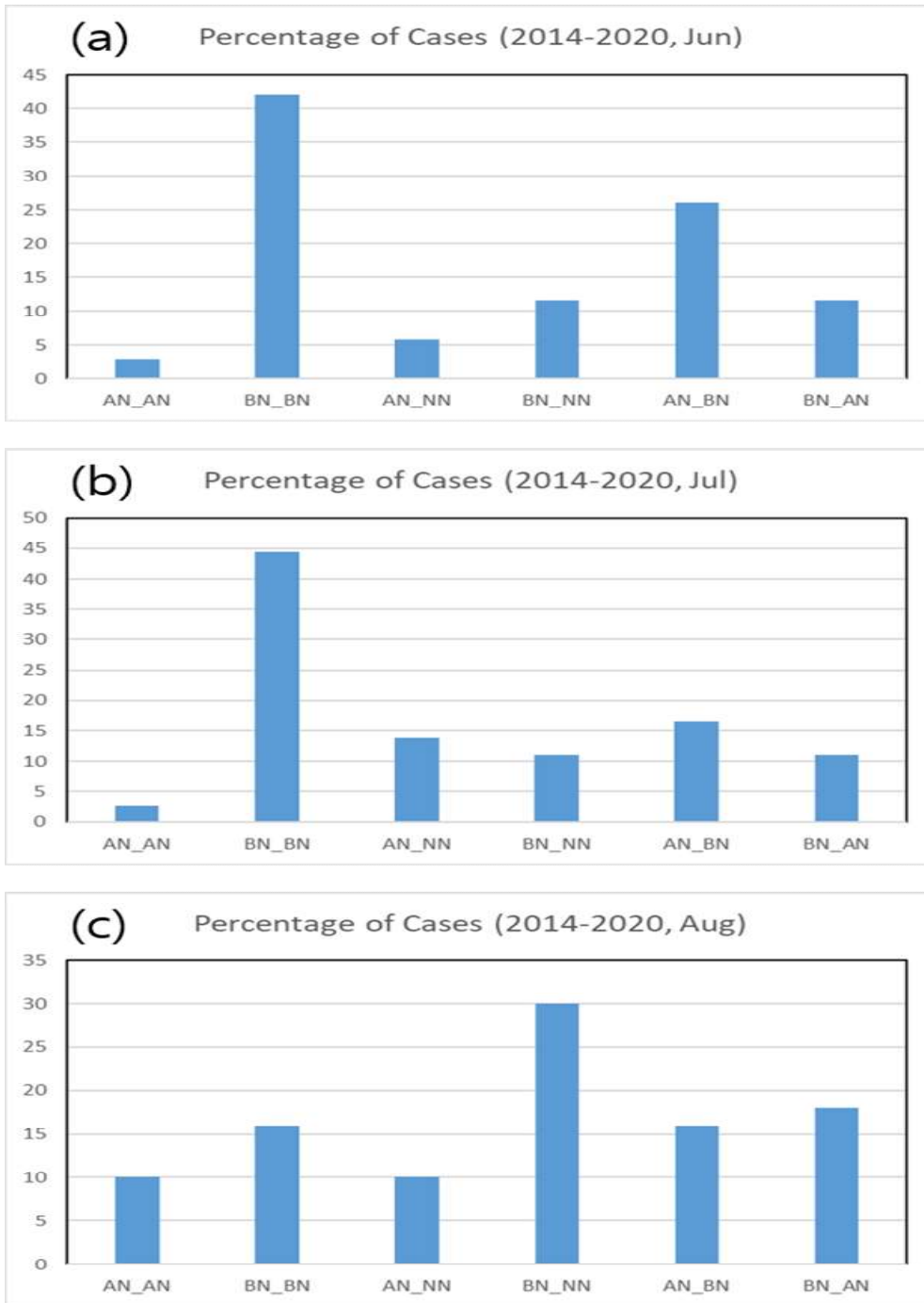


Figure 65. Percentage of cases of true AN (AN_AN), true BN (BN_BN), false AN as NN (AN_NN), false BN as NN (BN_NN), false AN as BN (AN_BN), and false BN as AN (BN_AN) for (a) June, (b) July, and (c) August precipitation predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020.

장기추세선 제거와 상관관계 대신 합성장을 이용한 경우 예측성 상승이 있는지 역시 분석하였다(Figure 66). 장기추세선을 제거할 경우 적중 케이스의 증가와 실패 케이스의 하락이 뚜렷이 나타나지 않으며 합성장을 이용할 경우에도 마찬가지로의 결과가 나타났다. 장기추세선 제거의 영향이 크지 않은 이유는 온난화가 뚜렷한 기온의 결과와는 달리 강수 변동성은 장기 추세가 두드러지지 않기 때문인 것으로 추측된다.

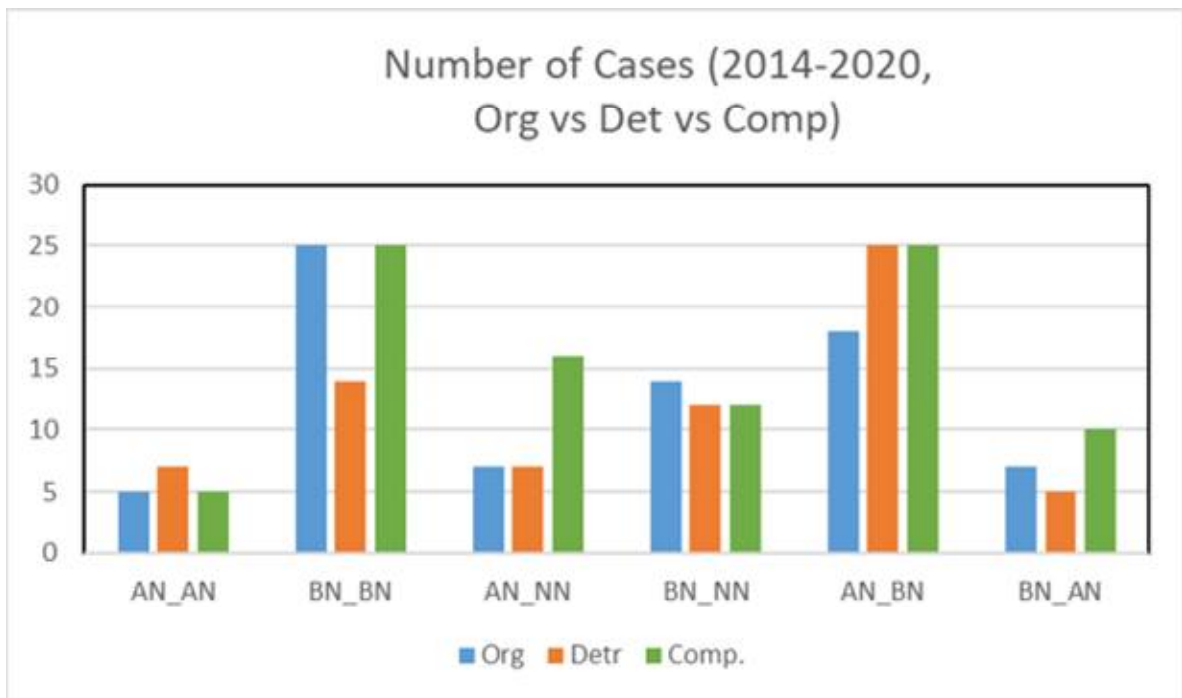


Figure 66. Number of cases of true AN (AN_AN), true BN (BN_BN), false AN as NN (AN_NN), false BN as NN (BN_NN), false AN as BN (AN_BN), and false BN as AN (BN_AN) for June, July, and August precipitation predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020. Blue, orange, and green bars indicate original/correlation, detrended/correlation, and original/composite combinations, respectively.

EA 지역에 대해 Z500과 OMG500의 PCC 값을 동시에 적용할 경우 상세기작 유사성이 나타나는 경우의 수가 기온에 비해 1/2 정도로 적기 때문에 단일 변수에 대해 PCC 계산 지역 변화의 조합을 다양하게 적용해 보았다(Figure 67). 결과에 따르면 어느 변수(Z500 또는 OMG500), 어느 지역(EA 또는 IO/WP)을 이용하여도 BN의 경우 55%~60%의 ACC가 확보되는 것으로 보인다.

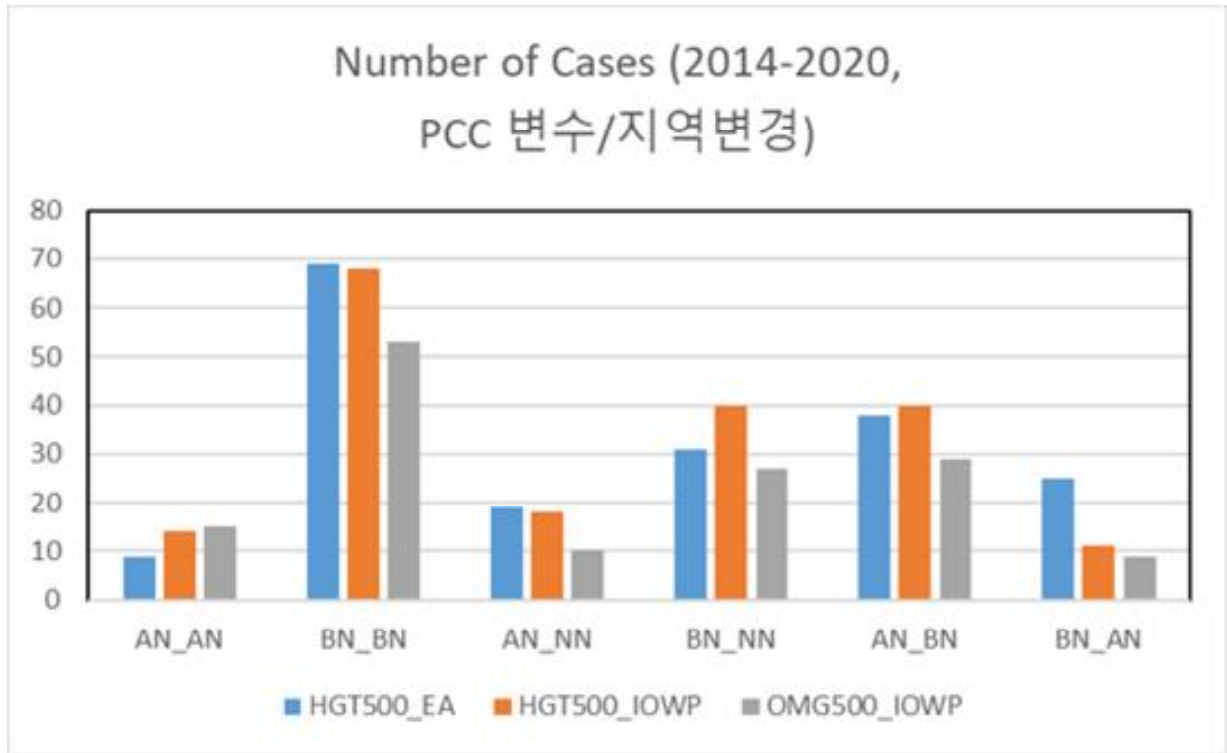


Figure 67. Number of cases of true AN (AN_AN), true BN (BN_BN), false AN as NN (AN_NN), false BN as NN (BN_NN), false AN as BN (AN_BN), and false BN as AN (BN_AN) for June, July, and August precipitation predictions using the similarity of detail-processes for 2014-2020. Blue, orange, and grey bars indicate using HGT500 in EA, HGT500 in IO/WP and OMG500 in IO/WP, respectively.

강수에 대한 상세기작 유사성 예측법의 적용 결과가 기온에 적용한 결과에 좋지 않은 이유에 대해 다음과 같이 추측해 볼 수 있다;

1) 예측인자의 예측성 자체가 높지 않음(Figure 47 and Figure 65b),

2) 기온은 비교적 지위고도장의 영향을 직접적으로 받는데 반해 강수는 지위고도장의 배치에 따른 저층 바람장에 민감하게 반응함,

3) 많은 강수 인자들이 열대 기반 인자가 아니라 중위도 및 고위도 인자이기 때문에 EA와 IO/WP 지역에서 상세기작 유사성이 잘 나타나지 않음.

향후 이러한 문제점을 고려하여 상세기작 유사성 예측법의 고도화를 수행한다면 강수 인자에 대한 예측성 향상이 가능할 것으로 보이며 위와 같은 문제점에도 불구하고 BN의 상세기작 유사성이 나타나는 경우 예측시 신뢰도의 가중치를 높이는 방안으로 정보를 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

(5) 요약과 결론

여름철 수시(4월) 강수 예측을 위해 3월 이후 값을 사용하는 인자들의 경우, 3월 값으로 대체하여 예측성을 테스트한 결과 SST 기반 인자들의 경우 기존의 예측성과 크게 다르지 않았다. 이는 인자의 시점 앞당김을 통해 많은 예측인자를 수시 예측에도 사용할 수 있음을 의미한다. 기온 수시 예측을 위해 개발한 상세기작 유사성 예측법을 강수 예측인자에 적용 시 기온 예측인자의 경우에 비해 예측성이 상대적으로 낮아 그 효용이 제한적이기는 하지만 BN의 경우 AN의 경우보다 예측성이 높아 예측에 참고할 수 있을 것으로 보인다.

다. 겨울철 수시 기후전망을 위한 선행 예측 인자 분석

(1) 연구 배경

겨울철 예측정보는 11월에 12-1-2월에 대한 전망을 발표하는데 최근 한파, 이상고온, 폭설 등 이상 기상/기후 현상들이 빈번하게 발생함에 따라 현업 예측기관에서는 효율적인 방재 및 에너지 수요 예측 등 정책 의사 결정 지원을 위해 예측정보 생산 시기를 앞당기고자 하였다. 겨울철 예측정보 생산을 위한 여러 선행 연구에서는 (예. 손석우 등, 2020; 우성호, 2016; 한보름 등, 2018) 동아시아 및 우리나라 겨울철 특성을 분석하고 이를 바탕으로 우리나라 기온 및 강수에 대한 예측 인자를 발굴하고 통계 예측 모델을 구축했는데, 11월 전망 시기에 맞춰 통계 예측에서 활용할 수 있는 월평균 자료는 10월까지의 자료가 되기 때문에 기존의 겨울철 전망을 위한 예측 인자는 이 기간에 맞춰 발굴 개발되었다. 기존에 개발되어 활용된 겨울철 예측 인자로는 북극 해빙, 유라시아 눈덮임, 해수면온도 등이 있는데 여름철 전망을 위한 예측 인자에 비해 종류도 적고 예측 인자의 시기 또한 10월 또는 11월 초까지로 되어있어 10월 시점 전망에서 활용하기에는 어려움이 있었다. 또한 눈덮임이나 해빙처럼 시기에 따라 덮여있는 상태에 차이가 큰 인자들이 있기 때문에 기존 영역에서 시점만 앞당겨 사용하기에는 어려움이 있었다.

기존에 활용중인 예측 인자들은 우리나라 기온 및 강수와 기후감시 요소간의 상관성을 바탕으로 개발되었으며 쉽고 간단한 방법으로 예측 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단순히 상관계수가 높은 지역의 값을 평균해 인자로 사용하는 방법은 관련성이 가장 높았던 영역과 기간을 사용하기 때문에 분석기간 동안은 높은 예측성을 보일 수 있으나 실제 예측에 사용되는 분석 이후 기간에 대해서는 예측성을 담보하기 어려우며, 예측인자가 설명하는 것과 유사한 현상이 발생하더라도 인자 영역을 벗어난 지역에서 나타나면 잘 잡아내지 못하는 한계가 있다. 또한 상관성에 장기변화가 있는 경우에도 예측성이 낮아질 수 있다. 따라서 이 연구에서는 월별로 각 월의 특성을 반영해 분류하고 분류된 해의 기온 경향에 따른 합성장 분석을 통해 공통으로 나타난 가을철 선행 특징을 찾아 감시 예측인자로 제시하였고, 기온 경향에 따라 감시 예측인자를 각각 제시해 상관계수만으로 예측인자를 선정했을 때 발생 되는 선형관계의 한계도 보완하고자 하였다.

(2) 자료 및 방법

우리나라 기온과 강수 자료는 기상청에서 제공하는 종관기상관측 (Automated Synoptic Observing System, ASOS) 자료의 전국평균 값을 사용하였다. 전국평균은 62개 지점 값을 사용했는데 기상청 기후통계지침에 따라 1990년 이전은 56개 지점값을 사용하였다. 지위고도와 기온은 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) Reanalysis1 자료를 사용했다. 해수면온도(Sea surface temperature; SST)와 상향장파복사(Outgoing Longwave Radiation; OLR)는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) V5, Interpolated Outgoing Longwave Radiation 자료를 사용했다. 북극 해빙 자료는

NOAA/NSIDC (National Snow and Ice Data Center)에서 제공하는 Sea Ice Concentration version4 자료를 사용했다. Arctic Oscillation (AO), Pacific Decadal Oscillation (PDO), Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) 지수는 NOAA Climate Prediction Center (CPC), National Centers for Environmental Information (NCEI), Physical Sciences Laboratory (PSL)에서 제공하는 자료를 사용했다. 분석 기간은 1973-2020년이며 기후값은 1991-2020년 기간을 사용했다. 분석에는 합성장 분석, 회귀분석, 상관분석, 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD) 등의 다양한 통계방식을 사용하였다. 분석은 선형 트렌드를 제거한 편차값을 사용했고 해빙 자료가 1979년 이후로만 제공되기 때문에 합성장 분석은 1979년 이후에 대해서만 수행되었다.

(3) 겨울철 우리나라 기온 및 강수의 월별 장기 변동 특성

Figure 68은 겨울철 월별 기온 편차와 강수량, 기온 편차와 강수량의 21년 이동평균을 나타내는데, 기온의 이동평균에서 같은 겨울철이라도 월별로 조금씩 다른 특징을 보였다. 2월은 장기적인 증가 트렌드가 가장 뚜렷하게 나타나 과거와 비교해 최근 기온이 증가한 특징을 보였다. 12월은 트렌드는 나타나지 않지만 1990년대부터 2000년대 초반 사이 기온변동 폭이 작아졌다가 이후 다시 증가한 경향을 보였는데 변동 폭이 좁았던 기간에는 기온이 대체로 높았던 경향을 보였다. 1월은 12월과 2월의 경향이 함께 나타나 과거와 비교해 최근에 기온이 증가했고 1990년대에 변동 폭이 좁았던 특징을 보였다.

장주기 변동성을 가진 PDO와 AMO 위상에 따라 겨울철 주요한 영향을 미치는 ENSO와 AO와 우리나라 기온 강수 간의 상관관계를 분석했다(Figure 69). AMO 위상에 따른 Nino3.4 지수와 기온·강수의 상관성은 12월은 음의 AMO 위상에서 더 높았고 2월은 양의 AMO 위상일 때 더 높았다. 특히 2월 강수는 음의 AMO 기간 약한 음의 상관이었으나 양의 AMO 기간 높은 양의 상관관계를 보이며 변화가 가장 크게 나타났다. 2월은 기온과 강수 모두 최근 양의 AMO 기간에 ENSO와의 관련성이 더 높아졌다. PDO 위상에 따라서는 12월 기온은 양의 PDO 위상에서 음의 위상보다 높은 상관성을 보였고 강수는 차이가 없었다. 1월은 기온 강수 모두 양의 PDO 위상에서 상관성이 더 높았고 2월은 PDO 위상에 따른 차이가 없었다. AMO 위상에 따른 AO 지수와 기온의 상관성은 12월과 1월은 양의 AMO 위상에서 더 높은 상관성을 보였다. 2월은 음의 AMO 위상에서 높은 양의 상관성을 보였으나 양의 AMO 위상에서는 상관성이 나타나지 않았는데 이는 최근 2월 AO 패턴이 과거보다 동아시아 북쪽에서 변동성이 나타난 영향으로 보인다. PDO 위상에 따라서는 12월과 2월은 양의 PDO 위상에서 AO와 기온의 상관성이 더 높았지만, 1월은 음의 위상에서 더 큰 상관성을 보여 1월에는 라니냐와 유사한 상황에서 AO와 기온의 관련성이 더 높아지는 것으로 볼 수 있다.

겨울철 우리나라 기후와 밀접한 관련이 있는 ENSO와 AO는 대양의 장주기 변동성에 따라 우리나라에 미치는 영향이 달라질 수 있고 월별로도 영향이 다른 특징을 확인했다. 따라서 겨울철 예측 인자를 찾을 때 월별로 해당 월의 특징을 반영할 수 있는 기준으로 분류해 해당 분류와 관련된 가을철 예측 인자를 찾도록 하였다.

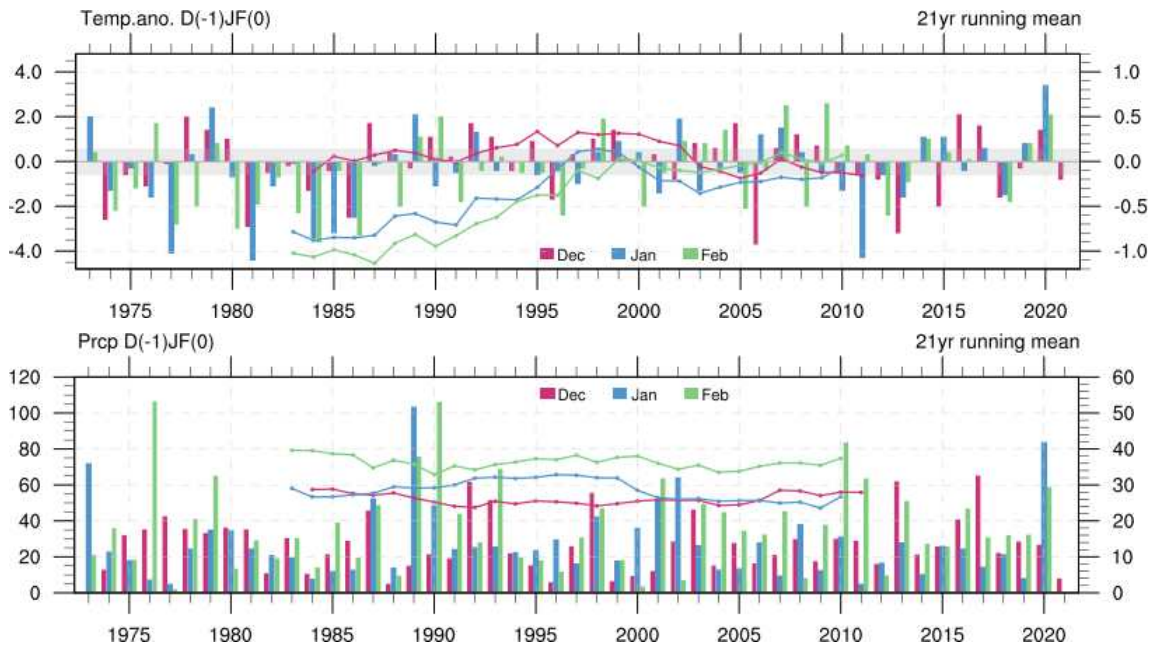


Figure 68. Time series of the Korean winter temperature anomaly and precipitation (bar), and their 21-year running mean (line).

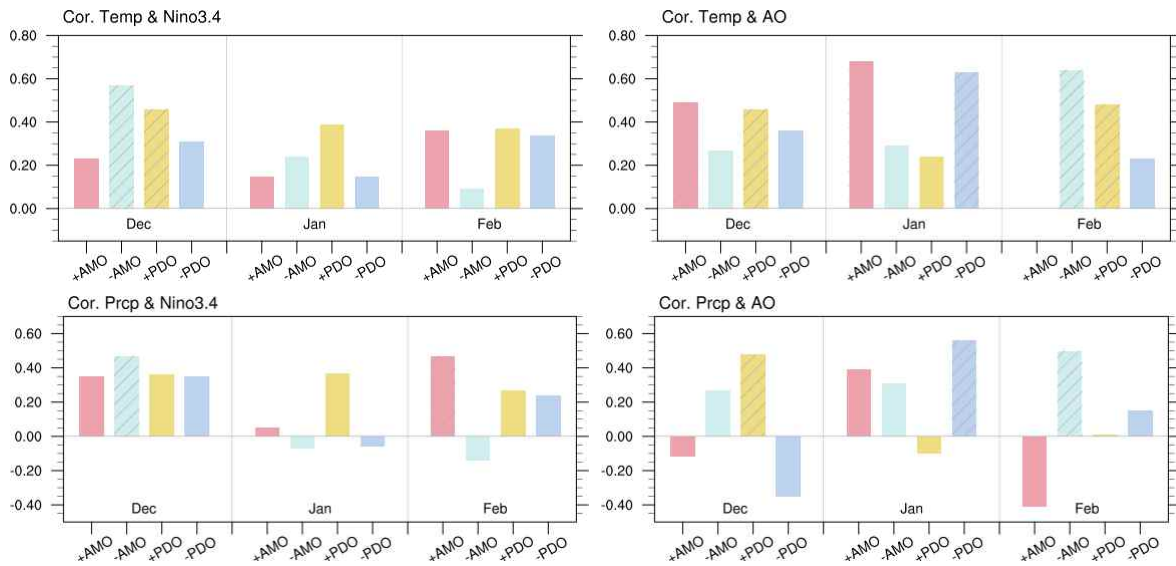


Figure 69. Correlation between Korean winter temperature, precipitation and Nino3.4 index, AO index according to the AMO and PDO phase. The statistically significant value at 95% confidence level is overlaid by diagonal line.

(4) ENSO 위상에 따른 12월 기온과 관련된 가을철 선행 특성

12월은 ENSO와 우리나라 기온의 상관관계가 겨울철 중 가장 높은 달로 Nino3.4 지수와 기온의 상관계수는 1973-2020년 기간에서 12월 0.40, 1월 0.21, 2월 0.17로 나타났다. Figure 70은 겨울철 월별 기온과 Nino3.4 지수의 이동상관 계수를 나타내는데 12월은 과거와 비교해 최근 기간 상관계수 감소가 나타나기는 했으나 1월과 2월에 비하면 비교적 안정적으로 양의 상관성을 보였다. 선행 연구에서 보고된 바에 따르면 현업 계절 예측 모델의 ENSO 예측성은 높고 특히 겨울철 ENSO 전망은 6개월 선행 시간에서 0.5~0.9의 correlation skill을 나타냈다 (예, Barnston et al. 2012). 따라서 10월 예보를 생산할 시점에서는 겨울철 ENSO 상태에 대해 높은 신뢰도를 가지고 전망할 수 있어 ENSO 정보를 활용해 우리나라 기온 전망 정보를 생산할 수 있다.

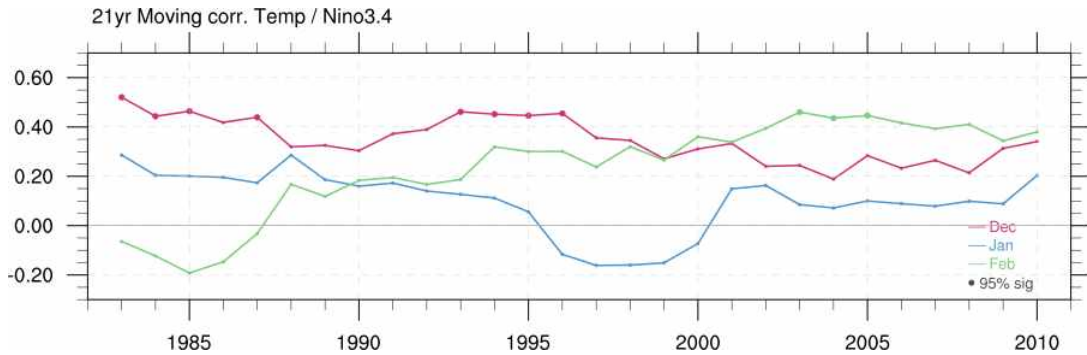


Figure 70. 21-year moving correlation between Korean winter temperature and Nino3.4 index. The statistically significant value at 95% confidence level is indicated by thick mark.

Figure 71은 겨울철 엘니뇨/라니냐/중립 해의 12월 기온 분포를 나타내는데, 엘니뇨 해에만 기온이 평년보다 높은 경향이 뚜렷하며 라니냐 해에는 평균은 음의 값이나 분포가 퍼져있었고 중립 해에는 특정 경향을 나타내지 않고 고른 분포를 나타냈다. 겨울철 엘니뇨였던 해의 경우 12월 기온이 평년보다 높았던/비슷했던/낮았던 해는 각각 9/6/1번으로 엘니뇨 해에는 대부분 기온이 평년보다 높거나 비슷했다. 라니냐 해의 경우는 평년보다 높았던/비슷했던/낮았던 해는 4/6/7번으로 기온이 평년과 비슷하거나 낮은 경향이 우세했으나 특정 경향을 나타내지 않았다. 중립해의 경우는 평년보다 기온 높았던/비슷했던/낮았던 해는 4/6/4번으로 고르게 분포했다. 따라서 엘니뇨 해는 기온 평년보다 높았던 경우와 평년과 비슷했던 경우, 라니냐 해와 중립 해는 기온 평년보다 높았던 경우와 평년보다 낮았던 경우로 분류하고 각 사례의 합성장 분석을 통해 가을철 선행해서 나타나는 특징을 살펴보았다.

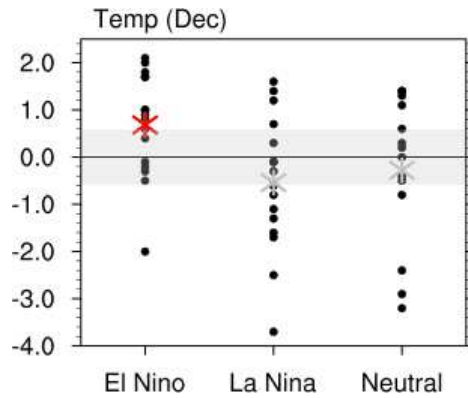


Figure 71. Distribution of the December Korean temperature anomalies according to the ENSO phases. The asterisk indicates mean value. The statistically significant value at 95% confidence level is indicated by red.

겨울철 엘니뇨 해 12월 기온이 높았던 경우에는 선행 연구들에서 알려진 엘니뇨 반응이 잘 나타났다. Figure 72와 Figure 73은 엘니뇨 해 12월 기온 높았던 해의 합성장을 나타내는데, 12월에 열대 서태평양 대류 억제와 중태평양 대류 강화가 나타나고 대류 억제구역이 위치한 북서태평양 지역 하층에는 고기압성 순환, 상층에는 저기압성 순환이 위치해 로스비파 전파로 중위도 동북아시아 지역에는 고기압성 순환이 위치했다. Figure 74와 Figure 75는 기온이 평년과 비슷했던 해 합성장을 나타내는데 북서태평양 지역에서 하층 고기압성 순환이 나타나지 않았고 상층 로스비파 전파도 나타나지 않았다. 이 경우에는 12월 한 달 안에서 기온변동이 크게 나타나 기압계의 흐름이 상대적으로 컸던 것으로 보이며 중태평양 대류 강화 신호도 기온 높았을 때보다 상대적으로 더 약하게 나타났다.

두 사례의 가을철 차이를 살펴보았다. 두 경우 모두 늦여름부터 해수면온도가 열대 동태평양부터 중태평양까지 높고 서태평양은 온도 낮은 전형적인 엘니뇨 형태를 나타냈으며, 차이는 인도양과 북태평양에서 나타났다. 기온이 높았던 경우 서인도양 해수면온도는 높고 동인도양은 온도가 낮은 양의 IOD 형태를 보였는데 특히 10월과 11월에 잘 나타났으며 양의 IOD와 관련된 서인도양 대류 증가, 동인도양 대류 억제를 나타냈다(Figure 73). 북태평양에서는 늦여름부터 북태평양 동쪽 지역에 높은 온도가 열대 동태평양까지 이어졌다. 반면 기온이 높지 않았던 경우 양의 IOD는 나타나지 않았고 북서인도양 해수면온도가 늦가을에 높게 나타났고 북인도양에서 서태평양까지 대류 억제가 나타나는 경향을 보였으며, 북태평양에서는 늦여름 베링해와 알래스카 남쪽으로 낮은 해수면온도가 나타나는 경향을 보였다(Figure 75). 두 사례의 순환장 차이는 하층에서 나타났는데 기온 높았던 경우 9월과 10월 중앙아시아~인도~남아시아 지역에 고기압성 순환이 위치하고 11월 이후에는 북서태평양 전반적으로 고기압성 순환이 확장했다(Figure 72). 반면 기온 높지 않은 경우는 하층에 고기압성 순환이 나타나지 않았고 10월 동아시아 지역에 저기압성 순환이 위치하는 차이가 있었다(Figure 74).

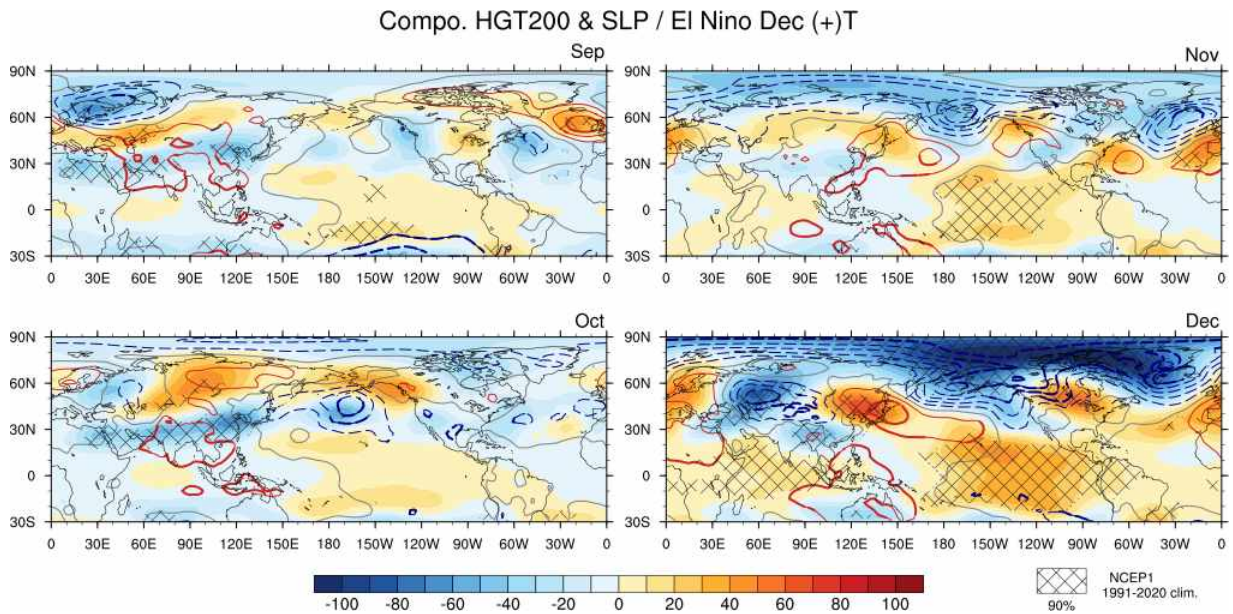


Figure 72. Composite maps of the 200hPa geopotential height anomalies (shading) and sea level pressure anomalies (contour) for the El Niño years with above normal December Korean temperature. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

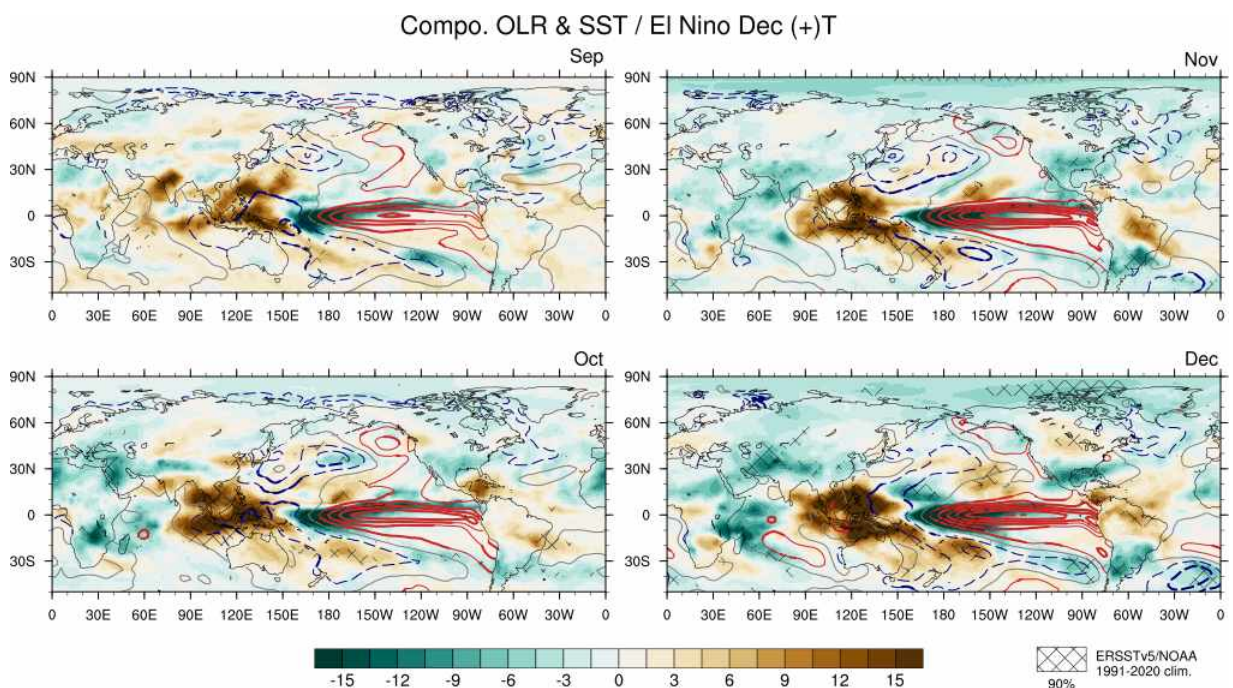


Figure 73. Composite maps of the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour) for the El Niño years with above normal December Korean temperature. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

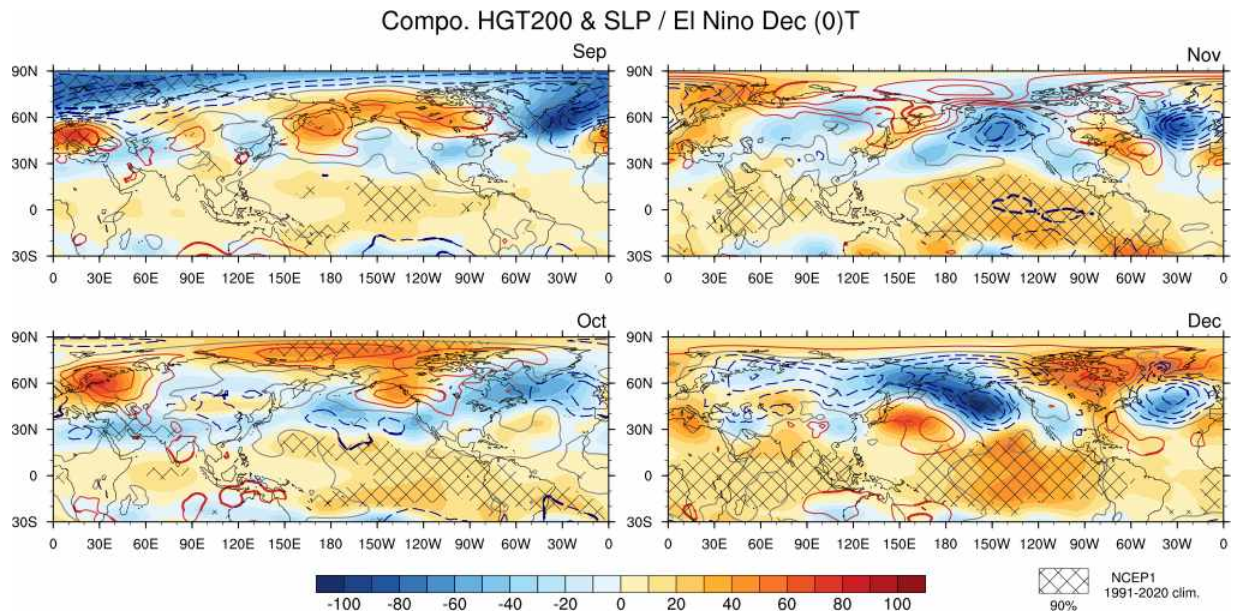


Figure 74. As in figure 72, but for the El Niño years with near normal December Korean temperature.

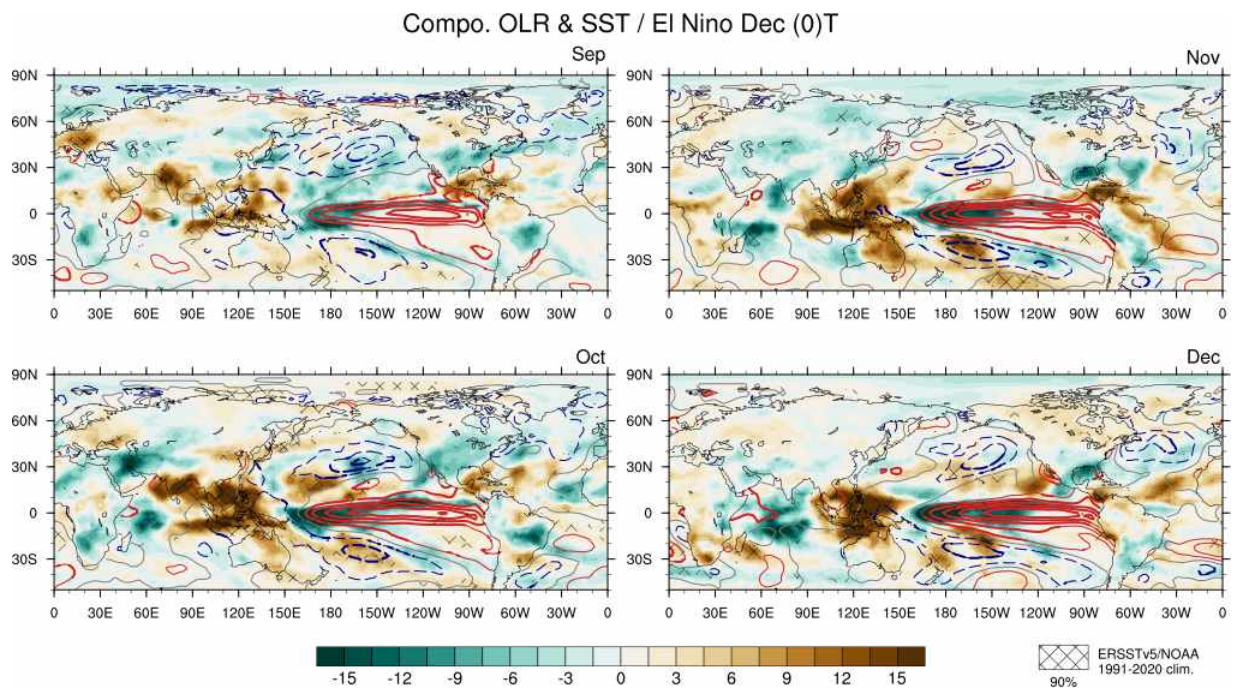


Figure 75. As in figure 73, but for the El Niño years with near normal December Korean temperature.

겨울철 라니냐 해 12월 기온이 높았던 경우와 낮았던 경우는 10월까지의 큰 차이를 보이지 않다가 11월에 차이를 보였다. Figure 76과 Figure 77에 각각 라니냐 해 12월 기온 높았던 해와 낮았던 해의 지위고도와 해면기압 합성장을 나타냈다. 기온이 높았던 경우는 11월에 인도

북쪽 티베트 지역부터 아열대 북태평양에 고기압성 순환이 길게 위치했으며 북태평양 북쪽으로 저기압성 순환이 강하게 발달하고 북극에는 고기압성 순환이 위치하는 음의 AO가 나타나는 경향이 우세했다. 이 경우 12월이 되면 북태평양 전반적으로 고기압성 순환이 위치해 우리나라도 고기압성 순환의 영향을 받았다. 반면 기온이 낮았던 경우는 11월에 북서태평양에 저기압성 순환, 베링해를 중심으로 북태평양 북쪽에 고기압성 순환이 나타났으며 12월이 되면 저기압성 순환이 북태평양 전반에 확장되어 우리나라는 저기압성 순환의 영향을 받았다. 12월 기온이 높았던 경우는 인도 북쪽부터 동아시아까지 이어진 상층 고기압성 순환이 10월부터 나타나기 시작해 11월을 지나 12월까지 지속되면서 영향을 주어 극에서 내려오는 한기를 막아주는 역할을 했던 것으로 보인다. 반면 기온이 낮았던 경우에는 상층의 고기압성 순환이 10월에는 위치했으나 11월에는 사라져 영향을 주지 못했다.

가을철 두 사례의 차이는 열대 대류와 북극에서 찾을 수 있었다. Figure 78은 열대지역에서 평균한 OLR과 해수면온도를 나타낸다. 두 경우 모두 동~중태평양 해수면온도가 낮은 라니냐 패턴이 여름부터 나타났다. 반면 열대 대류 활동은 기온이 높았던 경우 늦여름부터 동인도양과 서태평양에서 활발했으나 기온이 낮았던 경우에는 대류 활동은 나타나지만 세기가 약했고 주로 서태평양에서만 나타나는 차이가 있었다. 12월 기온이 높았던 경우 가을철 동인도양까지 높은 해수면온도가 나타나면서 이 지역에서 활발한 대류 활동이 이어졌고 그로 인해 인도 북쪽 티베트 주변으로 상층 고기압성 순환이 지속될 수 있었던 것으로 보인다.

지위고도 합성장에서 라니냐 해 기온이 높았던 경우 10월에 바렌츠해 주변 지역을 중심으로 고기압성 순환 그린란드 주변에 저기압성 순환이 발달했고 기온 낮았던 경우는 북극 전체적으로 저기압성 순환이 위치했다. 이러한 차이는 해빙과 관련 있는 것으로 보인다. Figure 79와 Figure 80에 나타난 합성장에서 늦여름~초가을 북극 해빙 농도 편차는 기온 높았던 경우 바렌츠해~랍테프해 지역에 많은 경향, 동시베리아해~보퍼트해 지역은 적은 경향을 보였고 기온 낮았던 경우는 반대로 바렌츠해~랍테프해 해빙이 적은 경향을 나타냈다. 이러한 북극 해빙 경향은 라니냐 해뿐만 아니라 중립 해 합성장에서도 유사했다. 두 지역의 차이를 살펴보기 위해 Figure 81에 바렌츠~카라~랍테프해에서 평균한 해빙 농도 편차와 동시베리아~척치~보퍼트해에서 평균한 해빙 농도 편차 그리고 두 지역의 차이를 나타냈다. 두 지역의 차이는 8월부터 10월까지 기온이 높았을 때는 양, 낮았을 때는 음의 값을 보였는데 바렌츠~카라~랍테프해 해빙만 고려한 경우보다 기온 높았을 때와 낮았을 때의 차이가 명확해 감시 예측 인자로 활용할 수 있을 것으로 보인다. 가을철 두 지역의 해빙 차이가 우리나라 12월 기온에 영향을 미치는 자세한 메커니즘에 대해서는 추후 더 연구가 필요하겠다.

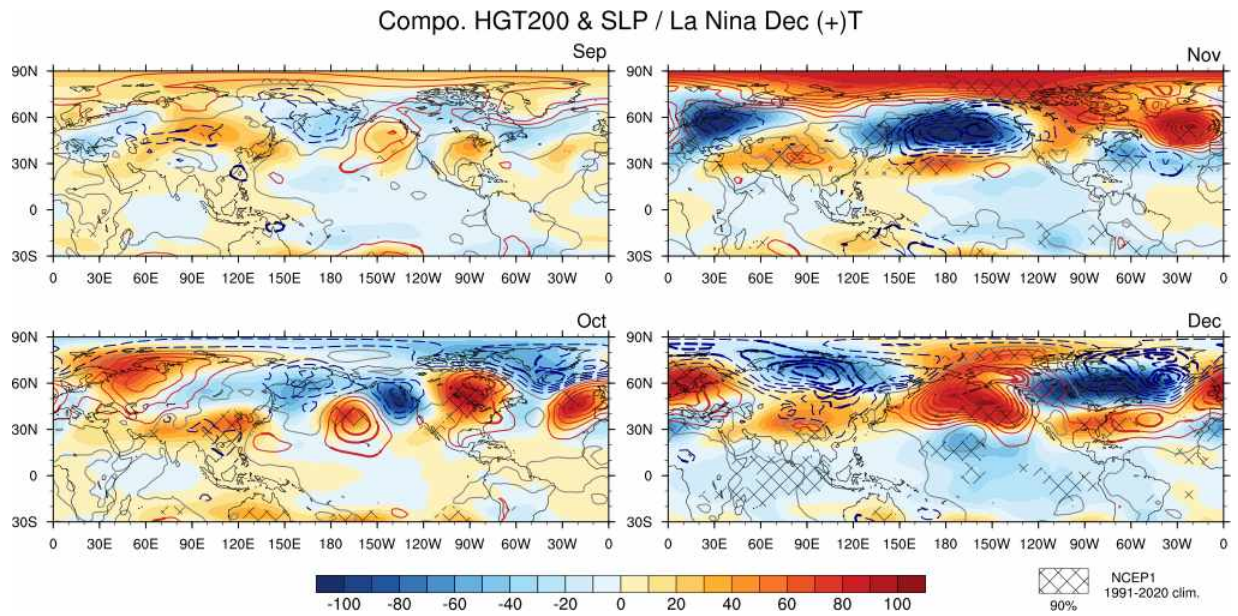


Figure 76. As in figure 72, but for the La Nina years with above normal December Korean temperature.

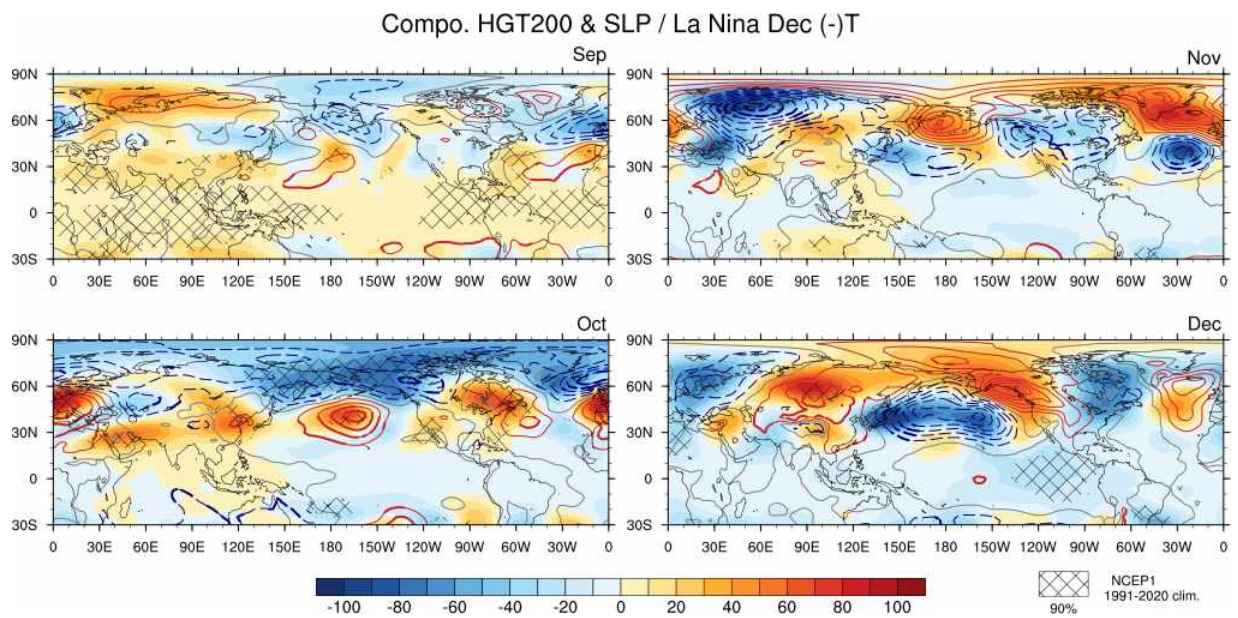


Figure 77. As in figure 72, but for the La Nina years with below normal December Korean temperature.

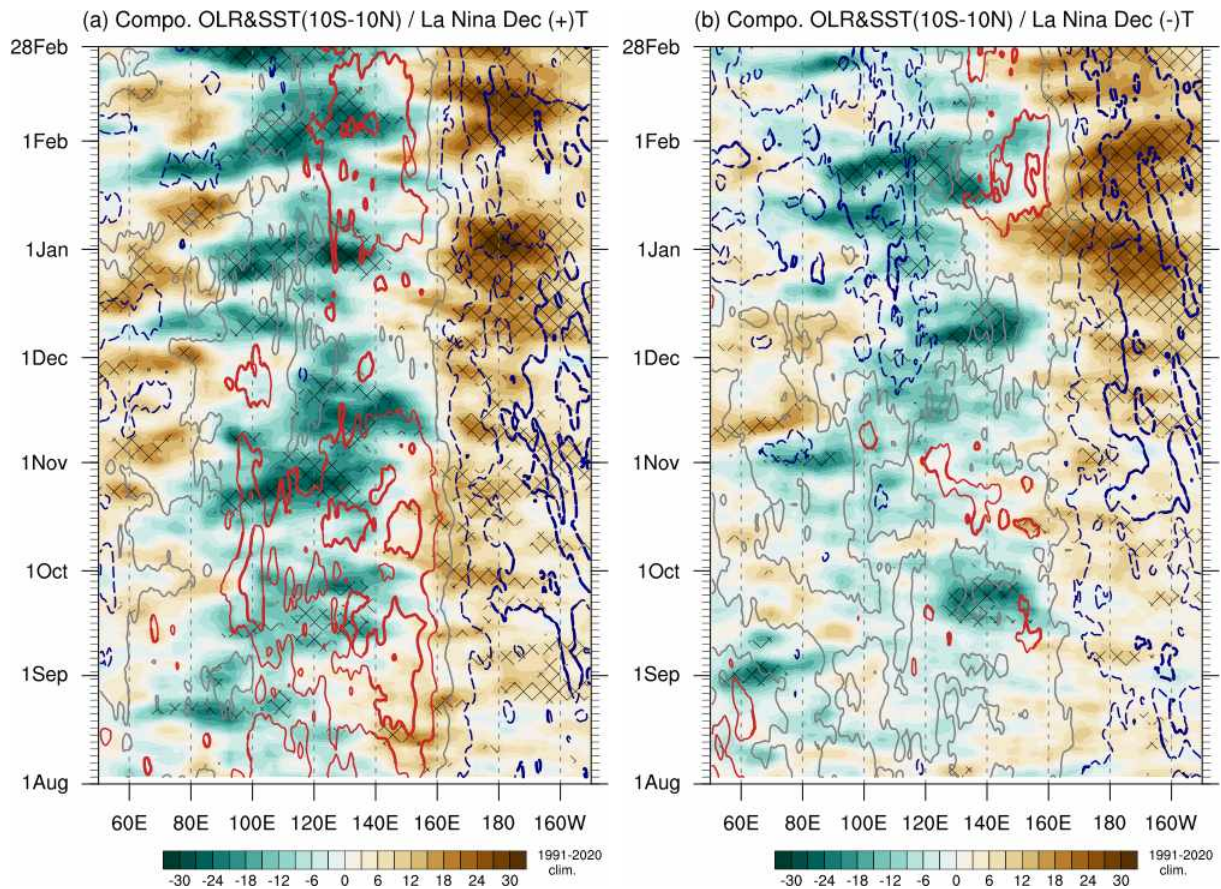


Figure 78. (a) Composite hovmoller plots of the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour) for the La Nina years with above normal December Korean temperature. (b) As in (a), but for the below normal temperature. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

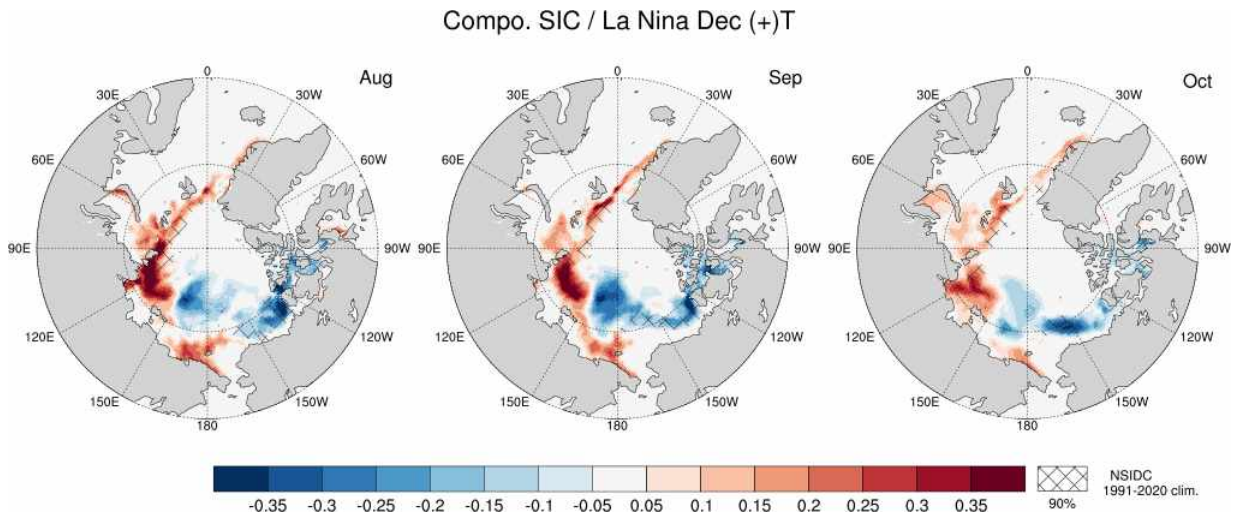


Figure 79. Composite maps of the sea ice concentration anomalies in the preceding August to October for the La Nina years with above normal December Korean temperature. The diagonal indicates statistically significant area at 90% confidence level.

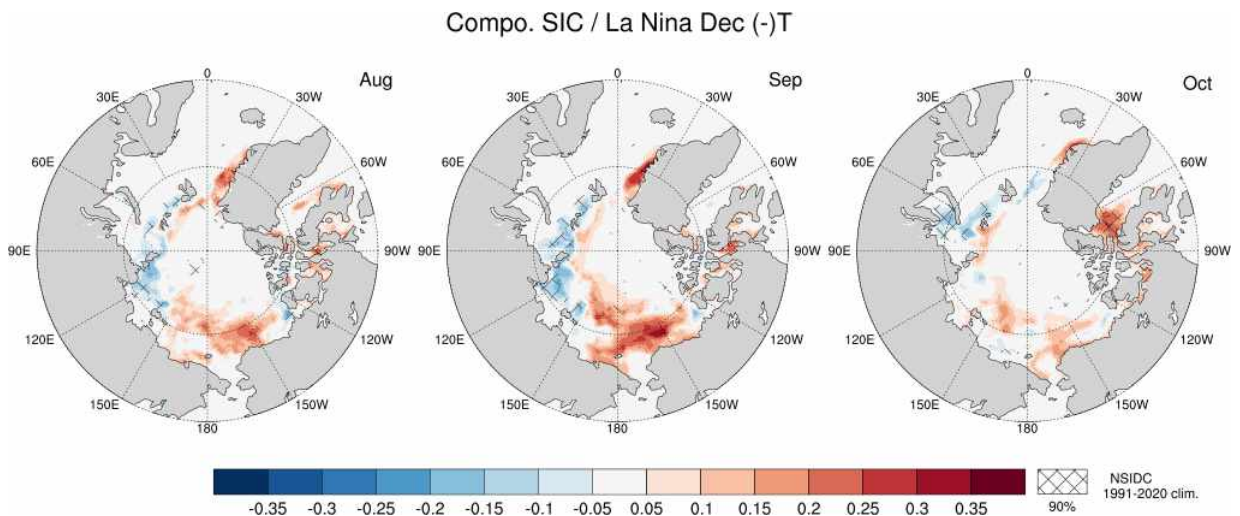


Figure 80. As in figure 79 but for the La Nina years with below normal December Korean temperature.

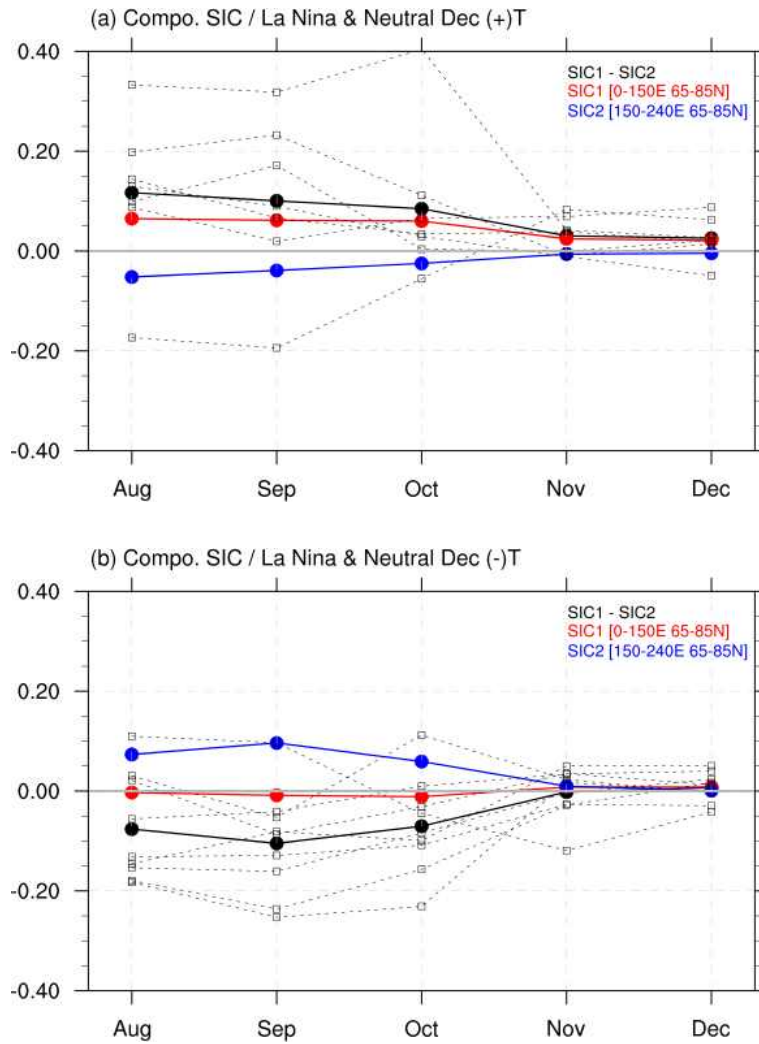


Figure 81. (a) Composite of the area averaged sea ice concentration anomalies for the La Nina and neutral condition years with above normal December Korean temperature. The red line is average over the Barents to Laptev sea (SIC1), the blue line is average over the East Siberian to Beaufort sea (SIC2), and the black solid line is difference between SIC1 and SIC2. The black dashed lines indicate difference of the individual year. (b) is same as (a) but for the below normal temperature.

Figure 82와 Figure 83은 겨울철 중립 해 지위고도 합성장을 나타낸다. 기온 높았던 경우는 북서태평양 하층에 고기압성 순환이 위치하고 상층 동남아시아에 저기압성~동북아시아 고기압성 순환이 위치해 엘니뇨 해 기온 높았던 경우와 유사했고, 기온 낮았던 경우는 반대로 라니냐 해 기온 낮았던 경우와 유사했다. 중립 해에도 기온 높고 낮았던 경우 차이는 라니냐 해와 유사하게 가을철 북극 주변과 열대 태평양에서 나타났고 북대서양에서도 차이가 있었다. 기온 높았을 때는 늦여름부터 바렌츠~랍테프해 해빙이 많고 동시베리아 해는 적은 경향을 보였으며 (Figure 81) 10월 우랄산맥 서쪽 지역에 저기압성 순환이 위치하고 양의 AO 경향을 보였다. 가을철 열대 태평양에서는 중태평양 엘니뇨와 유사한 반응이 나타났는데, 열대 동인도양~서태평양 낮은 해수면온도, 중태평양 높은 해수면온도, 동태평양 낮은 해수면온도가 이어지며 11월과 12월 동인도양~서태평양 대류억제, 중태평양 대류 강화와 이로 인한 반응으로 동북아시아 지역 상층 고기압성 순환이 형성되는 경향을 보였다. 한편 북태평양 북동쪽에는 높은 해수면온도와 고기압성 순환이 늦여름부터 겨울까지 유지되었는데 겨울철 북태평양 전반에 고기압성 순환이 강화된 것과 관련된 것으로 보인다. 기온 낮았을 때는 8월부터 가을철 동안 북대서양 아열대부터 북쪽으로 양~음~양의 해수면온도 편차의 tripole 형태를 보였고 이와 함께 그린란드 남쪽 북대서양에 저기압성 순환, 그린란드에 고기압성 순환이 위치하는 음의 NAO 패턴을 보였다. 9월에는 NAO 패턴은 나타나지 않았으나 바렌츠해 지역의 고기압성 순환은 계속 이어졌으며 12월에는 북극 전체적으로 고기압성 순환이 위치하는 음의 AO가 나타나는 경향을 보였다. 이 경우 열대 대류 활동에는 특별한 특징을 보이지 않아 12월에 동아시아~북태평양 중위도에 이어진 저기압성 순환은 열대 태평양보다는 북극과 북대서양에서 만들어진 시그널의 영향을 받은 것으로 보인다.

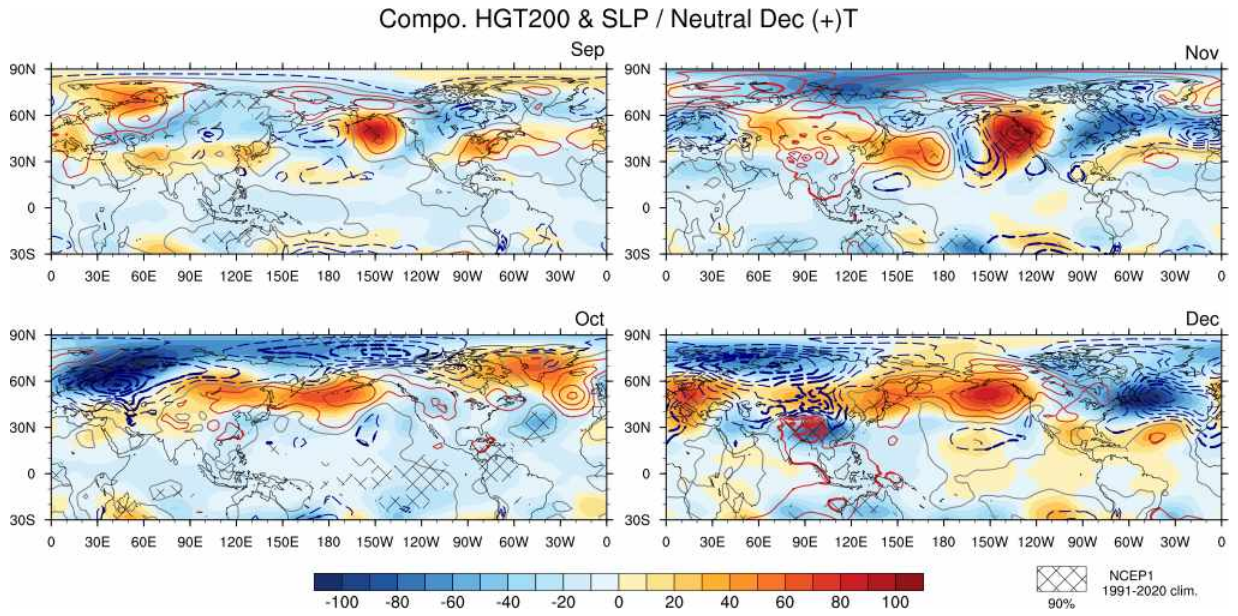


Figure 82. As in figure 72, but for the neutral condition years with above normal December Korean temperature.

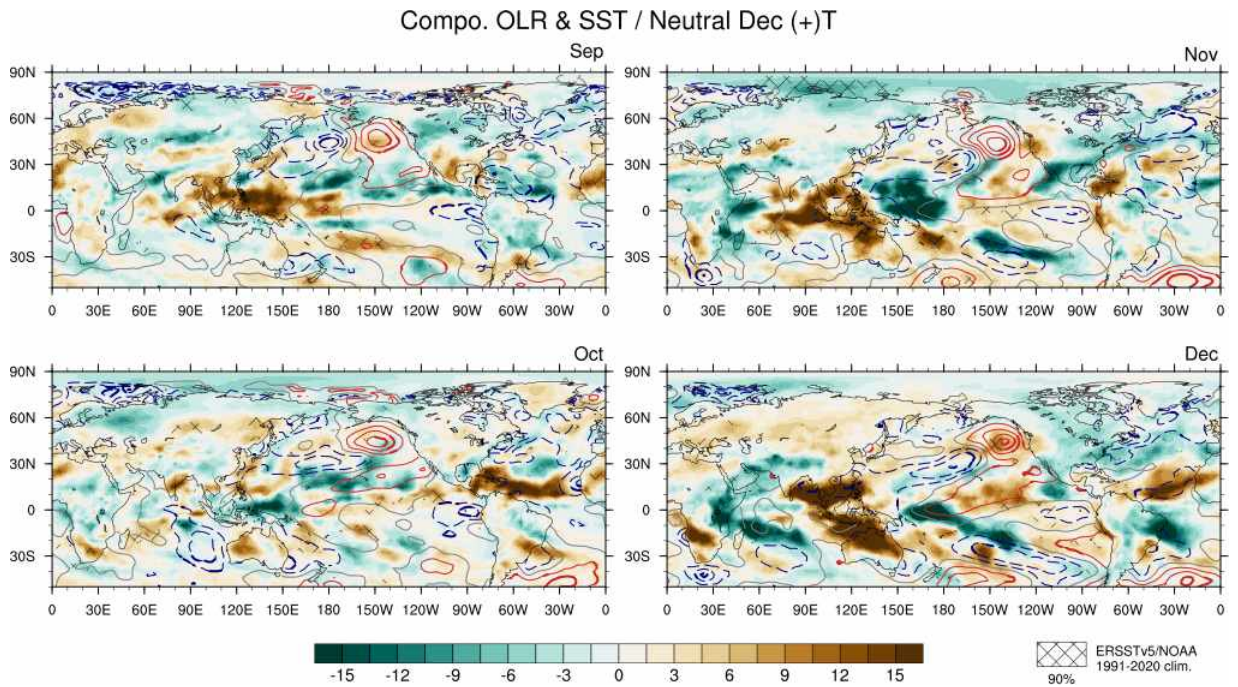


Figure 83. As in figure 73, but for the neutral condition years with above normal December Korean temperature.

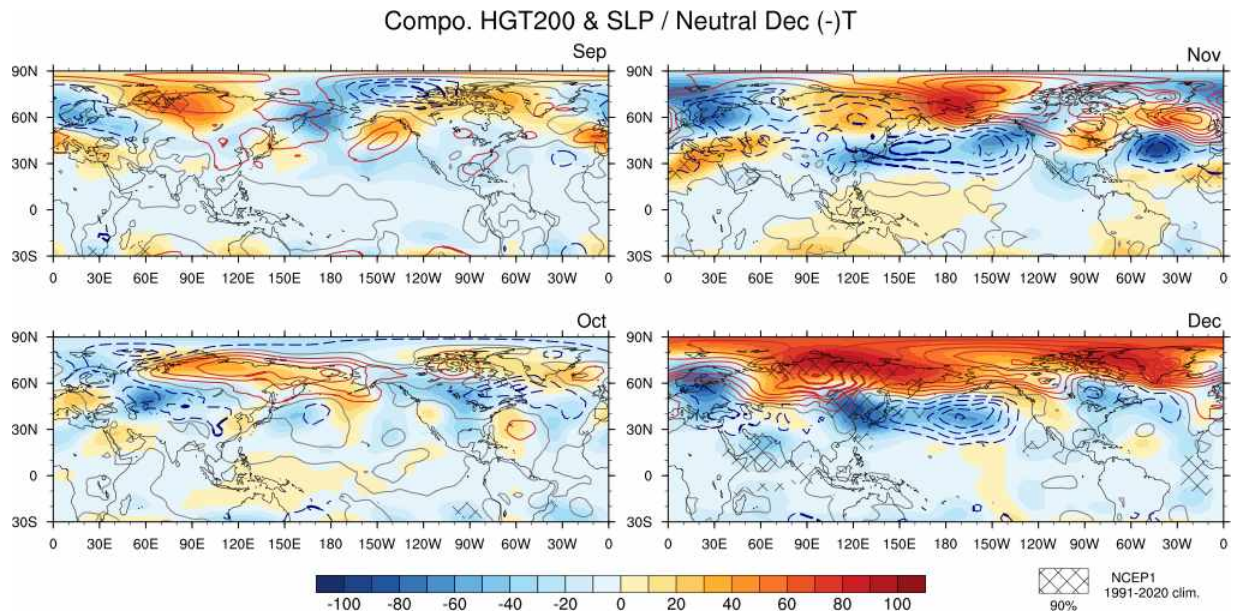


Figure 84. As in figure 72, but for the neutral condition years with below normal December Korean temperature.

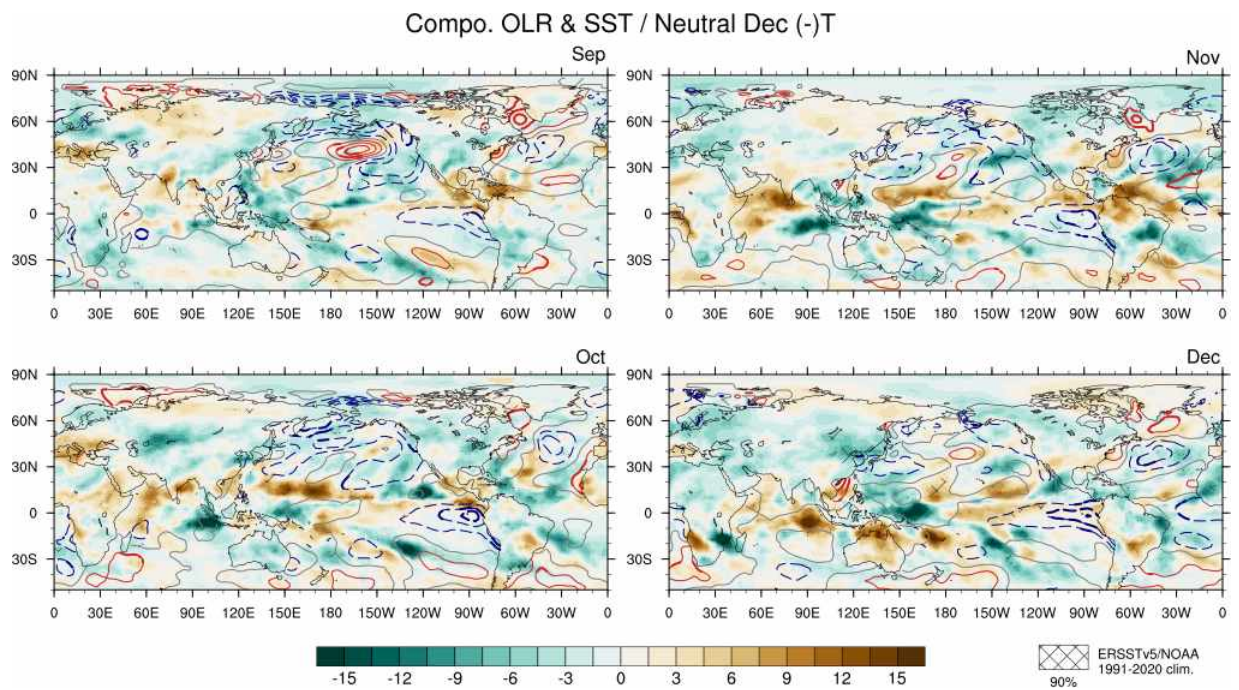


Figure 85. As in figure 73, but for the neutral condition years with below normal December Korean temperature.

(5) 1월 기온과 관련된 가을철 선행 특성

1월은 12월과 다르게 우리나라 기온과 ENSO의 상관관계가 낮았는데, ENSO 위상별 1월 기온 경향을 살펴보면 기온이 평년보다 높았던/비슷했던/낮았던 해의 개수는 엘니뇨 5/8/4, 라니냐 3/7/7, 중립 4/4/6으로 라니냐 해에만 기온이 높지 않은 경향이 있고 엘니뇨와 중립 해는 특별한 경향이 없어 ENSO 위상에 따라 분류해 특징을 살펴보기는 어려웠다. 또한 단순히 기온 높았던 해와 낮았던 해로 분류해 합성장을 살펴보면 가을철에는 공통적인 특징을 찾기가 어려웠고 같은 기온 경향을 보였더라도 개별 해의 순환장을 살펴보면 특징이 다양하게 나타났다. 따라서 먼저 우리나라 기온과 관련된 1월의 순환장 구조를 찾고 그 패턴과 관련된 가을철 신호를 찾아 예측 인자로 활용하기로 하였다.

1월 기온과 관련된 순환장 구조를 찾기 위해 유라시아 영역에 대해 500hPa 지위고도와 지표 2m 기온의 SVD 분석을 수행하고 이로부터 세 가지 모드를 추출하였다. SVD 분석 영역은 북반구 0~150° E 지역으로 유라시아 대륙만 포함되도록 설정했는데, 우리나라 기온과의 관련성이 높은 패턴을 찾기 위해 겨울철 큰 변동성이 나타나는 북태평양 지역은 제외하였다. Figure 86에 나타낸 SVD 세 모드는 각각 전체 변동성의 약 50%, 22%, 16%를 차지했으며 PC 시계열과 1월 기온과의 상관계수는 0.46, 0.35, 0.52를 나타냈다. 첫 번째 모드는 유라시아 대륙이 전체적으로 따뜻한 패턴으로 우랄산맥 주변에 저기압성 순환이 위치하고 바이칼호를 중심으로 한 동북아시아 지역에 고기압성 순환이 위치했다. 두 번째 모드는 유라시아 북쪽과 남쪽이 반대로 나타나는 모드로 바이칼호 북쪽은 기온 낮고 저기압성 순환이 위치하고 남쪽은 기온 높고 고기압성 순환이 위치하는 패턴이었다. 이때 고기압성 순환은 중국 내륙에 중심이 위치하였다. 두 번째 모드는 PC 시계열과 우리나라 기온의 상관계수가 세 모드 중에서는 가장 낮았다. 세 번째 모드는 유럽에서 파동이 전파되는 구조로 북동 유럽은 기온 높고 고기압성 순환이, 중동과 유라시아 중앙 우랄산맥 부근은 기온 낮고 저기압성 순환이, 우리나라 주변은 기온 높고 고기압성 순환이 위치하였다. 세 모드의 합은 전체 변동성의 88%를 차지해 세 모드의 가을철 선행 패턴을 찾으면 우리나라 1월 기온에 영향을 주는 가을철 감시 예측인자로 활용할 수 있다.

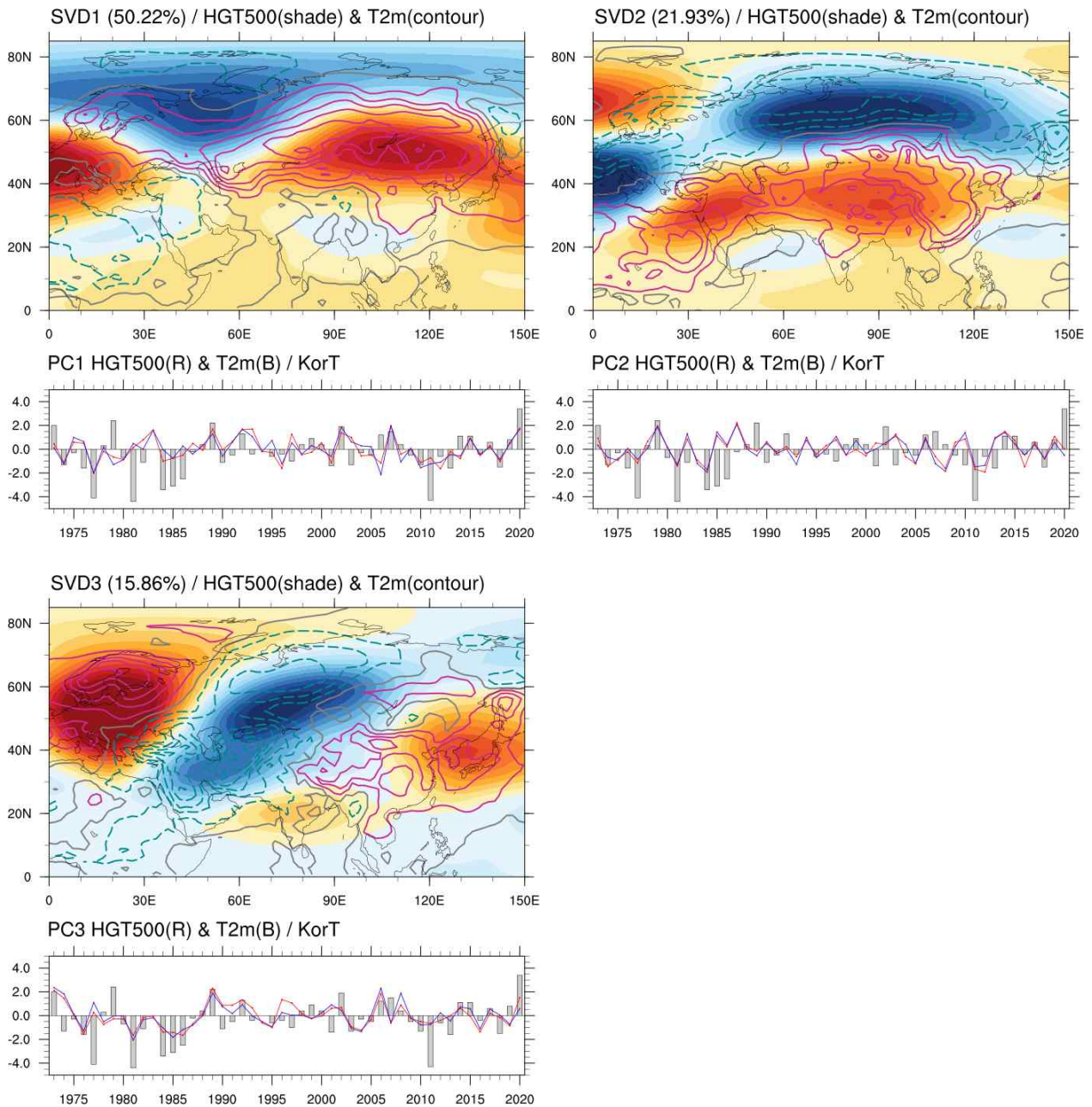


Figure 86. The spatial pattern and the corresponding principal component time series of the first three SVD modes of the 500hPa geopotential height anomalies (shading, red line) and 2m temperature anomalies (contour, blue line) during January. The January Korean temperature anomalies are represented as gray bars with PC time series.

Figure 87(b)는 500hPa 지위고도 PC 시계열의 0.5표준편차를 기준으로 양/음의 값을 나타낸 해의 1월 기온을 나타낸다. 대체로 양의 PC일 때 기온 높고 음의 PC일 때 기온 낮은 경향을 나타냈으나 양의 PC2에서는 뚜렷한 기온 경향을 나타내지 않았다. 따라서 PC의 부호와 기온 경향을 함께 고려해 해를 나누고 합성장 분석을 수행해 각 모드와 관련된 1월 기온에 영향을 줄 수 있는 가을철 선행 특징을 살펴보았다. 세 모드와 관련된 특징은 북극 해빙과 북극 연직온도, 북대서양 해수면온도, 열대 해수면온도와 대류활동의 영향으로 나눌 수 있었다.

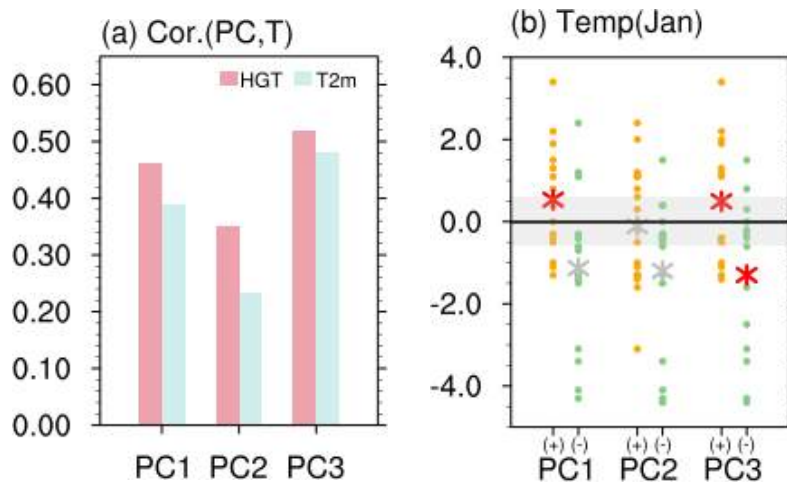


Figure 87. (a) Correlation coefficients of January Korean temperature with SVD PCs. (b) Plot of the January Korean temperature anomalies according to the positive and negative PCs. The asterisk indicates mean of the temperature anomalies. The statistically significant value at 90% confidence level is indicated by red.

북극 해빙은 첫 번째 모드와 가장 관련이 깊었다. 지위고도 PC 시계열을 해빙에 회귀분석하면 8월~10월 바렌츠-카라해 해빙과 양의 상관성이 첫 번째 모드에서 가장 잘 나타났고 다른 두 모드는 시그널이 약했다. Figure 88과 Figure 89는 양의 PC1과 기온 높았던 해, 음의 PC1과 기온 낮았던 해의 해빙과 500hPa 기온 편차의 합성장으로 회귀분석 결과와 유사했다. 1월 기온이 높았던 해에는 북극 해빙 많은 경향과 바렌츠-카라해를 중심으로 저온 편차가 나타났으며 기온 낮았던 해에는 바렌츠-카라해 해빙 적은 경향과 고온 편차가 나타났다. 그런데 바렌츠-카라해 해빙이 적지 않았던 경우에도 기온이 낮았던 사례를 양의 PC2 해에서 찾을 수 있었다 (Figure 90). 이 경우 해빙은 반대 경향이지만 연직 온도는 고온 편차로 나타났다. Figure 91은 기온 낮았던 음의 PC1과 양의 PC2 해의 PCH (Polar Cap Height, 65N 북쪽의 지위고도 평균) 합성장으로 10월에 하층의 양의 편차가 상층으로 전파되는 형태를 보인다. 두 달 뒤인 12월 이후 다시 하층으로 전파되는 형태를 보이는데, 가을철 연직 전파된 파동은 성층권을 교란시킬 수 있으며 1월에 음의 AO 위상을 유발할 수 있다(Kim et al. 2014; Wang and Chen 2010). PCH 합성장에 사용된 해의 1월 AO지수는 대부분 음의 값이며 특히 PC1은 1월 AO 지수와의 상관계수가 0.69로 높게 나타나 1월 음의 AO 발생과 높은 관련성을 보였다. 따라서 바렌츠-카라해 지역에 가을철 연직으로 고온/고기압성 편차가 나타난 경우 1월 기온이 평년보다 낮을 수 있으며, 바렌츠-카라해 해빙이 적으면 북극 고온 편차가 나타나는데 호조건이나 다른 원인으로 고온이 나타나는 사례도 있어 해빙 단독으로 예측인자로서 활용하기보다 북극 연직 기온과 함께 고려해서 판단해야 하겠다.

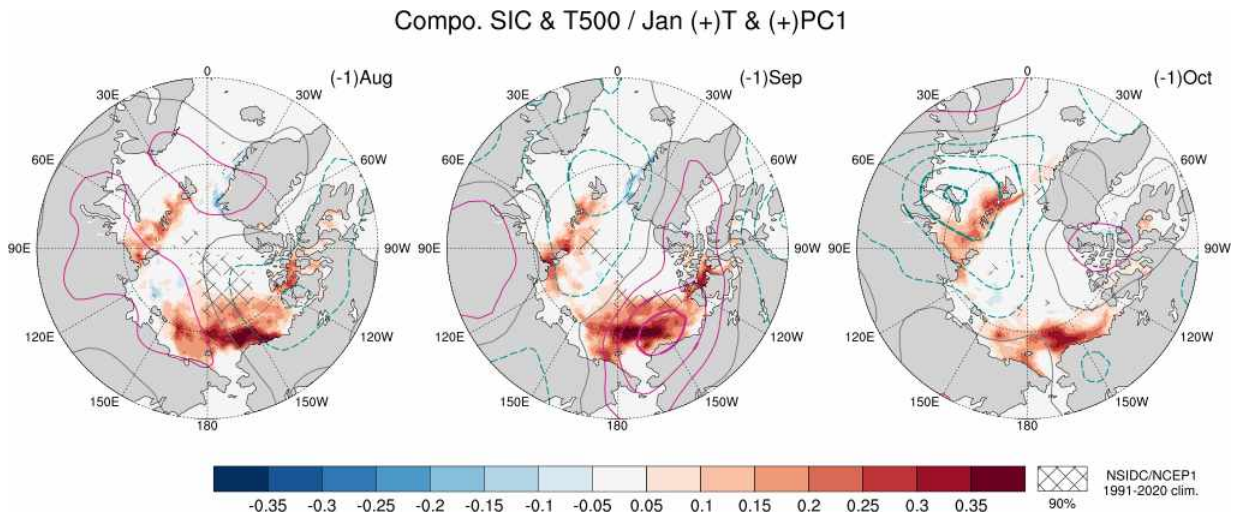


Figure 88. Composite maps of the sea ice concentration anomalies (shading) and 500hPa temperature anomalies (contour) in the preceding August to October for the positive PC1 years with above normal January Korean temperature. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

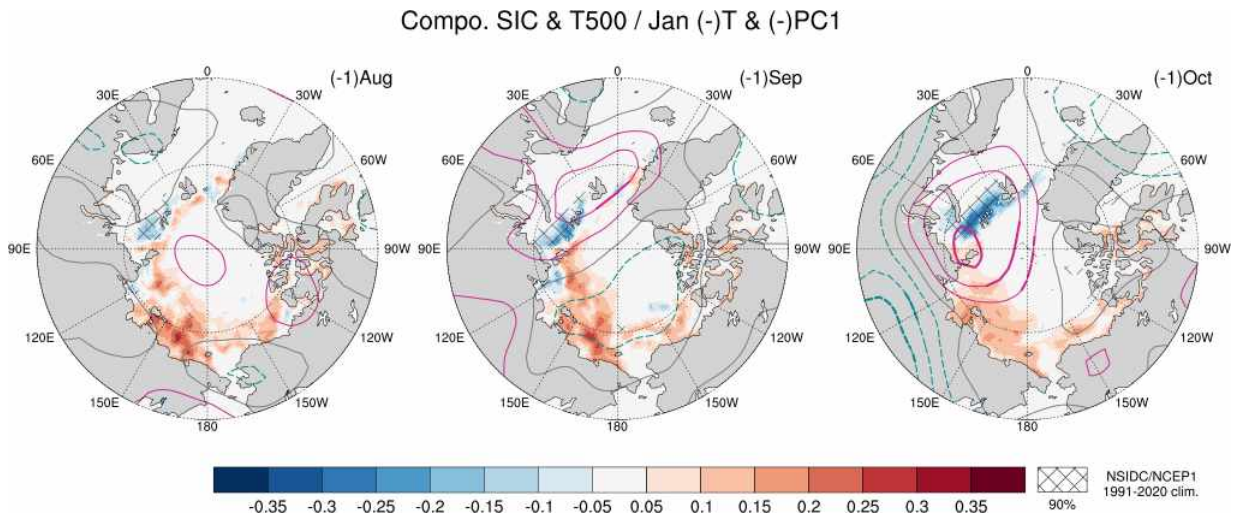


Figure 89. As in figure 88, but for the negative PC1 years with below normal January Korean temperature.

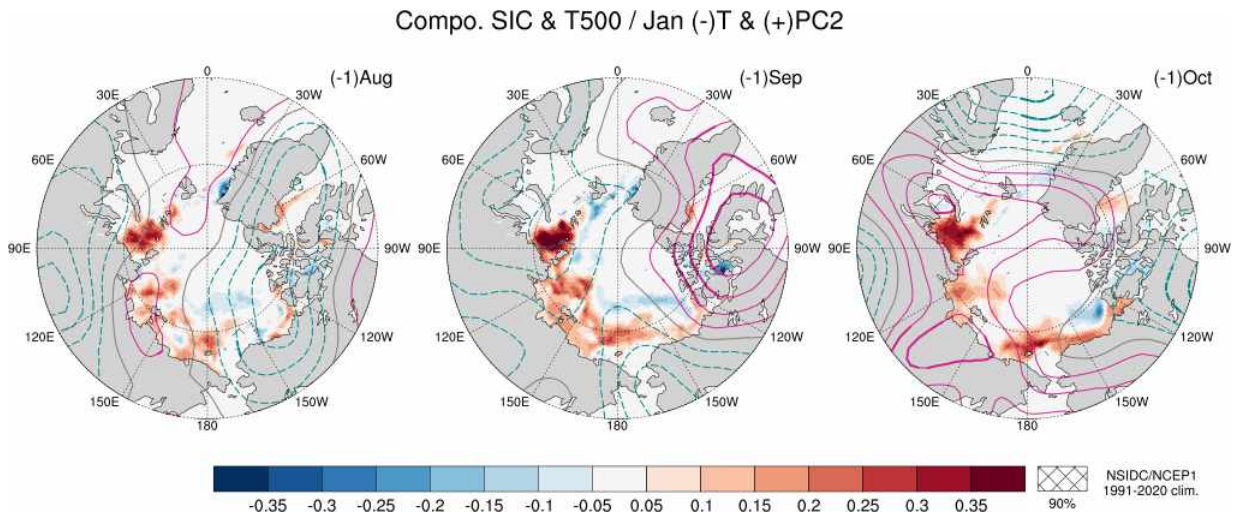


Figure 90. As in figure 88, but for the positive PC2 years with below normal January Korean temperature.

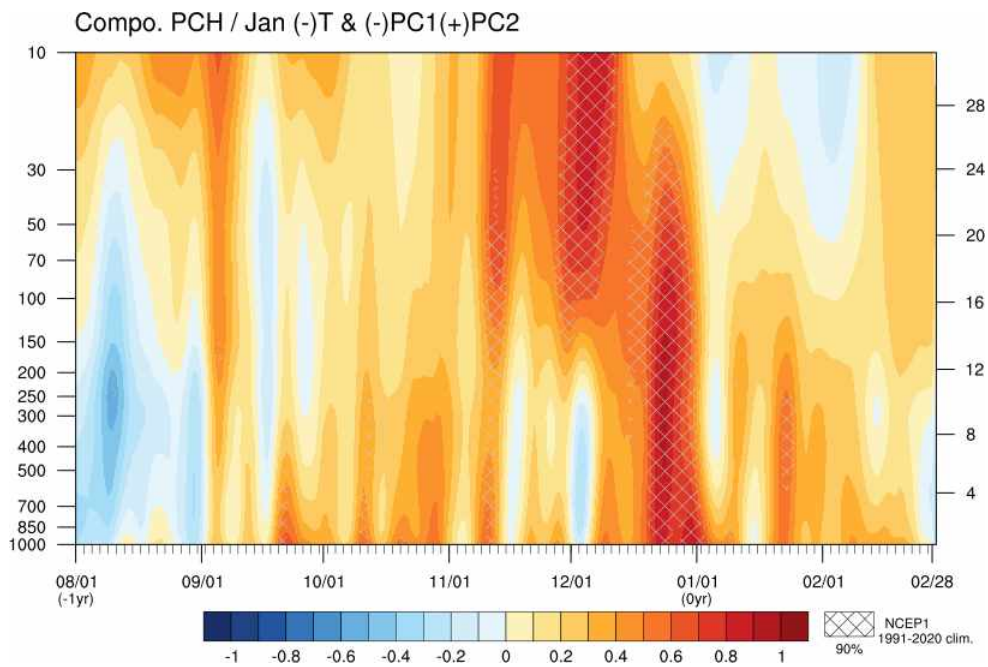


Figure 91. Composite evolution of the PCH anomalies for the negative PC1 and positive PC2 years with below normal January Korean temperature from the preceding August to February. The diagonal indicates statistically significant area at 90% confidence level.

북대서양 해수면온도와 관련된 특징으로 늦여름 tripole(또는 dipole) 형태의 해수면온도 편차가 나타났다. 기온이 높았던 경우 여름에 북대서양 열대부터 극 방향으로 음~양~음의 해수면온도 편차가, 기온 낮았던 경우는 반대로 양~음~양의 형태가 나타나는 경향을 보였다(Figure 92). PC와 기온경향에 따른 해수면온도 편차 합성장에서 tripole 위치는 약간씩의 차이는 있었으나 약 30N 근방에서 기온 높았을 때 양의 해수면온도 편차, 낮았을 때 음의 편차가 위치한 경향을 보였다. 8월 북대서양 해수면온도와 다음해 1월 순환장의 관계를 살펴보기 위해 8월 해수면온도를 지수화하여 ([50-15W, 20-40N] - [55-20W, 5S-15N]) 다음 해 1월 지위고도와 2m 온도에 회귀분석 하면 북대서양, 유럽, 우랄산맥 부근, 동북아시아로 이어지는 파동 형태가 나타남을 볼 수 있었다(Figure 93). 이는 기존의 여름철 북대서양 해수면온도와 동아시아 겨울몬순에 대한 선행 연구에서 제시된 결과와도 유사했는데, 선행 연구에서는 여름철 북대서양 dipole 형태의 해수면온도가 대기와의 피드백 과정을 통해 겨울까지 유지되고 파동의 소스로 작용해 유라시아를 가로지르는 wave train을 유도할 수 있다고 밝혔으며 (Chen et al. 2019; Li 2004) 전파된 파동으로 동아시아에 고/저기압성 편차가 위치하며 우리나라에 고온/저온 편차가 나타나는 것으로 해석될 수 있다.

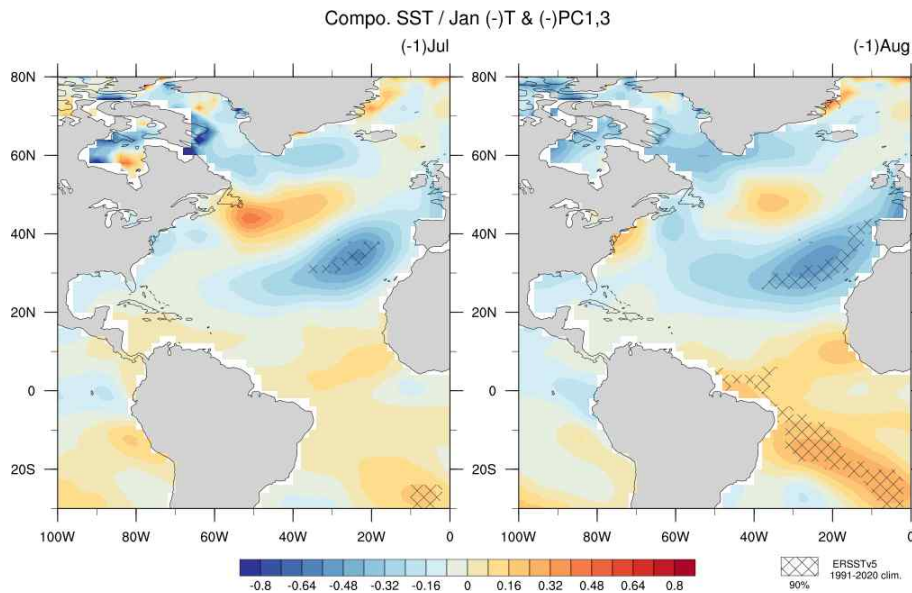


Figure 92. Composite of the Atlantic SST anomalies in the preceding July and August for the negative PC1 and PC3 years with below normal January Korean temperature. The diagonal indicates statistically significant area at 90% confidence level.

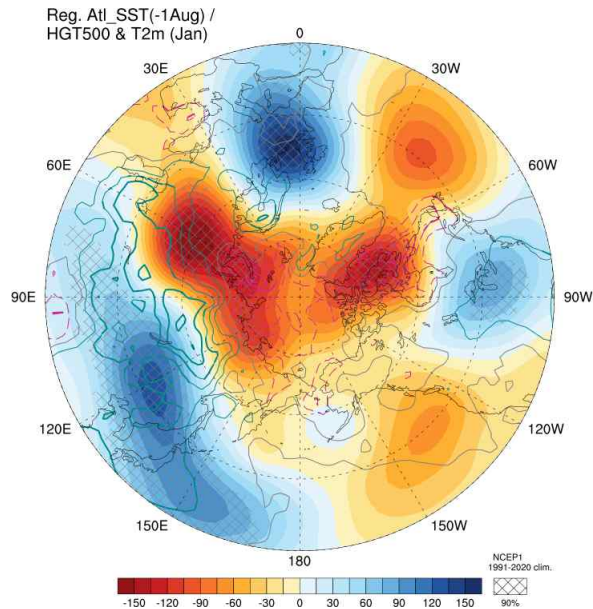


Figure 93. Regression map of the 500hPa geopotential height (shading) and 2m temperature (contour) in January with respect to the Atl_SST index in the preceding August. The diagonal indicate statistically significant area at 90% confidence level. The Atl_SST index was defined as a difference between the area averaged SST anomalies (50-15W, 20-40N) - (55-20W, 5S-15N).

Figure 94는 1월 기온이 낮았던 해의 합성장으로 열대 동태평양 해수면온도가 평년보다 낮은 경향을 보였으며 대류활동은 서태평양에서 활발하고 해수면온도가 낮은 중태평양에서 억제되는 라니냐와 유사한 경향을 보였다. 서태평양에서 대류활동이 활발하면 이에 대한 대기 반응으로 대류활동이 활발한 지역의 북서쪽 상층에 고기압성 순환이 유도되고 이에 대한 로스비 파 전파 형태로 동아시아 지역에는 저기압성 순환이 유도될 수 있다(Son et al. 2014; Wang et al. 2000). 그러나 반대 경우로 1월 기온이 높았던 해에는 열대 동태평양 해수면온도가 높은 엘니뇨 패턴이 나타나지 않았다. 선행 연구에서는 엘니뇨에 대한 대기 반응이 1월이 되면 달라지는 이유로 12월에 비해 1월에는 쿠로시오 고기압을 유도하는 서태평양 음의 강수는 약해지고 중위도 북태평양에 저기압성 흐름을 유도하는 중태평양 강수는 강해지면서 두 영향이 중첩되어 우리나라에 영향을 주는 쿠로시오 고기압이 약해져 엘니뇨와의 상관성이 약해진다고 밝혔다(Kim and Kug 2019; Son et al. 2014). Figure 95는 Nino3.4 지수가 양인 해와 음인 해의 1월과 12월 OLR 차이를 나타내는데 두 경우 모두 서태평양 Maritime continent 지역에서 음의 차이를 보였다. 이는 동태평양 해수면온도가 높았던 경우 대류 억제가(양의 OLR) 약화 되고, 동태평양 해수면온도가 낮았던 경우 대류 강화가(음의 OLR) 강해짐을 의미한다. 즉 동태평양 해수면온도가 높은 엘니뇨 상황에서는 1월에 서태평양 음의 강수가 약해지며 쿠로시오 고기압이 약해져 1월 우리나라 높은 기온과 열대 동태평양 해수면온도와의 관련성이 나타나지 않은 것으로 보인다. 반면 동태평양 해수면온도가 낮았던 라니냐 유사 패턴에서는 1월에 서태평양 대

류 활동이 약해지지 않기 때문에 그로 인한 대기 원격상관 반응이 한반도 주변 저기압성 순환에 영향을 줄 수 있는 것으로 보인다. 1월의 열대 동태평양의 낮은 해수면온도와 서태평양 대류 강화 신호는 이전해 가을철부터 나타나기 때문에 이를 모니터링해 1월 기온 예측에 활용할 수 있다.

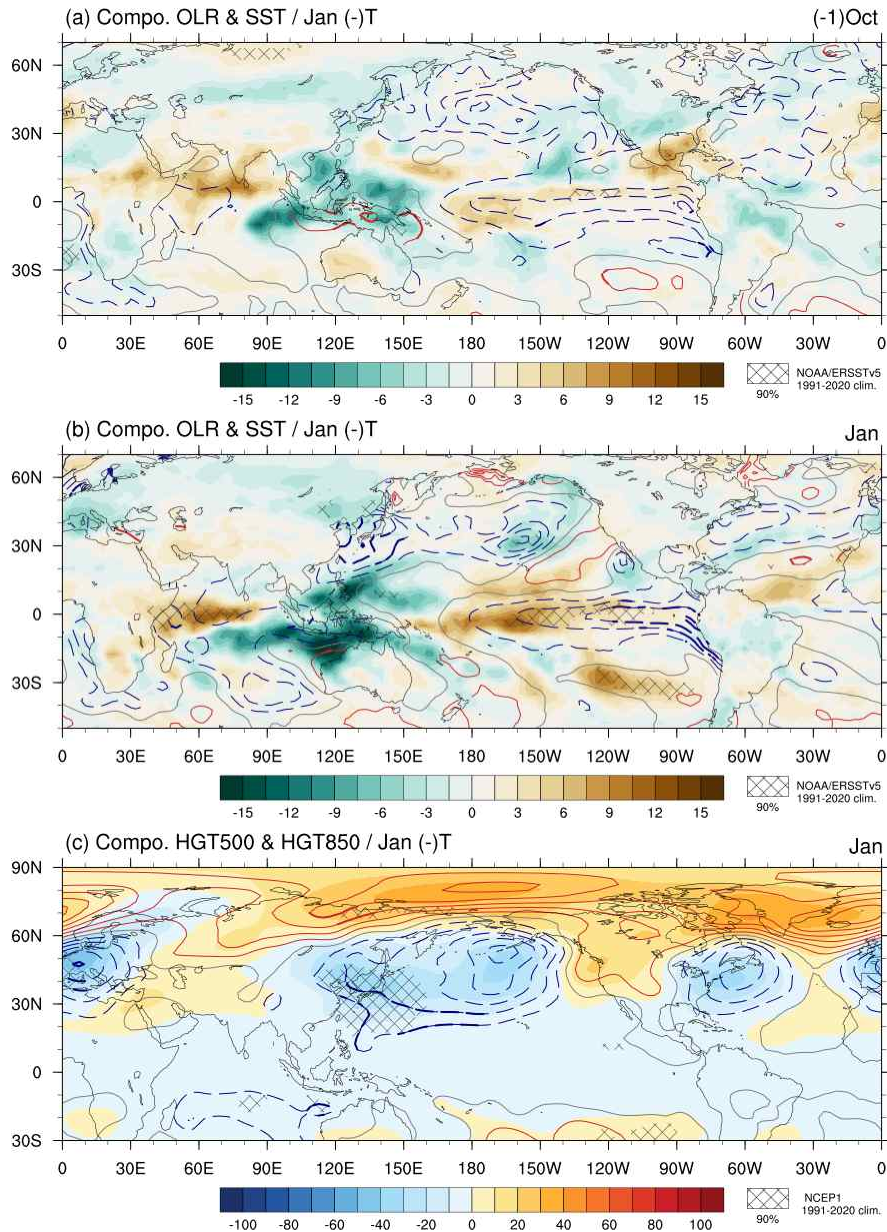


Figure 94. Composite maps of the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour) in the preceding October (a) and corresponding January (b) for the below normal January Korean temperature year. (c) is same as (b), but for the composite of the 500hPa (shading) and 850hPa (contour) geopotential height anomalies. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

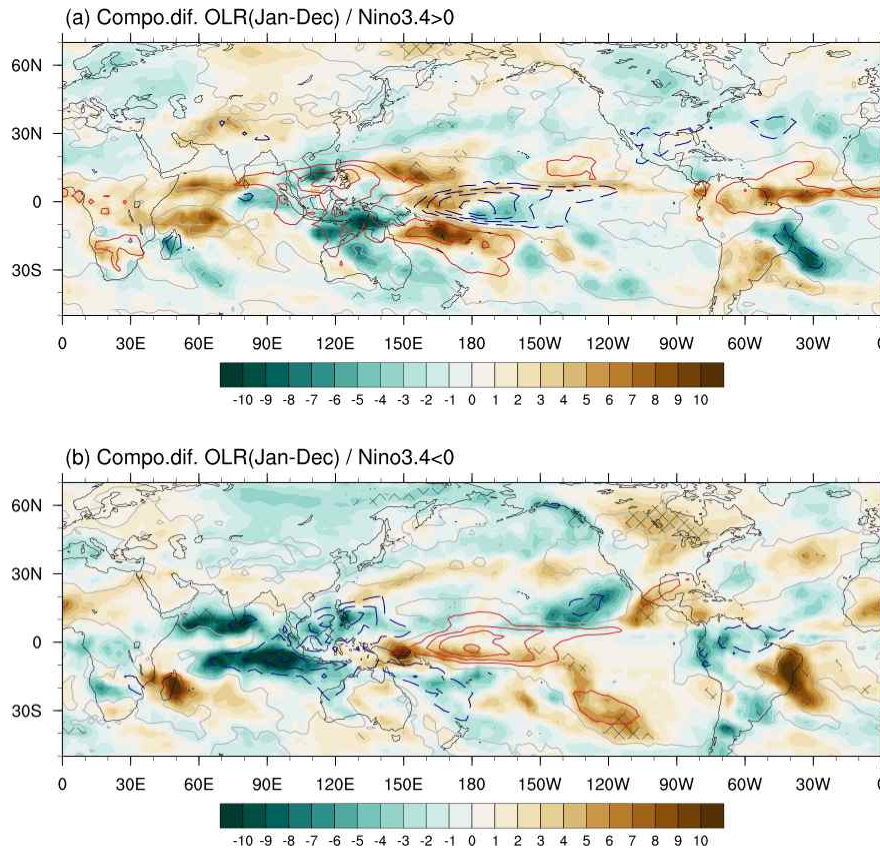


Figure 95. Composite maps of the OLR difference between corresponding January and preceding December for the positive (a) and negative (b) Nino3.4 index years. The overlaid contour denotes OLR anomalies in January.

Figure 96은 1월에 기온이 높았던 해 중 양의 PC2를 나타냈던 해 합성장으로 Figure 94에 나타난 기온 낮았던 경우와 유사하지만 대류활동 구조에서 약간의 차이를 보였다. 이 경우 동 인도양 지역 대류 억제와 서태평양 필리핀 동쪽 지역 대류활동 강화된 경향을 나타내 기온 낮았던 경우에 비해 동쪽으로 치우친 특징을 나타냈다. 해수면온도 또한 이러한 특징을 보였는데 중태평양에 양의 편차 중심이 위치한 중태평양 엘니뇨의 특징과 동아시아 지역에 고기압성 순환이 위치한 특징을 나타냈다. 이러한 사례는 2000년대 이후에 주로 나타났는데, 선행 연구에서는 이러한 구조가 중태평양 엘니뇨와 MJO 위상5-6의 복합적인 영향으로 발생할 수 있음을 제시한 바 있다(여새림 등, 2020). 이 경우 열대 중태평양 해수면온도는 높고 인도양 해수면온도는 낮은 특징이 가을철부터 나타났기 때문에 감시 인자로서 1월 기온 예측에 활용할 수 있다.

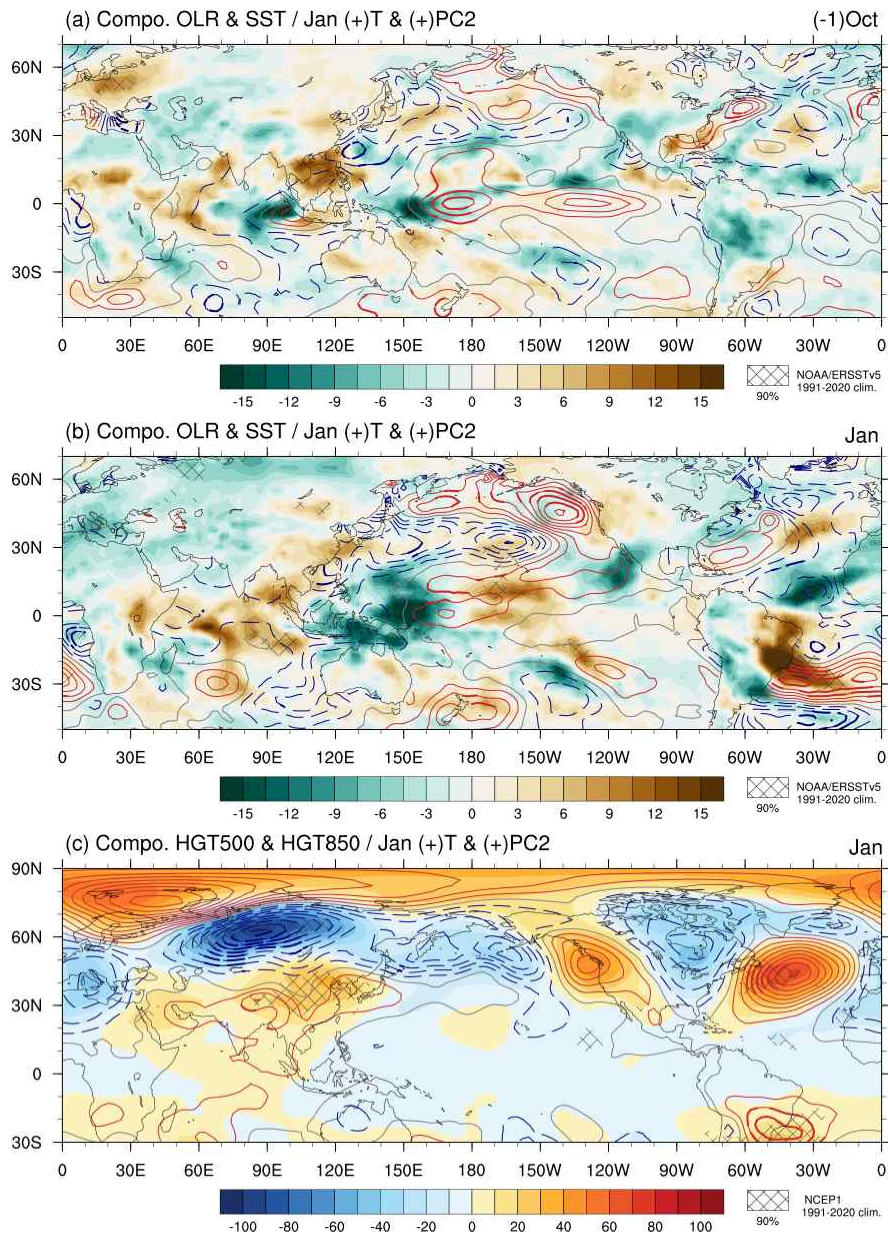


Figure 96. As in figure 94, but for the positive PC2 years with above normal January Korean temperature.

(6) 2월 기온과 관련된 가을철 선행 특성

2월은 우리나라 기온의 장기 변화가 가장 크게 나타난 달로, 특히 기온 증가 트렌드는 겨울철 세 달 중 가장 뚜렷하게 나타났다. ENSO, AO와 기온의 상관성에도 변화가 있었는데, AMO 위상이 바뀐 1990년대 후반을 전후로 ENSO와의 상관성은 증가하고 AO와의 상관성은 감소하는 특징을 보였다. 따라서 2월은 1998/99년을 기준으로 전반기(P1, 1998/99년 이전)와 후반기(P2, 1998/99년 이후)로 나누어 평년보다 기온 낮았을 때의 P1과 P2의 차이를 살펴보고 최근 나타나는 낮은 기온과 관련된 가을철 선행 패턴에 대해 분석했다.

Figure 97은 P1 기간 2월 기온이 평년보다 낮았던 해의 합성장을 나타낸다. 기온이 낮았을 때 북태평양과 우리나라 주변에 저기압성 순환, 북유럽과 우랄산맥 부근에 고기압성 순환이 위치하였고, 하층 해면기압은 북태평양에 알류산 저기압이 강화되고 대륙고기압은 한반도까지 확장해 서로 대치하는 서고동저 형태의 전형적인 겨울철 추운 패턴을 보였으며 음의 AO와 유사한 패턴이었다. 해수면온도와 대류 활동은 저기압성 편차가 위치한 중위도 북태평양 해수면온도가 낮고, 북동태평양 지역은 대류 억제와 높은 해수면온도를 나타냈으며 열대지역은 인도양에서 대류 억제 경향이 있었으나 뚜렷한 특징은 잘 나타나지 않았다.

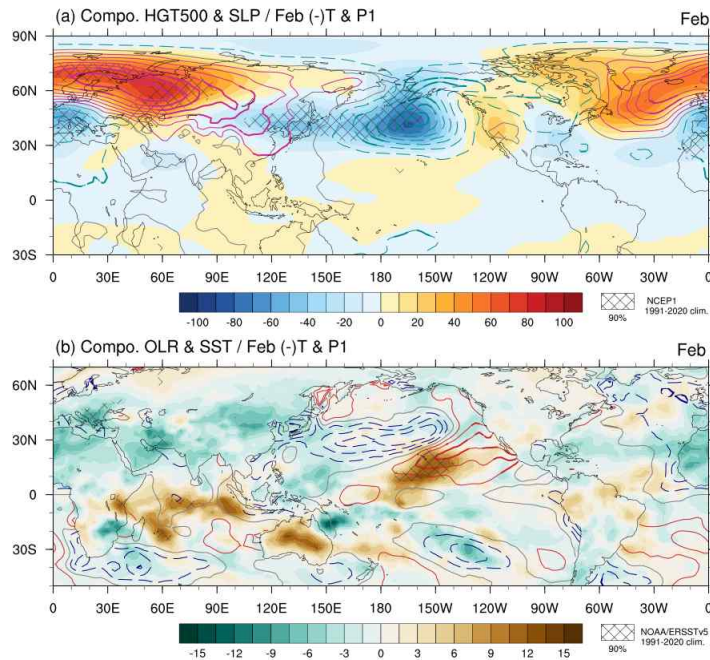


Figure 97. Composite maps of the (a) 500hPa geopotential height (shading) and sea level pressure (contour) anomalies, and (b) OLR (shading) and SST (contour) anomalies for the below normal February Korean temperature years during P1. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

P2 기간 2월 기온이 낮았던 때 합성장에서는 (Figure 98) 우리나라에 주변 저기압성 순환은 위치했으나 북태평양 동쪽에서는 반대로 고기압성 순환이 나타났고, 북대서양은 그린란드 남쪽에 고기압성 편차가 위치해 양의 NAO 패턴이 나타나는 차이가 있었다. 하층 해면기압도 대륙고기압과 알류산 저기압 세기가 약해 우랄산맥 지역 고기압성 순환과 동아시아 저기압성 순환으로 이어지는 구조는 P1 기간과 유사했으나 북태평양 전반에 알류산 저기압이 강화되며 추워지는 구조와는 차이가 있었다. P2 기간 북태평양 동쪽에는 고기압성 편차가 위치했는데, 북태평양 북서쪽 저기압성 편차와 남동쪽 고기압성 편차가 위치한 형태는 NPO와 유사했다. 선행 연구에서는 겨울철 NPO 패턴이 2005년을 전후로 공간적 차이가 있고 북태평양 대기와 해양의 두 번째 결합모드인 NPO/NPGO 모드가 과거보다 최근 기간 크게 강화되었음을 보였다 (예상욱 등, 2020). 선행 연구와 유사하게 2월 SST와 해면기압을 P1과 P2 기간으로 나누어 SVD 분석을 수행했고 Figure 99에 각 기간의 첫 번째 모드를 나타내었다. 두 기간 SST 패턴은 북태평양 중앙에 음의 해수면온도 중심이 P2 기간 서쪽으로 약간 이동하고 동쪽의 말발굽 형태의 양의 해수면온도가 더 강해진 차이가 있었다. 이와 관련된 해면기압은 과거 북태평양 전체에 하나의 저기압이 위치한 패턴에서 최근에는 캄차카 반도와 베링해 쪽으로 고기압이 위치하고 저기압은 동쪽으로 밀려난 듯한 패턴이 나타나는 차이가 있었다. 따라서 과거에는 대륙고기압 확장으로 알류산 저기압 발달로 한반도 동서방향 기압차가 크게 벌어져 북풍이 강해지면서 기온이 낮아지는 경향이 뚜렷했으나 최근에는 북태평양의 대기 해양 결합 모드에 변화가 생기면서 과거와 같은 경향이 잘 나타나지 않았다.

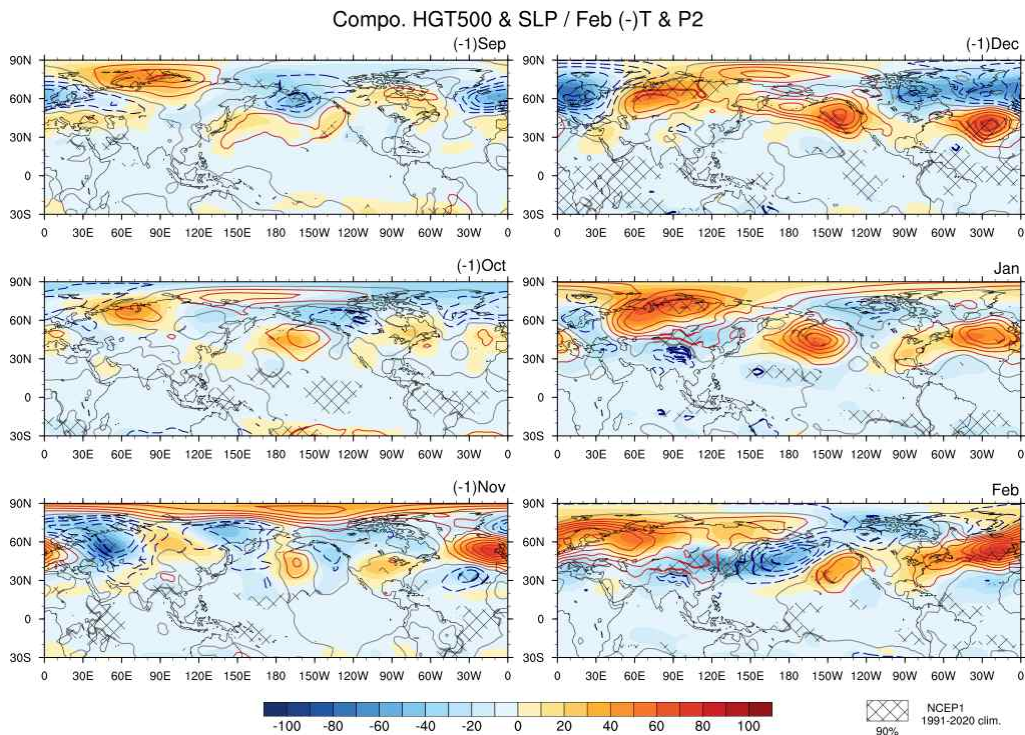


Figure 98. Composite maps of the 500hPa geopotential height anomalies (shading) and sea level pressure anomalies (contour) for the below normal February Korean temperature years during P2. The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

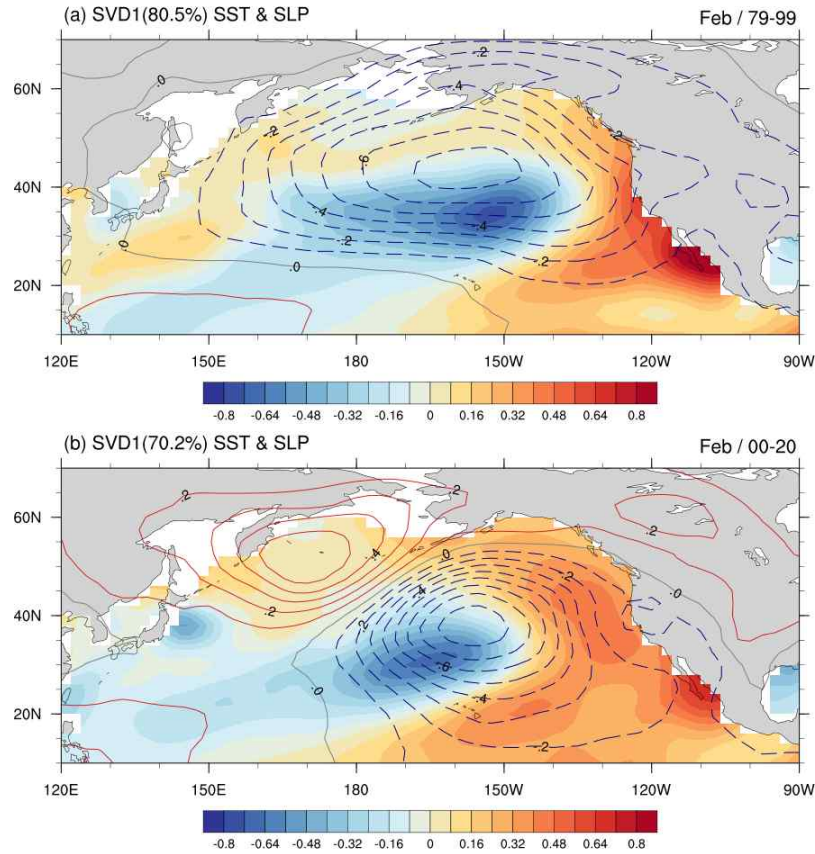


Figure 99. The spatial pattern of the first SVD modes of the SST anomalies (shading) and sea level pressure anomalies (contour) during February (a) from 1979 to 1999 (P1) and (b) from 2000 to 2020 (P2).

최근 기간 2월 기온이 낮았던 해의 가을철 선행 패턴은 북극에서 찾을 수 있었다. Figure 100은 P2 기간 2월 기온 낮았던 해의 이전 해 가을부터의 해빙 농도와 850hPa 기온 편차의 합성장을 나타낸다. 북극 해빙은 가을철 바렌츠 해 북부 지역에서 평년보다 적은 해빙 농도를 보였으나 다른 지역에서는 뚜렷한 신호를 보이지 않았다. 기온에서는 해빙보다 넓은 지역에서 나타나는 신호를 찾을 수 있었는데, 850hPa 기온 편차에서 바렌츠 해를 중심으로 고온 편차를 나타냈고 캐나다 북쪽과 그린란드 지역으로는 저온 편차가 나타나는 경향이 가을부터 이어졌다. 반대로 기온이 높았던 해의 합성장에서는 바렌츠 해 주변 저온과 캐나다 북쪽 고온 편차가 나타났다. 최근 선행 연구에서는 바렌츠-카라 해 지표 고온과 대륙고기압 강도의 관계에 변화가 있었고 해빙 변화에 대한 대기 반응만으로는 추운 겨울을 설명하기 어렵다고 주장하였는데, 북극 고온이 지표 근처에만 있을 때는 시베리아 고기압 강화가 유의하게 나타나지 않았고 연직으로 깊게 고온이 발달한 경우에 유라시아 추운 겨울을 유도할 수 있다고 제시하였다 (He et al. 2020; Labe et al. 2020; Xu et al. 2019). 우리나라 2월 기온 경향에 따른 합성장에서도 해빙보다는 기온에서 더 뚜렷한 차이를 볼 수 있었고 지표뿐만 아니라 연직으로 깊게 발달한 모습을 볼 수 있었다. Figure 101은 바렌츠-카라해 지역에서 평균한 연직 기온과 캐나다 북부 지역에서 평균한 연직 기온의 2월 우리나라 기온 낮았던 해와 기온 높았던 해의 합성장 차이를 나타낸 그림이다. 2월 기온이 평년보다 낮았던 경우 바렌츠-카라해 지역에서는 가을철부터

연직으로 깊게 고온 편차가 발달해 가을철 내내 이어지면서 늦겨울까지 나타났고, 반대로 캐나다 북부 지역은 저온 편차가 깊게 나타났다. 고온 편차 지역에는 고기압성 순환, 저온 편차 지역에 저기압성 순환이 위치했는데, 이러한 패턴은 가을 내내 지속되면서 초겨울에 더욱 강화되었고 12월에는 대서양에서 양의 NAO 패턴이 발달해 북대서양부터 우랄산맥 부근까지 양~음~양의 편차로 이어지는 파동 전파 형태가 나타났다. 북대서양부터 이어지는 파동 전파는 늦겨울까지 이어져 우랄산맥 지역 고기압성 순환 강화를 유도하고 이는 하층의 대륙고기압 강화와 동아시아 지역 기압골 강화를 유도해 늦겨울 동아시아 지역에 저온 편차를 유도할 수 있었다. 따라서 가을철 상태로부터 2월 기온 전망 시 기준에 사용하던 바렌츠해 북부 지역 해빙을 예측인자로 활용하기보다 바렌츠-카라해 지역과 캐나다 북부 지역에 깊게 발달한 기온 편차를 지속적으로 모니터링하는 것이 예측성 향상에 도움이 될 것으로 보인다.

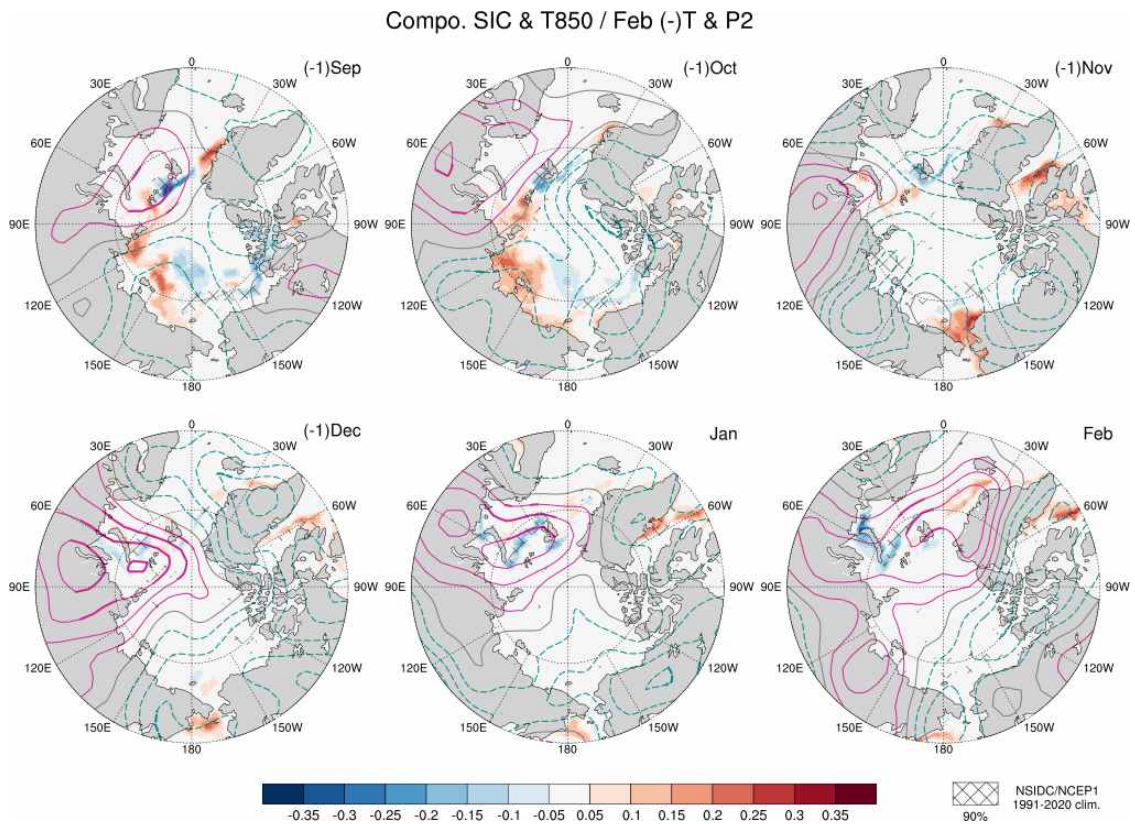


Figure 100. As in figure 98, but for the sea ice concentration anomalies (shading) and 850hPa temperature anomalies (contour).

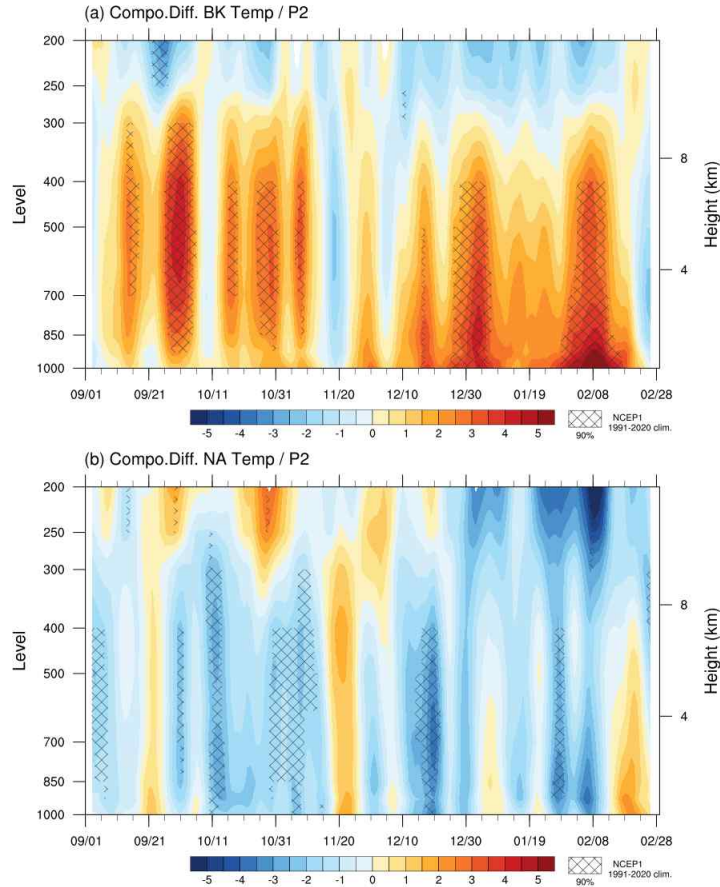


Figure 101. Composite mean differences of the air temperature anomalies averaged over the (a) Barents-Kara sea (30-90E 65-85N) and (b) northern Canada (150-60W 65-85N) between negative and positive February Korean temperature years during P2.

가을철 선행 패턴은 열대 해수면온도에서도 찾을 수 있었다. 2월 기온이 낮았을 때 P1 기간과 P2 기간의 차이는 순환장 뿐만 아니라 열대 해수면온도에서도 크게 나타났는데, 열대지역에서 특별한 패턴이 나타나지 않았던 P1 기간과 다르게 P2 기간에는 기온 낮았을 때 라니냐 패턴이 나타나는 특징이 있었다 (Figure 102). 라니냐 패턴의 해수면온도는 가을부터 나타나기 시작해 2월까지 지속되었으며 열대 대류활동은 서태평양 대류활발 중태평양 대류 억제가 나타났는데 이러한 대류 구조는 동아시아 지역에 저기압성 순환을 유도하는데 영향을 주었다. 앞 절에서 Nino3.4 지수와 2월 기온의 상관계수가 양의 AMO 기간 증가한 것을 보였는데 (Figure 69), ENSO와 관련된 2월 순환장에도 변화가 있었다. Figure 103은 P1과 P2 기간 겨울철 Nino3.4지수에 대한 지위고도의 회귀분석을 나타낸다. P1 기간에는 열대 태평양에서부터 북아메리카로 이어지는 PNA 패턴이 주를 이루고 동아시아에서는 별다른 특징이 나타나지 않았으나 P2 기간에서는 PNA 패턴이 북태평양 동쪽에서 나타나고 동아시아 부근에 양의 편차가 나타난 것을 볼 수 있었다. 이러한 차이는 대서양의 영향으로 생각된다. 최근 연구에서는 PDO와 AMO 위상이 서로 반대일 때 대서양이 대기에 영향을 주어 워커순환을 변화시킬 수 있다고 제시하였다(예상욱 등, 2020). 이들 연구에서는 음의 PDO와 양의 AMO 위상일 때 열대 대서양 전

반에 강한 상승운동이 나타나고 태평양에 하강기류가 발생함을 보였는데, 둘의 위상이 반대이면 위상이 같을 때 보다 열대 중태평양의 강수 반응이 더 서쪽에서 나타났다. 이러한 강수 구조의 차이는 동아시아에 미치는 영향이 달라질 수 있다. 최근의 P2 기간에 AMO는 양의 위상이었고 PDO는 양의 위상보다 음의 위상을 보인 기간이 길었는데, 이 기간에 선행 연구에서 밝힌 바와 같이 열대 태평양과 대서양의 상호작용이 과거와는 다르게 나타나며 열대 동태평양 해수면온도와 우리나라 2월 기온의 상관성에도 변화가 나타난 것으로 보인다.

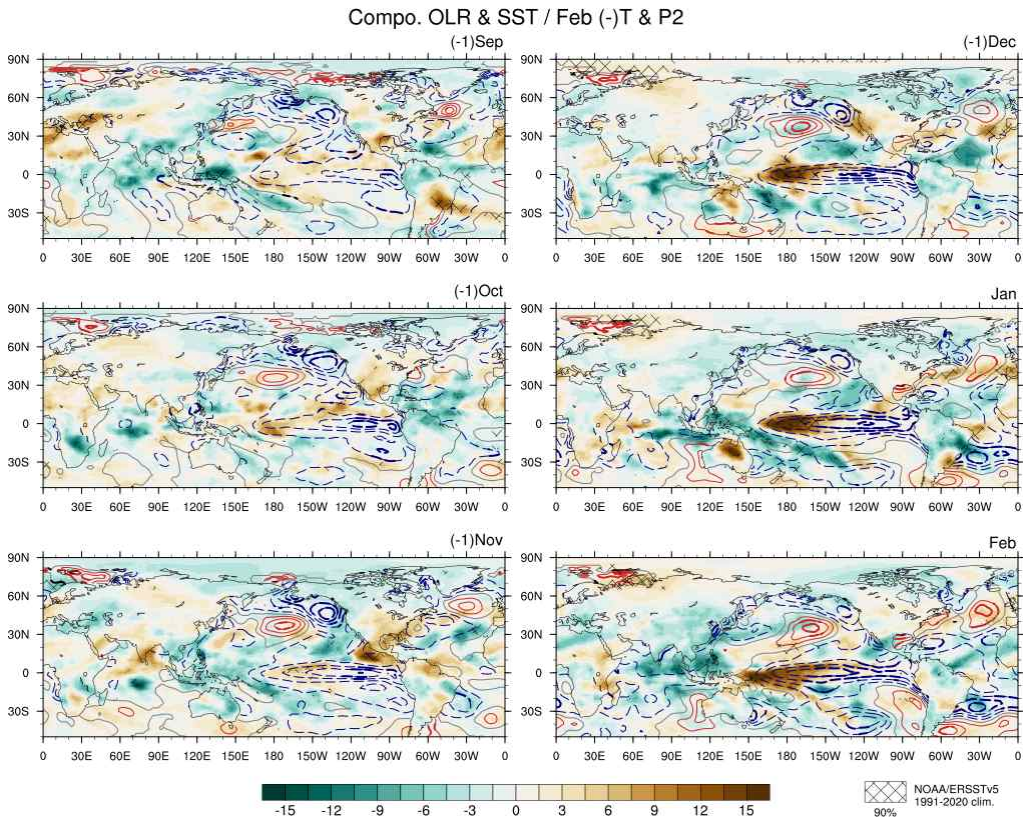


Figure 102. As in figure 98, but for the OLR anomalies (shading) and SST anomalies (contour).

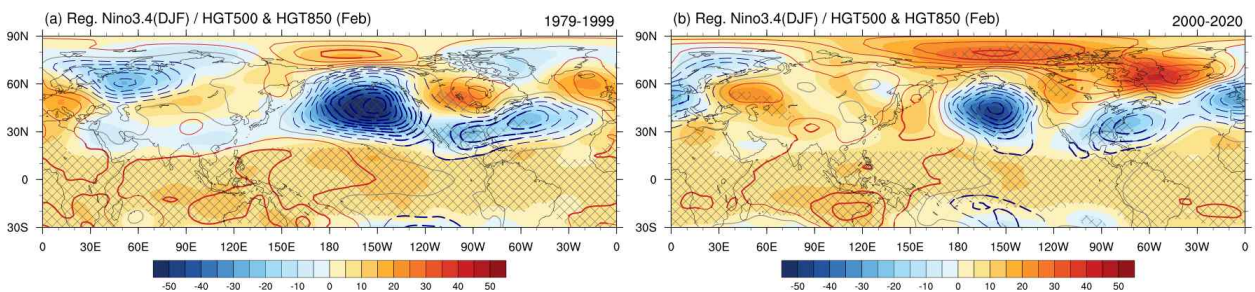
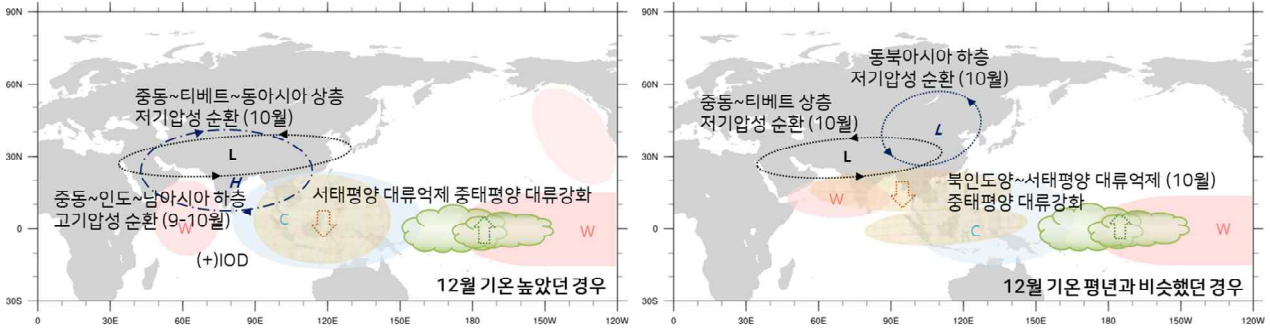


Figure 103. Regression maps of the 500hPa (shading) and 850hPa (contour) geopotential height anomalies in February with respect to the DJF Nino3.4 index (a) from 1979 to 1999 (P1) and (b) from 2000 to 2020 (P2). The diagonal and thick line indicate statistically significant area at 90% confidence level.

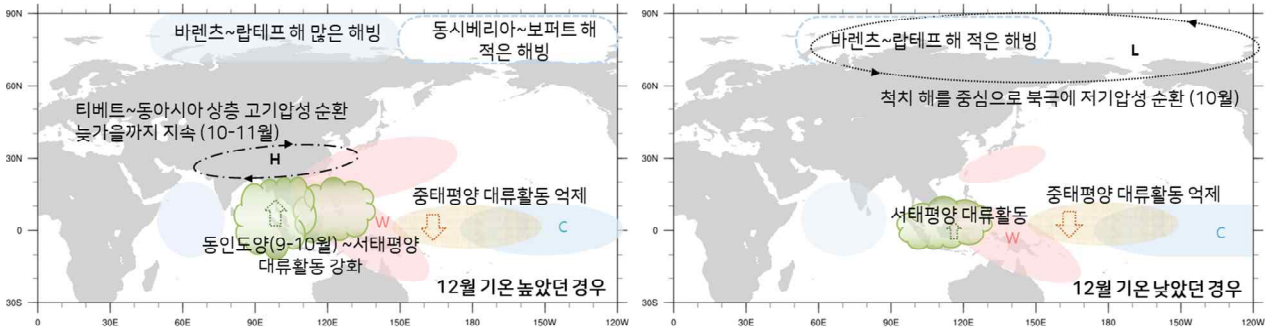
(7) 요약 및 결론

이 연구에서는 겨울철 월별로 기온과 관련된 특징을 잘 나타낼 수 있는 분류 기준을 선정해 분류하고 가을철 선행해서 나타나는 특징에 대해 분석하였다. 12월은 ENSO 위상에 따라 나누고 위상별로 기온 경향에 따라 가을철 선행 특징을 분석했다. 엘니뇨 해는 인도양 해수면온도, 라니냐 해는 동인도양~서태평양의 대류활동과 북극 해빙, 중립 해는 열대 태평양과 북대서양 해수면온도, 북극 해빙에서 특징을 찾을 수 있었고 각 케이스 별로 감시 예측인자를 제시하였다. 1월은 기온과 관련된 순환장 구조에 따라 나누고 기온 경향에 따라 분석했다. 1월 기온이 낮았을 때 선행 특징으로는, 가을철 바렌츠-카라해 지역 해빙 적은 경향과 연직으로 발달한 고온 편차, 여름철 북대서양 tripole 형태의 해수면온도, 라니냐와 유사한 열대 해수면온도와 대류활동이 있었고 이들을 1월 기온의 감시 예측인자로 제시하였다. 2월은 장기 변화가 가장 컸던 달로 전반기와 후반기 두 기간으로 나누었고 후반기 기온 낮았을 때 특징을 분석했다. 2월 기온이 낮았을 때 선행 특징으로는 바렌츠해 북부 적은 해빙과 연직으로 깊게 발달한 바렌츠해 주변 고온 편차와 캐나다 북쪽 저온 편차, 라니냐와 유사한 열대 해수면온도가 있었고 이를 2월 기온의 감시 예측인자로 제시하였다. 월별 감시 예측인자는 모식도로 정리해 Figure 104-106에 나타내었다. 10월 시점에서 겨울철 예측 정보를 생산할 때 활용하기 위해 가을철을 중심으로 특징을 분석해 감시 예측인자를 제시했으나 겨울철에는 동시상관으로 영향을 주는 인자도 많으며 특히 겨울철 기온과 깊은 관련이 있는 AO의 경우는 계절규모에서 예측성이 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 예측 시점에서 타겟이 되는 예측 월까지는 선행시간이 길기 때문에 예측 인자가 지속적으로 유지되는지 혹은 변화가 나타나는지를 지속적인 모니터링을 통해 진행 과정을 감시할 필요가 있다. 여름철 예측에 적용했던 상세기작 유사성 예측법을 겨울철에도 적용하면 효율적인 모니터링과 예측성 향상에 도움이 될 것으로 보인다.

(a) 엘니뇨 해 가울철 감시·예측인자



(b) 라니냐 해 가울철 감시·예측인자



(c) 중립 해 가울철 감시·예측인자

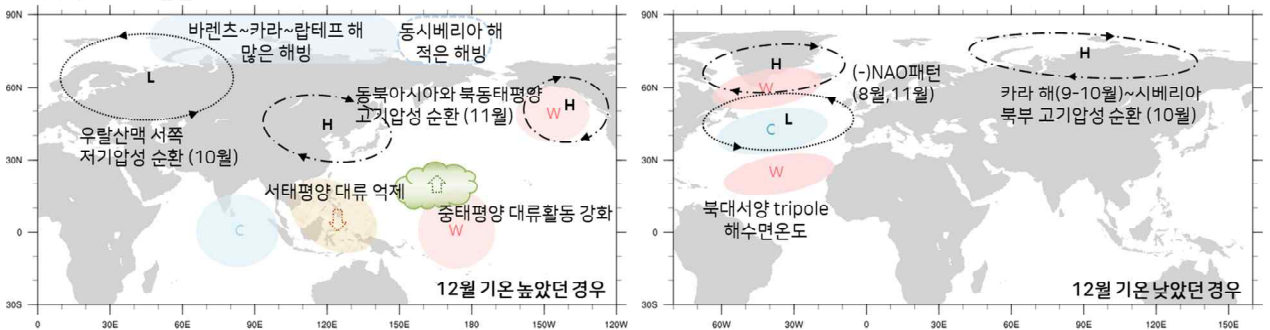


Figure 104. Schematic plots of the monitoring and prediction factors for (a) El Niño, (b) La Niña, and (c) neutral condition years.

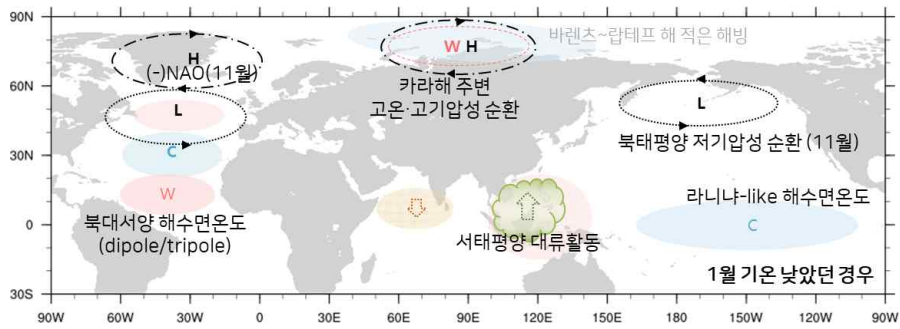
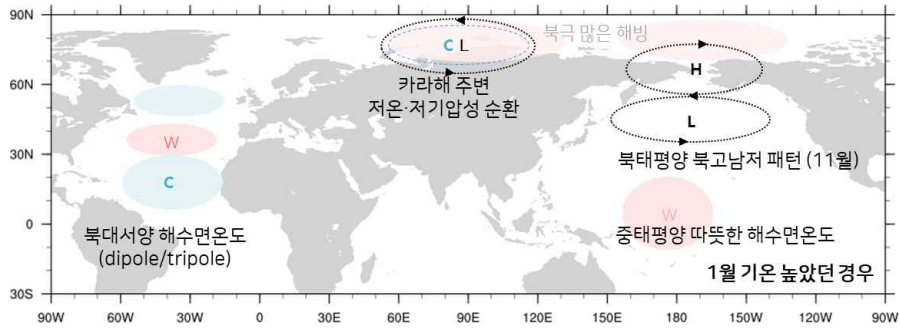


Figure 105. Schematic plots of the monitoring and prediction factors for January Korean temperature.

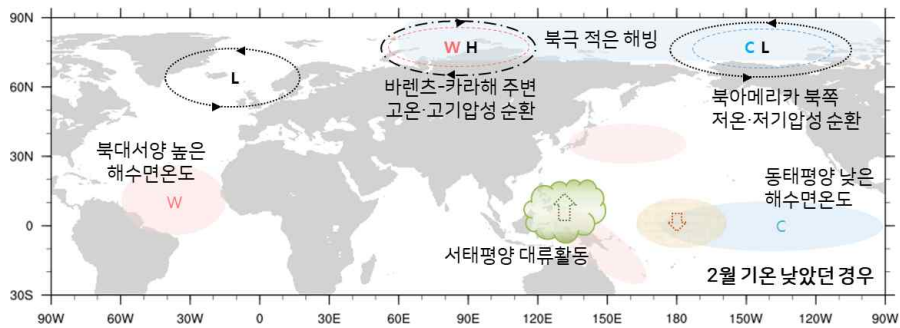


Figure 106. As in figure 105, but for February.

4. 기후감시 및 분석 시스템 개발과 동아시아 이상기후 모니터링 시스템

가. 기후감시 시스템 개발

(1) 연구 배경

서유럽의 폭우와 홍수, 미국과 캐나다에서 발생한 폭염 및 산불 등, 전 세계적으로 빈번하게 발생하는 이상기후로 인해 신속한 기후감시 체계구축의 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 감시 시스템 구축이 필요하게 되었다. 그리하여 이상기후에 대한 빠른 대처를 위해 표준화된 자료수집 체계 및 신속한 감시 결과 제공하여 시의적절한 원인분석이 가능한 기후분석 시스템을 구축하고 연구자에게 실시간 기후 분석정보 제공을 목표로 하였다.

(2) 자료수집 및 방법

(가) NCEP 재분석 자료

① 자료

전 지구 모니터링을 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.

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 시공간 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) ASOS 종관기상 관측 자료

① 자료특징

한반도 지역 모니터링을 위해 기상청의 종관기상 관측 자료를 수집하여 사용하였다. 파일 포맷은 JSON(Javascript Object Notation)으로 변환하여 내려받았으며 이런 파일 포맷은 속성-값(attribute-value pairs and array data types) 또는 키-값(key - values)으로 이루어진 데이터 오브젝트를 전달하기 위해 인간이 읽을 수 있는 텍스트를 사용하여 가독성이 높은 장점이 있다.

기후모니터링을 위해 수집된 변수는 평균 기온(avgTa), 최고기온(maxTa), 최저기온(minTa), 강수(SumRn)이다. 자료생산 기간은 총 66개 지점 값을 이용하여 일별 자료를 수집하여 주별, 월별 자료로 생산하여 제공하였다.

② 자료구조

수집되는 자료의 기본 파일 포맷은 JSON이다. 한 파일에 속성-값(attribute-value pairs and array data types) 또는 키-값(key-value) 구성으로 지점 정보 및 값이 키와 값으로 구성되어 있어 파일을 통해 값을 쉽게 파악할 수 있다. 대관령 지역의 관측 시간과 변수별 측정값에

관한 내용은 다음과 같다.

```
{
  "response": {
    "header": {
      "resultCode": "00",
      "resultMsg": "NORMAL_SERVICE"
    },
    "body": {
      "dataType": "JSON",
      "items": {
        "item": [
          {
            "stnId": "100",
            "stnNm": "대관령",
            "tm": "2021-01-01",
            "avgTa": "-9.5",
            "minTa": "-14.4",
            "minTaHrmt": "159",
            "maxTa": "-4.5",
            "maxTaHrmt": "1337",
            "mi10MaxRn": "",
            "mi10MaxRnHrmt": "",
            "hr1MaxRn": "",
            "hr1MaxRnHrmt": "",
            "sumRnDur": "",
            "sumRn": "",
            "maxInsWs": "17.7",
            "maxInsWsWd": "290",
            "maxInsWsHrmt": "1314",
            "maxWs": "9.9",
            "maxWsWd": "290",
            "maxWsHrmt": "1303",
            "avgWs": "6.4",
            "hr24SumRws": "5558",
            "maxWd": "270",
            "avgTd": "-16.3",
            "minRhm": "39",
            "minRhmHrmt": "1406",
            "avgRhm": "58.1",
            "avgPv": "1.8",
            "avgPa": "927.9",
            "maxPs": "1027.2",
            "maxPsHrmt": "233",
```

```

"minPs": "1021.1",
"minPsHrmt": "1345",
"avgPs": "1024.5",
"ssDur": "9.6",
"sumSsHr": "8.8",
"hr1MaxIcsrHrmt": "1200",
"hr1MaxIcsr": "2.06",
"sumGsr": "11.65",
"ddMefs": "",
"ddMefsHrmt": "",
"ddMes": "",
"ddMesHrmt": "",
"sumDpthFhsc": "",
"avgTca": "1.4",
"avgLmac": "1.4",
"avgTs": "-7.6",
"minTg": "-15.5",

```

(3) 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.¹⁾

(4) 시스템 설계 및 구현

(가) 시스템 분석

기후감시 시스템 구축을 위해 관계 기관에서 서비스 중인 이상기후 감시 체계를 분석하였

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

다. 대표적인 서비스는 NOAA의 PSL(Physical Sciences Laboratory)에서 운영 중인 Map Room 서비스와 일본기상청에서 제공하는 모니터링 시스템, 그리고 ECMWF의 모니터링 서비스를 비교하여 APEC 기후센터의 특성에 맞는 서비스 개발을 하고자 하였다.

다음 그림은 NOAA의 Map Room 서비스로 한 화면에 Total과 Anomaly 서비스를 최근 일별, 주별, 월별, 계절별로 전 지구에 대해 모니터링된 정보를 보여준다. 또한, Animation 기능을 이용하여 자동으로 정보의 변화를 확인할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

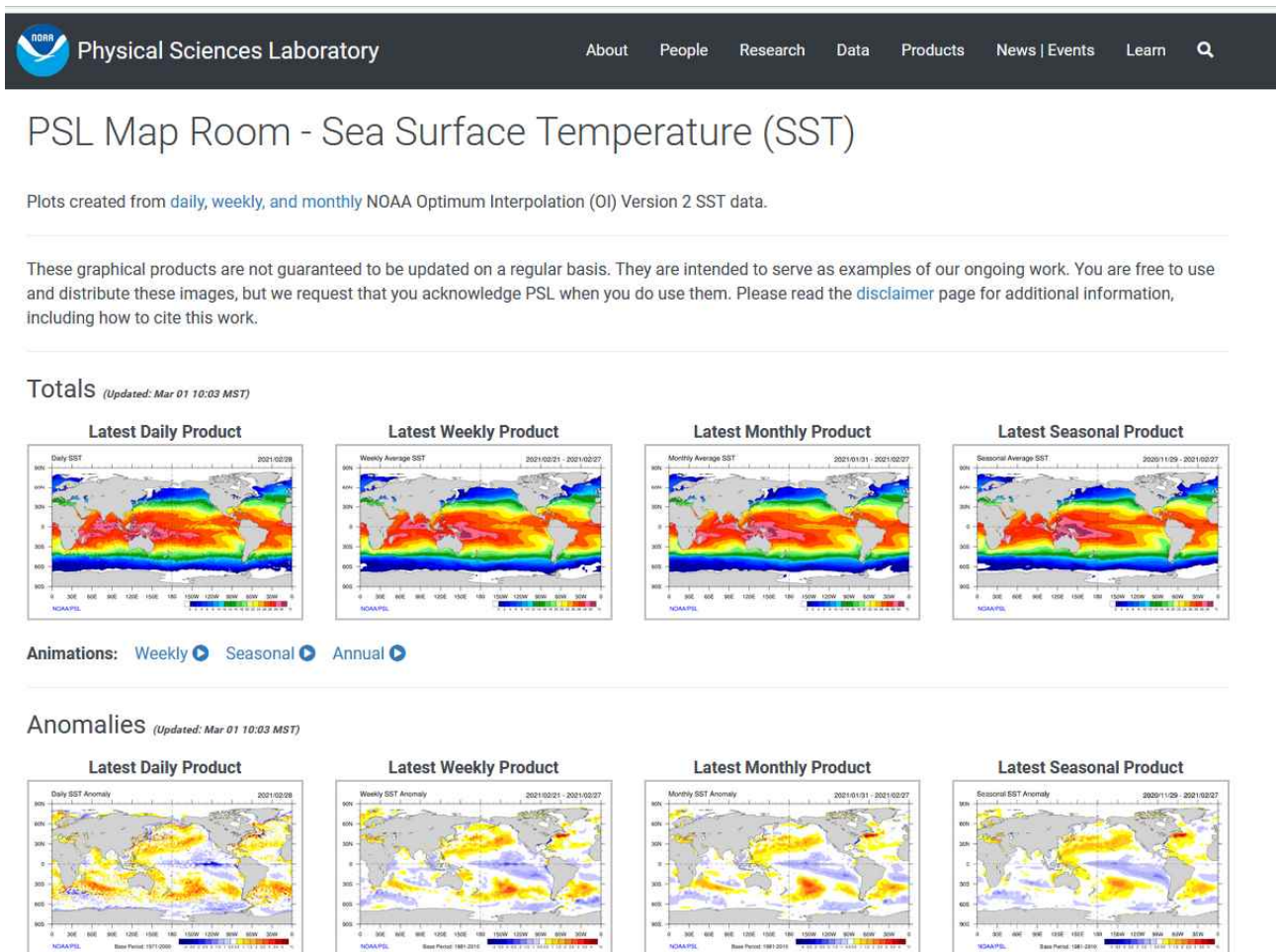


Figure 107. NOAA ‘s website provides the most recent daily, weekly, monthly and Seasonal mean and anomalies. this is a screen provided for Sea Surface Temperature (SST)

일본의 기상청에서는 기후 시스템의 리포트 정보와 통계분석 정보를 제공한다. 각 메뉴를 선택하여 새로운 화면을 통해 사용자가 원하는 정보를 확인할 수 있다. 모니터링 서비스는 미리 정의한 변수별로 사용자가 원하는 시간의 정보를 통해 일별, 최근 7일, 월별로 전 지구에 대해 평균 정보를 보여준다.

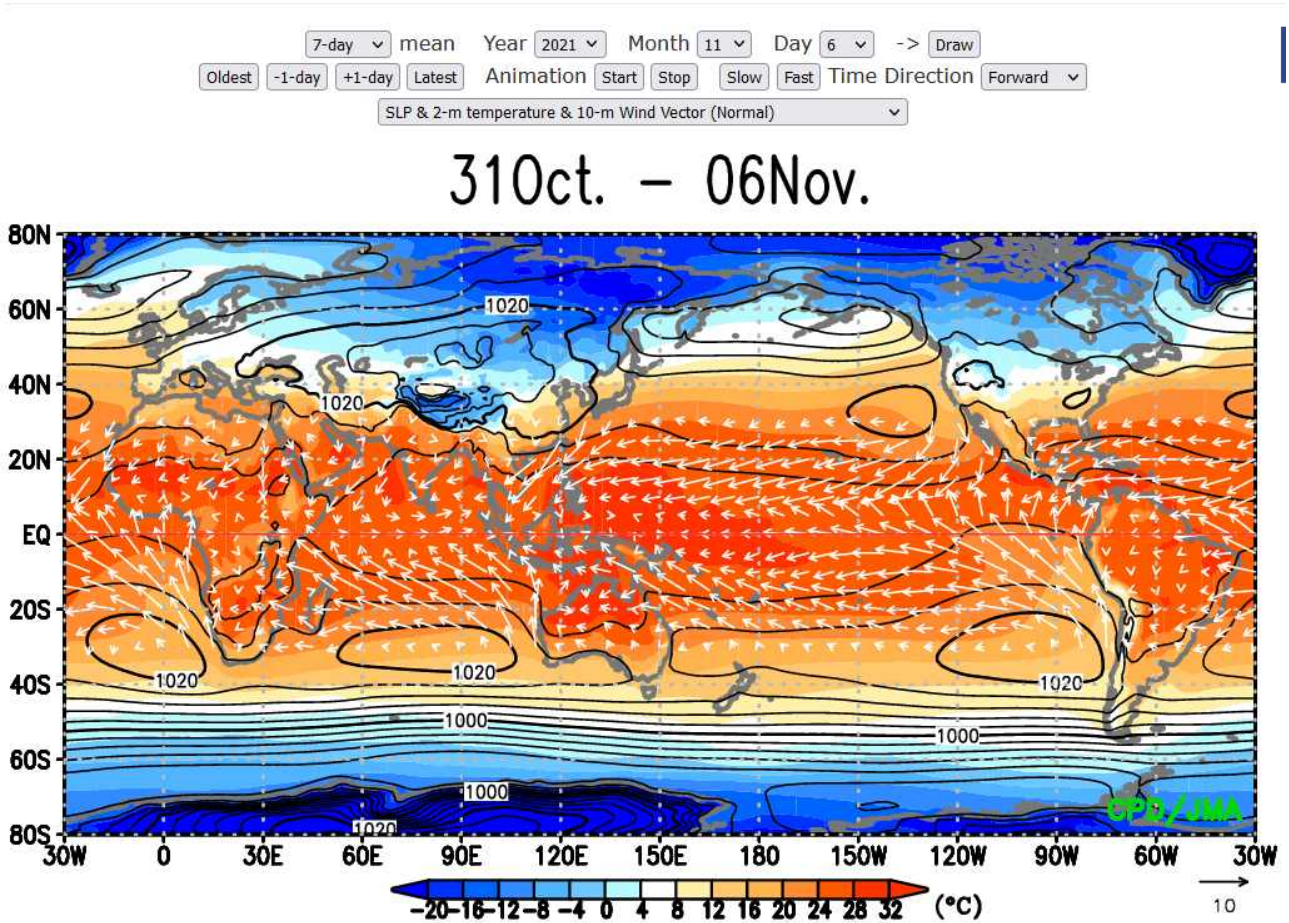


Figure 108. JMA provides monitoring information for various variables. the user can select and check the desired condition.

ECMWF의 기후모니터링 서비스는 사용자가 원하는 지역을 선택할 수 있으며 변수에 대한 기간과 미리 정의한 변수별로 사용자가 원하는 시간의 정보를 통해 일별, 최근 7일, 월별로 전 지구에 대해 평균 정보를 보여준다. ECMWF는 지도위에 모니터링 정보를 매핑하는 방법을 사용하여 Zoom in이나 Zoom out이 가능하다.

2m temperature: Weekly mean anomalies

Base time: Thu 07 Jan 2021, Valid time: Mon 11 Jan 2021 - Mon 18 Jan 2021, - T+264 h, Area : Pacific

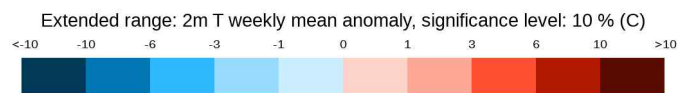
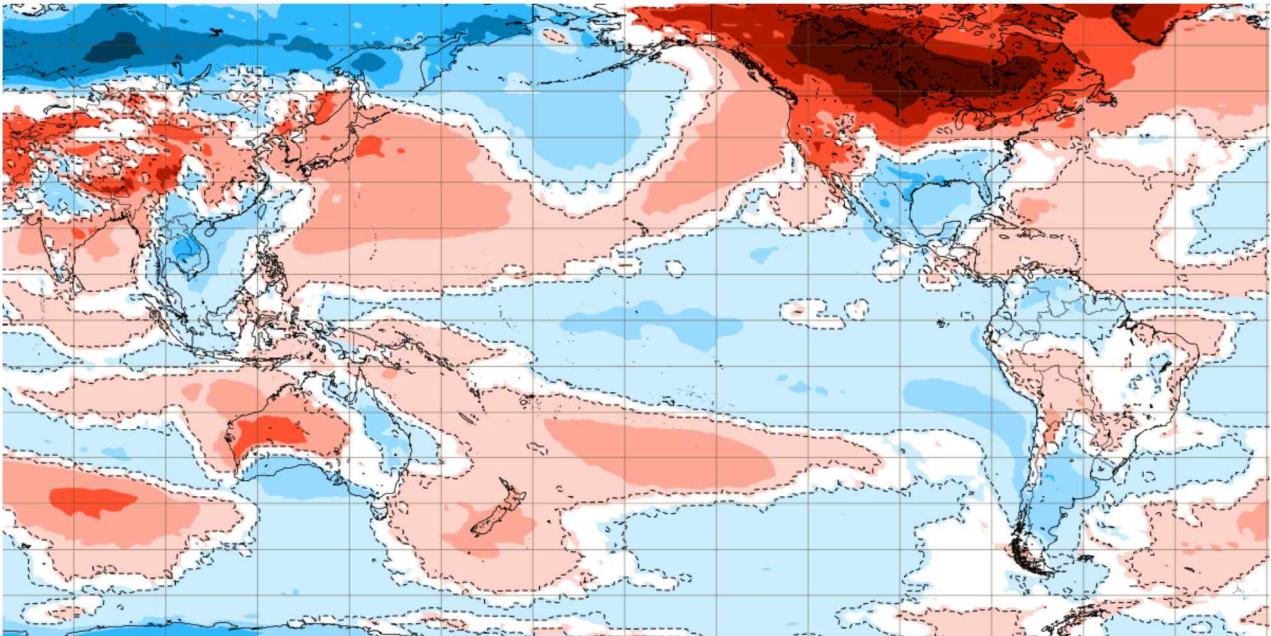


Figure 109. ECMWF provides the Mapping service on a web based map. users can zoom in or out on the map to check the values.

(나) 시스템 설계

APEC 기후센터의 기후감시 분석 시스템(Climatic Analysis System)을 위해 전체 메뉴는 아래와 같이 구성하였다. 기후감시 서비스는 전 지구와 한반도를 중심으로 구성하였으며 그 외에 기후분석 서비스, 극한기후정보, 기후 인덱스 정보로 구성하였다. 기후감시의 세부 구성은 변수 별로 평균장과 편차장에 대한 정보를 동시에 보여주도록 구성하였다.

시스템은 단독 서버(CentOS)로 Django 웹 프레임 워크에 기본 개발언어는 파이썬을 기반으로 Ajax, html5 등 웹 표준코드를 사용하였다.

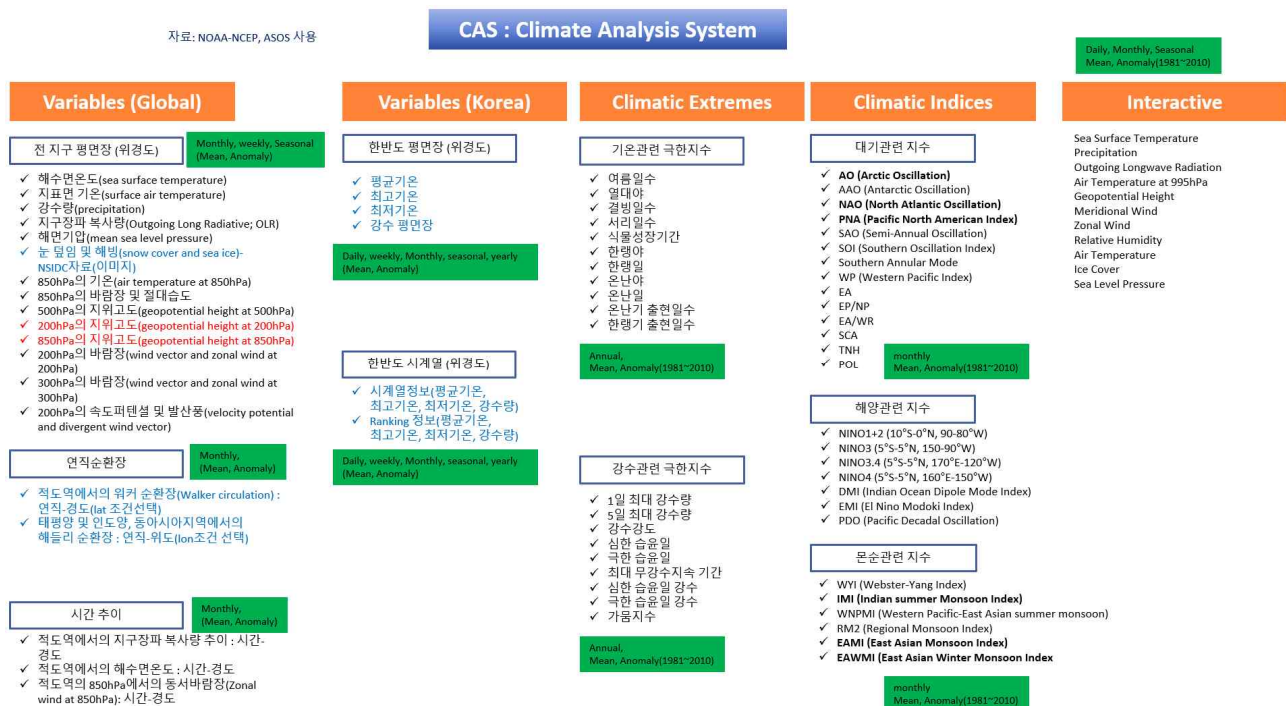


Figure 110. To build a climate monitoring and analysis system, a service map was designed and data required for each service was defined.

(다) 시스템 구현

① 사용자 인터페이스

APEC 기후센터의 기후감시 분석 시스템(Climate Analysis System)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.

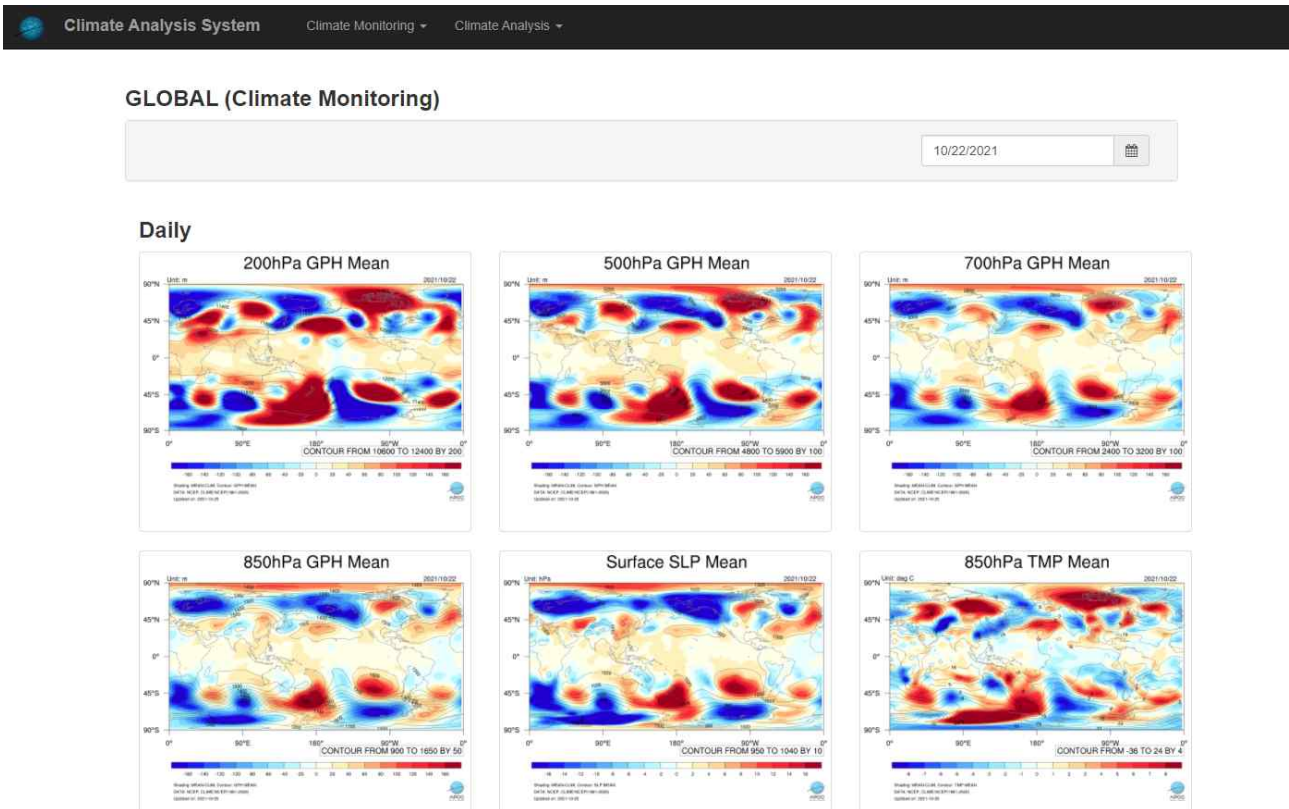


Figure 111. The user interface for the global climate monitoring service provides 200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo-potential Height, Sea level Pressure, etc.

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.

KOREA (Climate Monitoring)

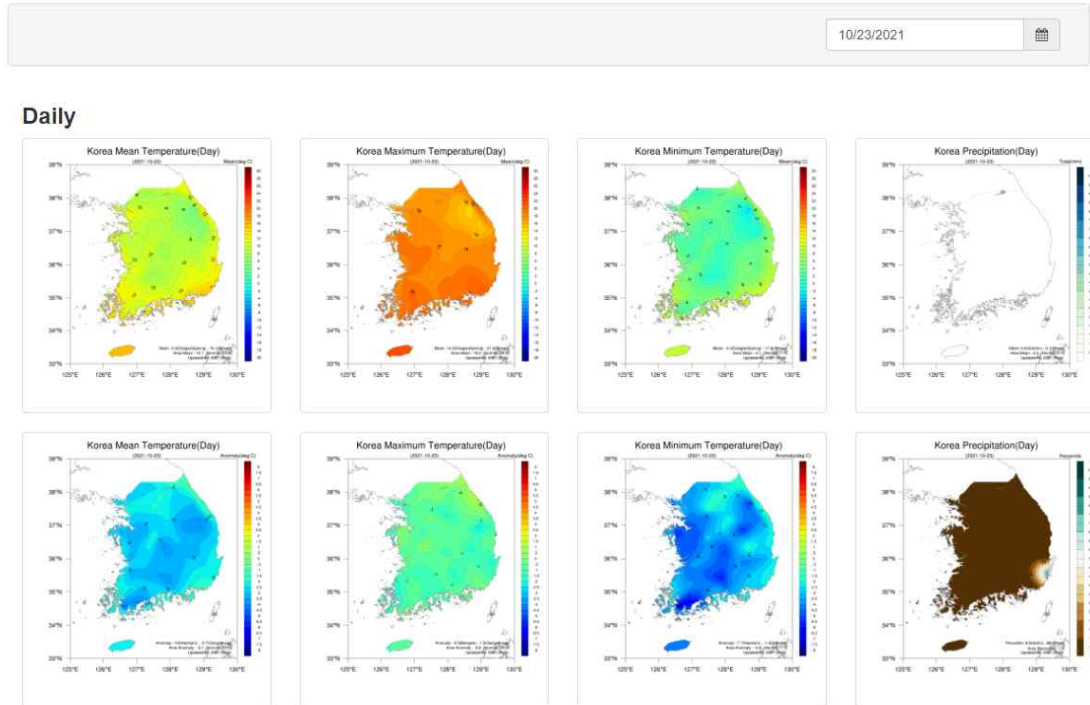


Figure 112. The user interface of the South Korea climate monitoring service provides average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and precipitation information.

② 기능별 구성

전 지구 및 한반도 지역에 대한 기후감시 서비스는 과거의 자료부터 최근의 자료까지 제공된다. 전 지구 서비스는 1948년부터 최근 3일의 자료가 서비스되고 한반도 서비스는 1973년부터 최근 1일 전 자료가 서비스된다. 사용자가 원하는 날짜를 편리하게 선택할 수 있도록 달력 기능을 이용하여 날짜를 선택할 수 있도록 하였다. 감시 서비스는 일별, 주별, 월별 등 제공되는 기간이 달라서 이를 모두 수용할 수 있는 기능을 제공하고자 하였다. 해당 월에서 상단의 월을 선택하면 해당연도가 표기되고 다시 상단 메뉴를 선택하면 10년 단위의 연도가 나타난다. 이를 통해 해당연도로 쉽게 이동할 수 있도록 하였다.

- 날짜 선택

GLOBAL (Climate Monitoring)

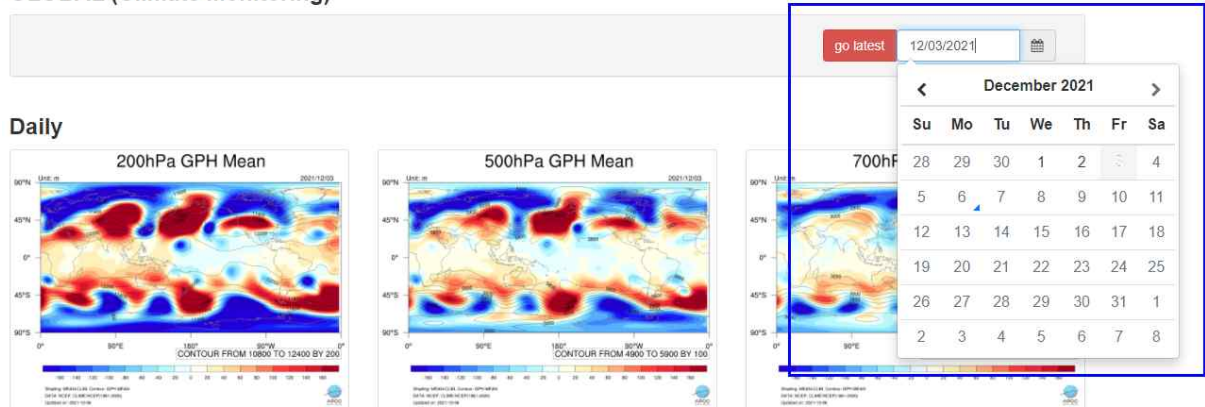


Figure 113. it has been increased conveniently by providing a calendar function so that users can easily find the desired date.

- 전 지구 모니터링

전 지구 모니터링 서비스는 다음 그림과 같이 바람장의 경우 벡터로 정보를 표기하고 그 외의 변수는 음영과 라인으로 표기하였다. 평면지도를 이용하여 정보를 표기하고 왼쪽 위 끝에는 각 변수의 unit을 오른쪽 위 끝에 정보가 해당하는 날짜를 표기하여 변수의 값에 대한 단위와 해당 날짜를 볼 수 있도록 하였다. 음영을 통해 해당 변수의 평균 정보를 표기하고 선을 통해 편차 정보를 표기하였다. 바람장의 경우, 평균 정보를 음영으로 표기하고 바람의 방향은 화살표로, 세기는 화살표의 굵기로 표기하였다. 또한, 상세정보를 하단에 표기하여 생산된 날짜와 활용된 자료의 출처를 제공하였다.

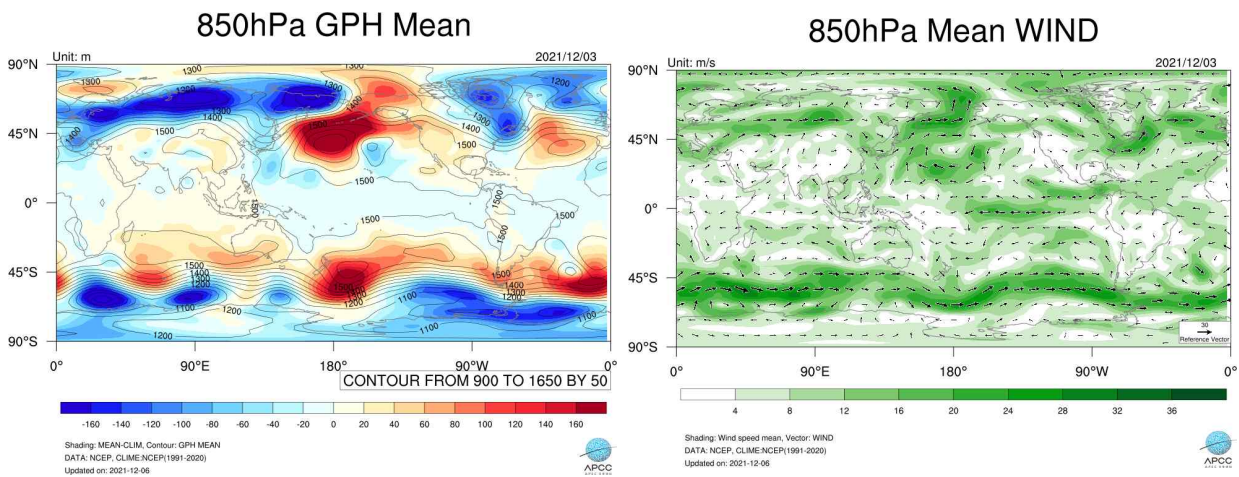


Figure 114. Global monitoring uses a flat map using the Mechatro Projection method to display information using a method using shadows and lines, and the direction and thickness of arrows.

- 한반도 모니터링

한반도 모니터링 서비스는 다음 그림과 같이 음영을 통해 정보를 제공하였다. 한반도 지도에 남한지역에 해당하는 정보만 표출하고 각 음영에는 변수의 강도를 표기하였다. 또한, 강수의 경우, 30년의 평균 장을 이용하여 백분위를 계산하여 서비스를 제공하였다. 또한, 지도 하단에 한반도 전체에 대한 평균값과 편차값, 최고 관측지역과 최저 관측지역을 표기함으로써 관측지역의 값 차이를 표기하였다.

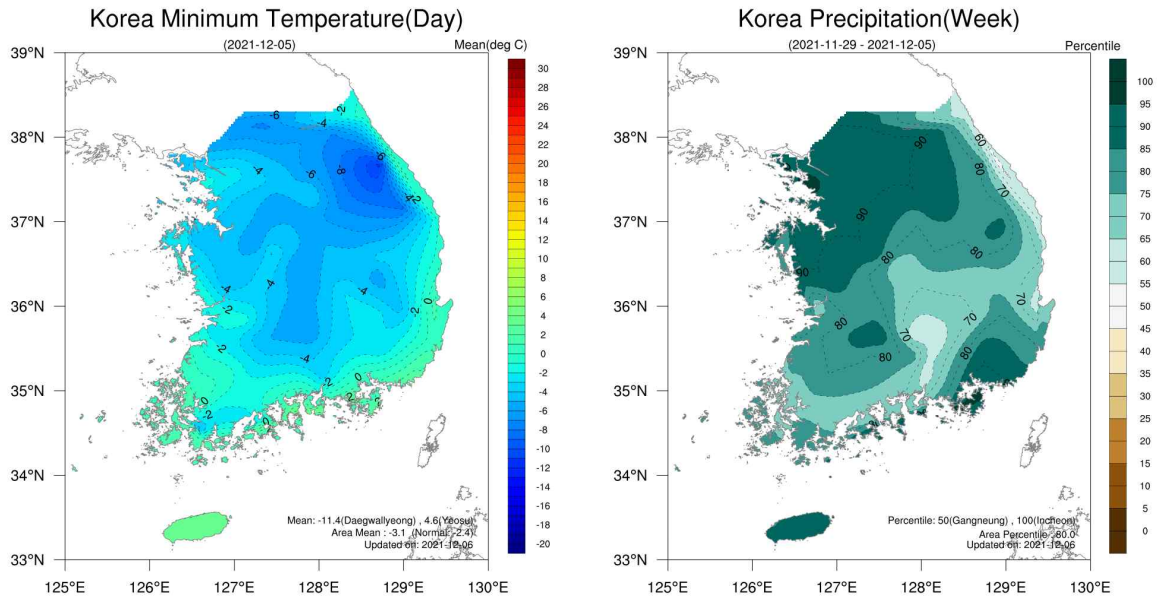


Figure 115. The monitoring information on the Korean was expressed using the interpolation method for observations based on the data collected at each observatory.

③ 기간별 구성

- 일별 모니터링

평년값은 해당 요소의 연도별 값을 포함되는 연도만큼 나누어 여러 해 평균하는 것을 기본으로 하며 평균값 계산 시 관측값의 소수 이하 최소 자릿수보다 두 자리 더 많은 자릿수 값부터 끊은 후 반올림하였다. 강수는 소수점 둘째 자리까지 산출하며, 그 외 모든 요소는 소수점 첫째 자리까지 산출하였다. 관측 요소별 일 통계치를 여러 해 평균한 후 전-후 장기적인 변동성을 파악하기 위해 5일간 이동 평균하여 산출하였다. 이때 이동 평균한 값은 5일의 중간값으로 하였다. 2월 29일은 2월 28일과 3월 1일의 이동 평균값을 산술평균하여 구하며, 1월 1일은 12월 30일부터 1월 5일 각각의 여러 해 평균값을 포함하여 이동 평균하며, 12월 31일은 12월 29일부터 1월 2일 각각의 여러 해 평균값을 포함하여 이동 평균하였다.

Daily

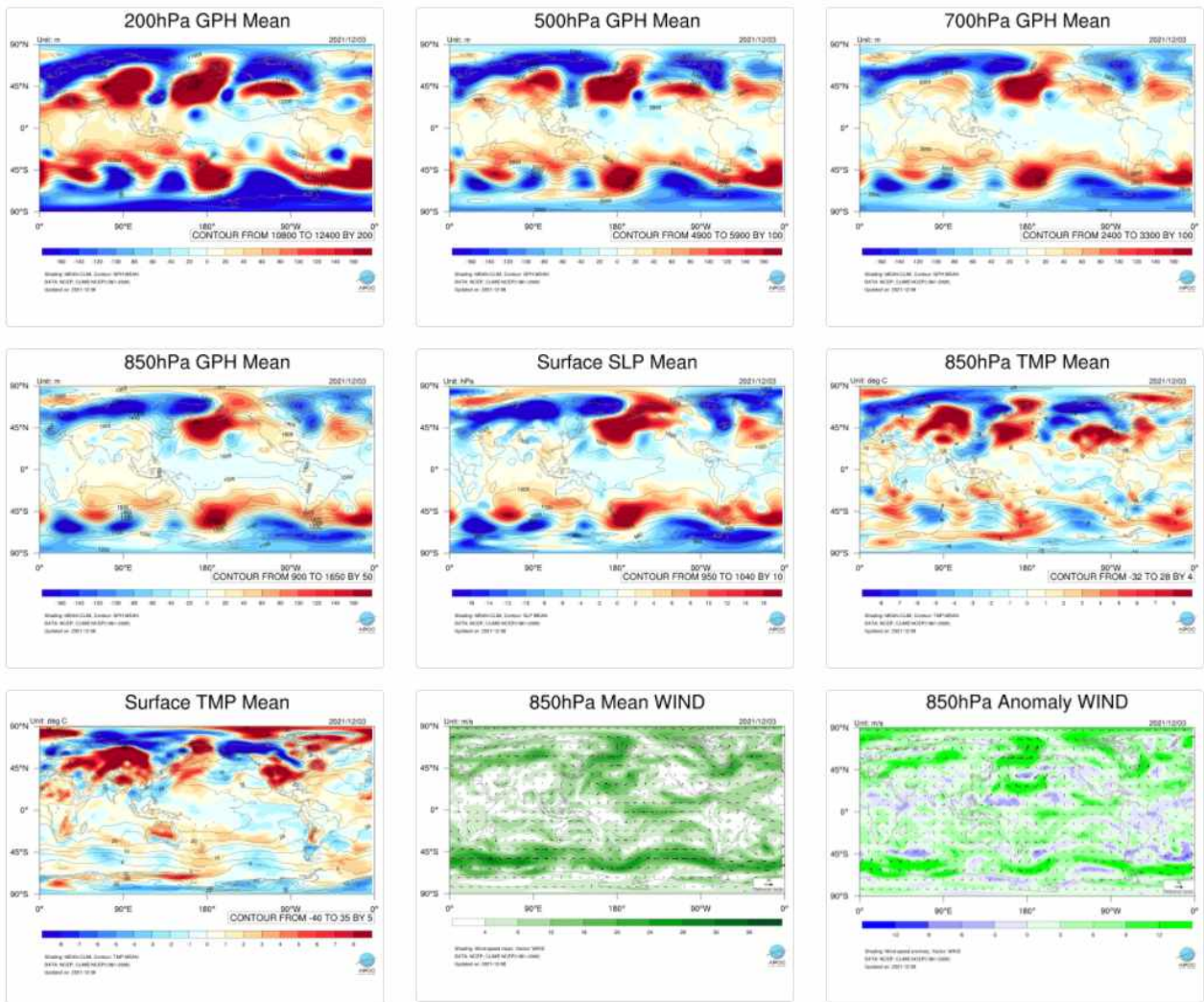


Figure 116. The daily global monitoring service provides nine types of information for a given date (200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo-potential Height, Sea level Pressure, 850hPa Temperature, Surface Temperature, 850hPa wind mean, 850hPa wind anomaly).

Daily

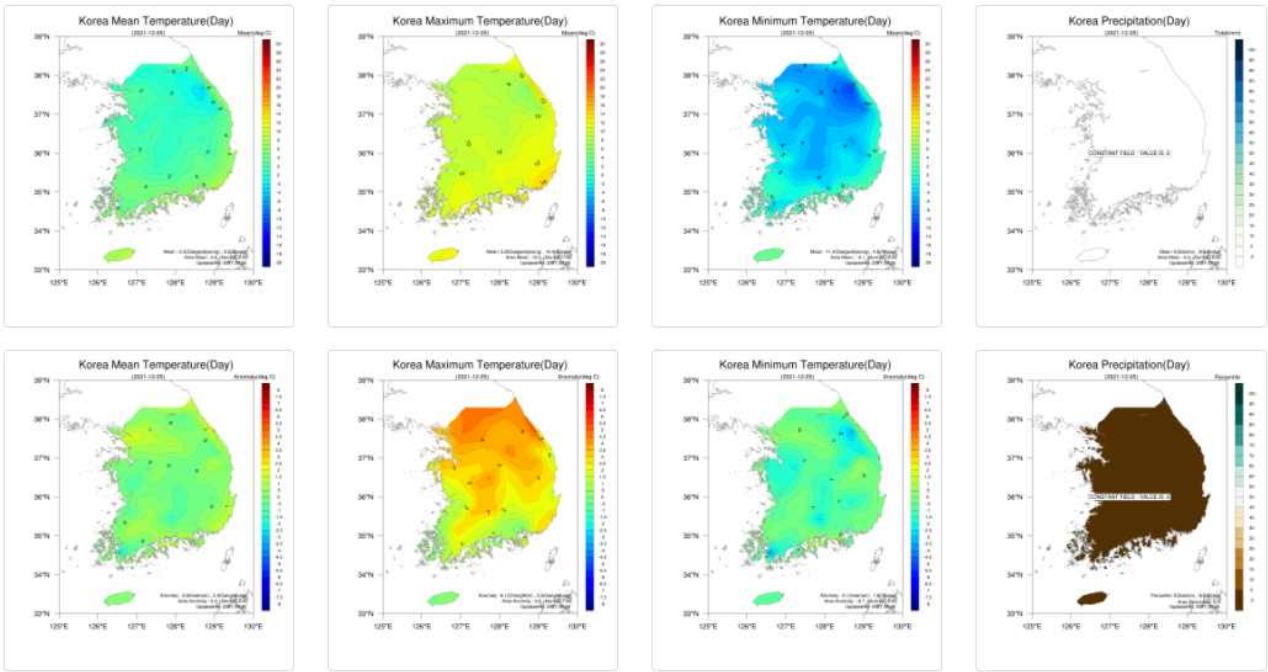


Figure 117. The Daily Korea monitoring service provides accumulated precipitation and percentile information on mean and anomaly of average temperature, maximum temperature, and minimum temperature for each day.

- 주별(최근 7일) 모니터링

주별 모니터링은 조회하려는 시점에 해당하는 일주일간의 일 통계치를 평균(합계)한 값을 여러 해 평균하여 산출하였다. 2021년 3월 2주에 조회 시 3월 7일 ~ 3월 12일까지의 일 통계치를 연도별로 평균한 값을 여러 해 평균하여 산출하였으며 주 평년값은 기온(평균, 최고, 최저)과 강수량 요소만 산출하였으며 기온(평균, 최고, 최저)은 해당하는 일주일간의 값의 평균값을 여러 해 평균하여 산출하며, 강수량은 일주일간의 합계값을 여러 해 평균하여 산출하였다. 주별 강수량 백분위 수 (퍼센 타일)은 조회하려는 시점에 해당하는 일주일간의 연도별 강수량 합계값의 최댓값과 최솟값의 범위를 100분위로 했을 때 분위 수 값에 대해 산출하였다. 주별 기온 비슷 범위는 조회하려는 시점에 해당하는 일주일간의 연도별 기온 평균값의 표준편차를 산출하고, 표준편차에 ± 0.43 을 곱한 값으로 산정하였다.

Weekly

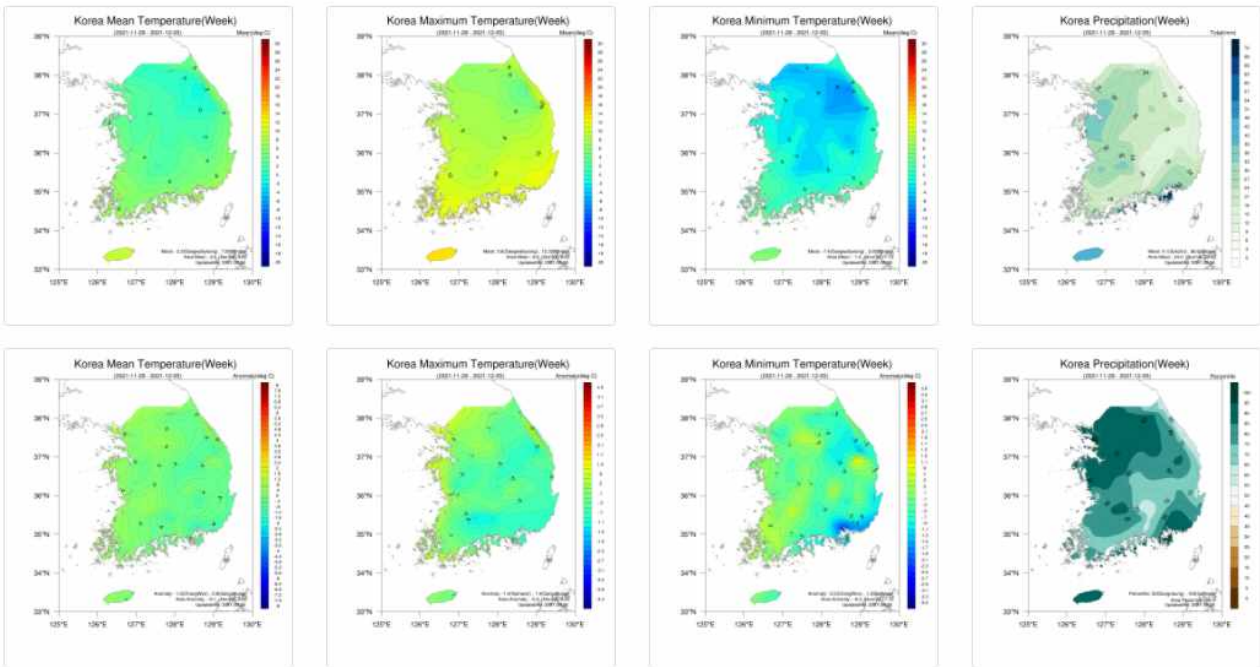


Figure 118. The Weekly Korea monitoring service provides accumulated precipitation and percentile information on mean and anomaly of average temperature, maximum temperature, and minimum temperature for the week including the day.

Last 7 days

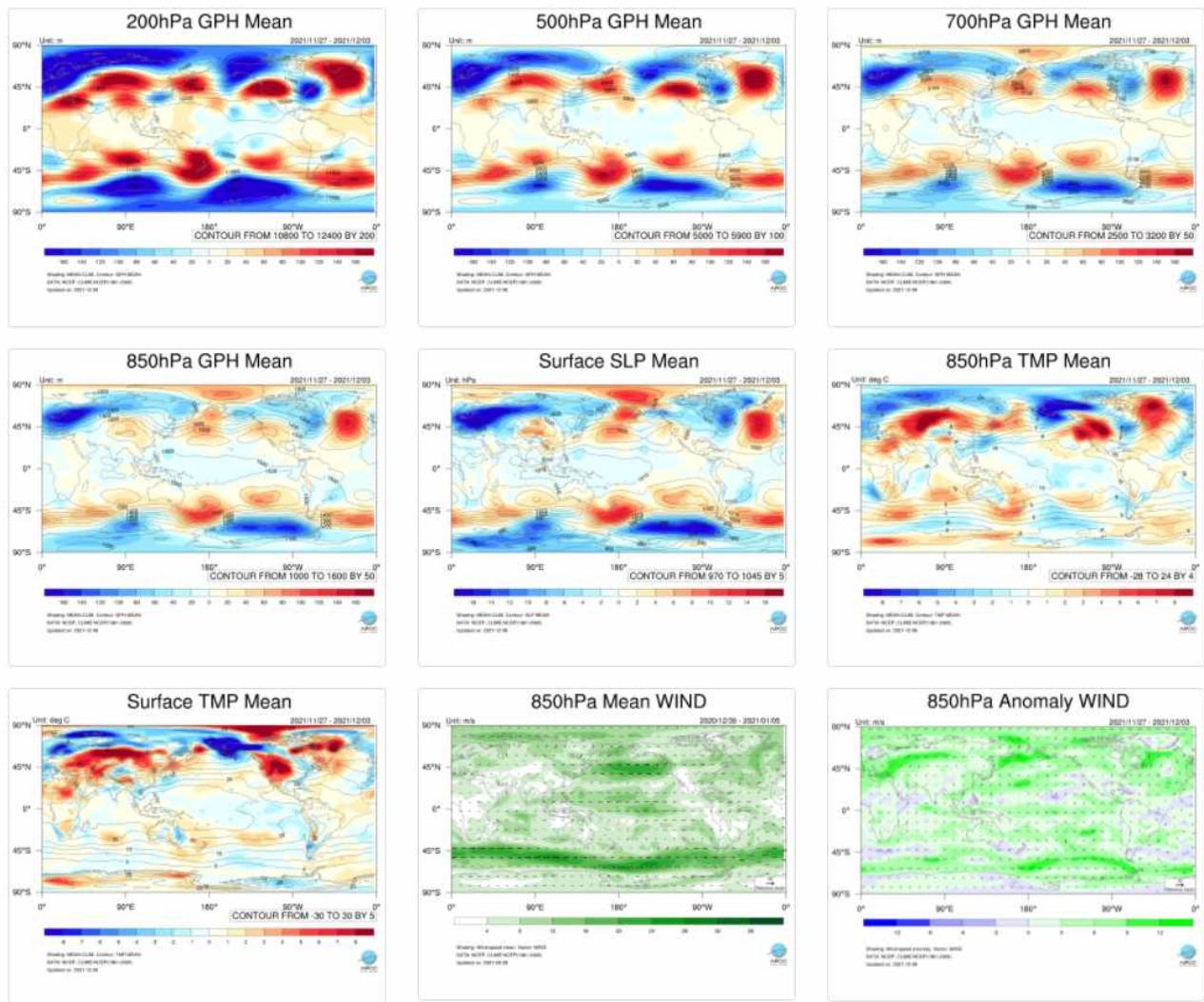


Figure 119. The last 7 days global monitoring service provides nine types of information for in last 7 days from a given day (200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo-potential Height, Sea level Pressure, 850hPa Temperature, Surface Temperature, 850hPa wind mean, 850hPa wind anomaly).

- 월별 모니터링

월별 모니터링 정보는 각 해당하는 달의 평균값 또는 합계값을 여러 해 평균하여 산출하였다. 기압, 평균 기온, 일 최고기온, 일 최저기온, 평균풍속은 일 통계치를 월평균 한 후 여러 해 평균하여 산출하였다. 이 중 최고기온과 최저기온, 매일의 극값(최고, 최저)의 월 평균값에서 산출하였다. 풍향별 관측횟수의 백분율과 풍향별 평균풍속, 풍향별 최대풍속은 매시(1일 24회) 관측값으로부터 산출하였으며, 월간 풍향별 관측횟수(풍속이 결측으로 풍향만 있는 경우는 풍향별 관측 횟수에서 제외)를 전 풍향의 관측횟수(결측 제외)로 나눠, 각각의 풍향별 백분율을 구하였다. 풍향별 관측횟수에는 정온(0.4m/s 이하)의 횟수도 포함된다. 지점별 월 최고기온은 연도별로 해당 월의 최고기온 중 가장 큰 값, 월 최저기온은 연도별로 해당 월의 최저기온 중 가장 낮은 값을 산출 후 여러 해 평균하여 산출하였다. 월별 강수량 백분위 수(퍼센트 타일)는 조회하려는 시점에 해당하는 연도별 월 강수량 합계값의 최저값과 최고값을 100분위로 했을 때 분 위수값에 대해 산출하였다. 월별 기온 비슷 범위는 조회하려는 시점에 해당하는 연도별 기온 월 평균값의 표준편차를 산출하고, 표준편차에 ± 0.43 을 곱한 값으로 산정하였다.

Monthly

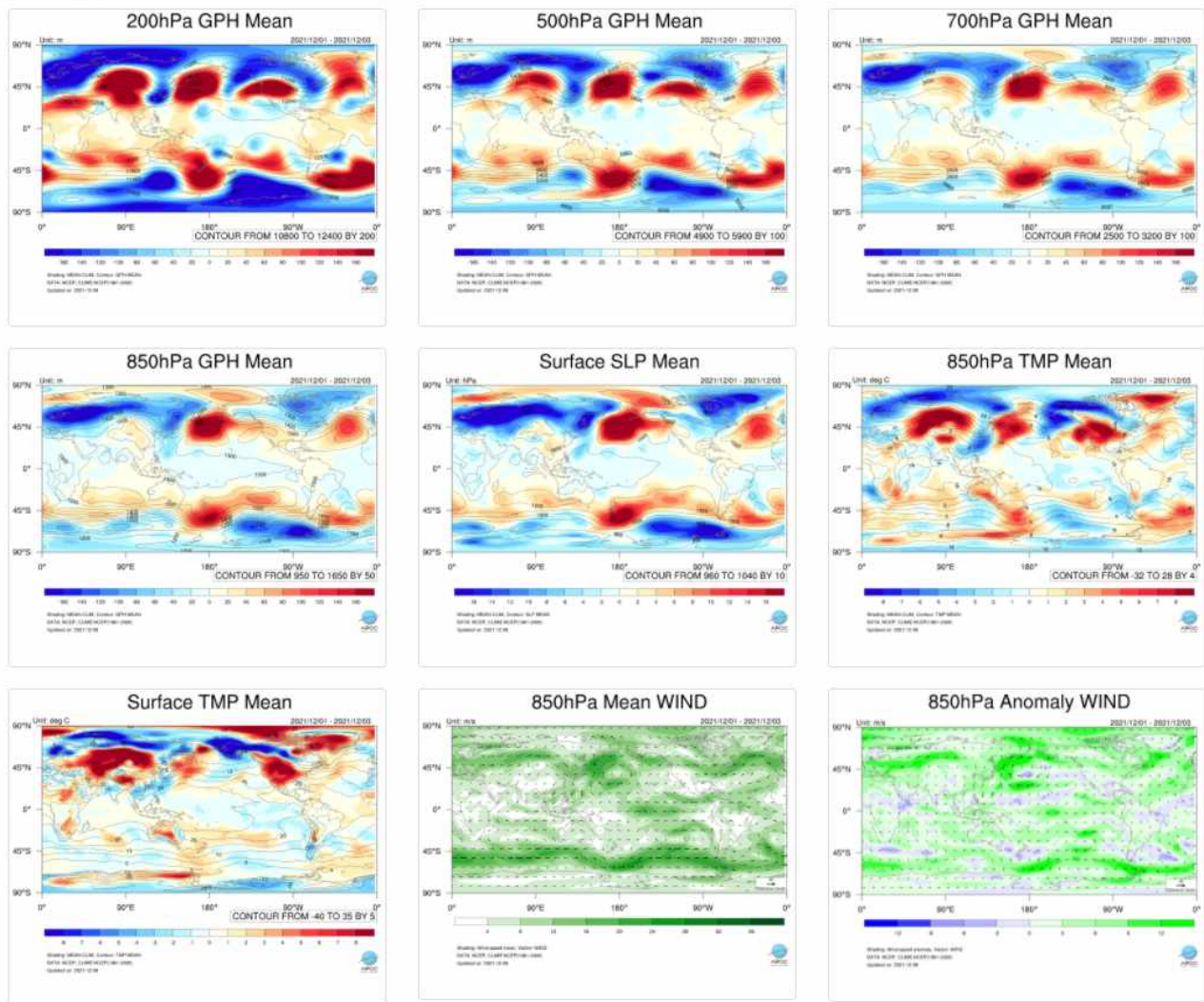


Figure 120. The Monthly global monitoring service provides nine types of information for the month including the day (200hPa Geo-potential Height, 500hPa Geo-potential Height, 700hPa Geo-potential Height, 850hPa Geo-potential Height, Sea level Pressure, 850hPa Temperature, Surface Temperature, 850hPa wind mean, 850hPa wind anomaly).

Monthly

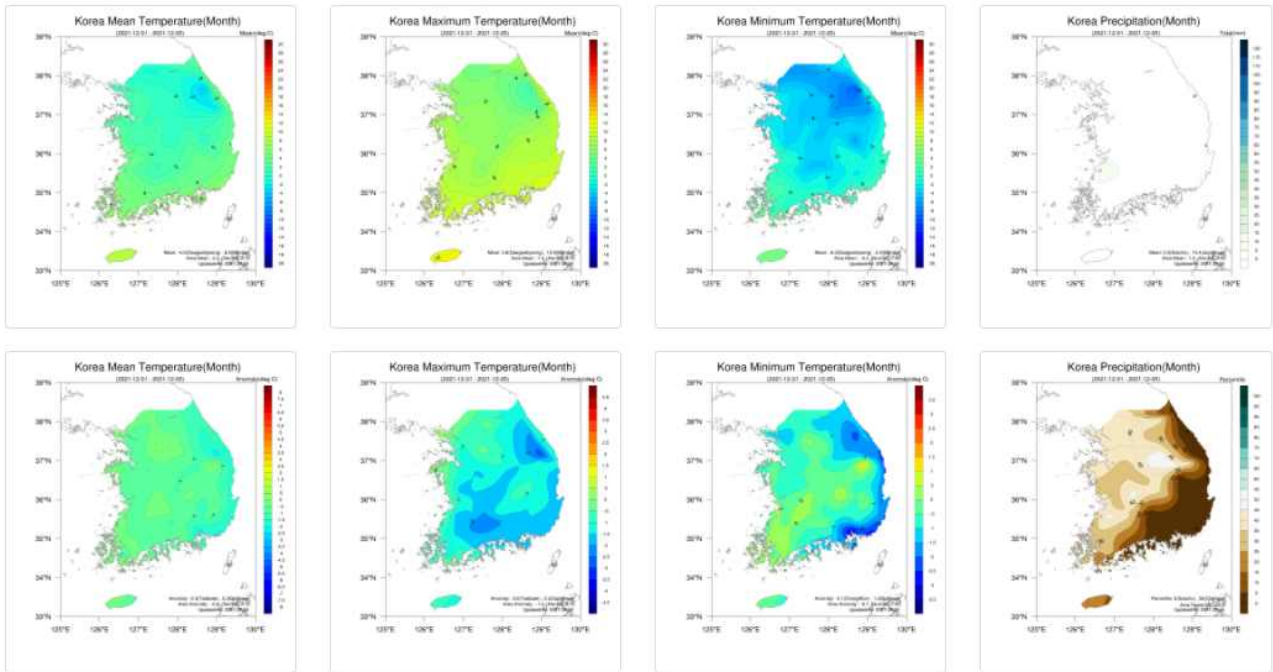


Figure 121. The monthly Korea monitoring service provides accumulated precipitation and percentile information on mean and anomaly of average temperature, maximum temperature, and minimum temperature for the month including the day.

(5) 요약과 결론

이상기후 발생 시 연구자가 진행하던 자료처리 및 분석 과정을 신규 구축된 기후감시시스템을 이용함으로써 자료처리 시간을 줄이고 빠른 원인분석이 가능하게 함으로써 이상기후 대응 역량 강화에 이바지하고자 하였다. NCEP의 재분석 자료와 KMA의 종관기상관측자료(ASOS)의 최신자료를 주기적으로 수집하여 표준화 프로그램을 통해 자료 전처리를 통해 분석 서비스를 위한 기초자료(약 17만 건) 생성하였다. 일별 기초자료를 기반으로 평년값(1991~2020) 생성, 일별, 주별, 최근 7일, 월별 평균 및 편차를 계산할 수 있는 프로그램 제공하였으며 다양한 변수(기온, 강수 등)에 대해 전 지구와 한반도를 기준으로 관측 자료 기반 시각화 정보(Mean, Anomaly, percentile) 제공하였다. 대응량 관측 자료를 이용하여 실시간 모니터링 정보 제공을 통해 신속한 원인분석 서비스 제공하고 예보토의에 활용 가능할 것으로 기대한다.

나. 기후분석 시스템 개발

(1) 연구 배경

전 세계에서 다양한 형태의 이상기후 현상이 발생하고 있어 그 원인분석을 위한 노력이 각 연구기관에서 활발히 진행되고 있다. APEC 기후센터 또한, 서유럽의 폭우, 북아메리카의 워터 및 산불 등, 전 세계적으로 빈번하게 발생하는 이상기후에 신속한 기후분석체계 구축이 필요해졌다. 기존에 운영되고 있었던 APEC 기후센터의 실시간 기후모니터링 시스템이 폐기된 이후, 연구자들에게 실시간 분석 서비스를 제공할만한 시스템이 부재하였다. 점점 강해지고 빈번해지는 이상기후 현상의 빠른 원인 파악을 위해 APEC 기후센터의 연구자들에게 최적의 기후분석시스템 개발을 목표로 기후감시분석 시스템 구축을 목표로 하였다. 다양한 기후자료를 수집하고 표준화 처리를 통해 다양한 분석 방법으로 연구자들이 원하는 형태의 분석 결과 정보 제공을 위한 시스템 구축을 완료하였다.

(2) 자료수집 및 방법

기후분석시스템을 위해 NOAA의 CDC (Climate Data Center)에서 제공하는 재분석 자료를 이용하여 기반 자료로 이용하였다. 다양한 형태로 제공되는 파일 포맷을 통일시켜 기본 파일 포맷인 NetCDF로 구성하였다. NetCDF 파일은 기후 분야에서 공통으로 사용하고 시간과 공간 정보를 하나의 파일에 표기할 수 있는 장점이 있다.

기후 분석 시스템을 위해 수집된 변수는 해수면 온도(sea surface temperature), 지표면 기온(surface air temperature), 강수량(precipitation), 지구 장파 복사량(Outgoing Long Radiation : OLR), 해면기압(mean sea level pressure), 눈 덮임 및 해빙(snow cover and sea ice), 850hPa에서의 기온(air temperature at 850hPa), 850hPa에서의 바람장 및 절대습도(wind vector and relative humidity at 850hPa), 500hPa에서의 지위고도(geo-potential height at 500hPa), 200hPa에서의 바람장(wind vector and zonal wind at 200hPa), 300hPa에서의 바람장(wind vector and zonal wind at 300hPa), 200hPa에서의 속도퍼텐셜 및 발산풍(velocity potential and divergent wind vector)이다.

(3) 시스템 분석 및 설계

(가) 시스템 분석

기후감시 시스템 구축을 위해 유관기관에서 서비스 중인 자료 분석 서비스를 비교하였다. 대표적인 서비스는 NOAA의 PSL(Physical Sciences Laboratory)에서 운영 중인 Composite 서비스와 APEC 기후센터에서 운영했던 기후모니터링 서비스를 대상으로 비교하였다.

다음 그림은 NOAA의 Composite 서비스로 사용자가 원하는 변수, 기간, 연도 등을 옵션으로 직접 입력하도록 구성되어 있다. 분석된 결과는 하단에 전 지구 이미지로 표출된다. APEC 기후센터에서 기존에 제공되었던 실시간 모니터링 서비스 또한, 사용자가 선택옵션을 직접 선택하여 생성된 이미지를 웹 브라우저를 통해 확인할 수 있는 구조로 되어 있다.

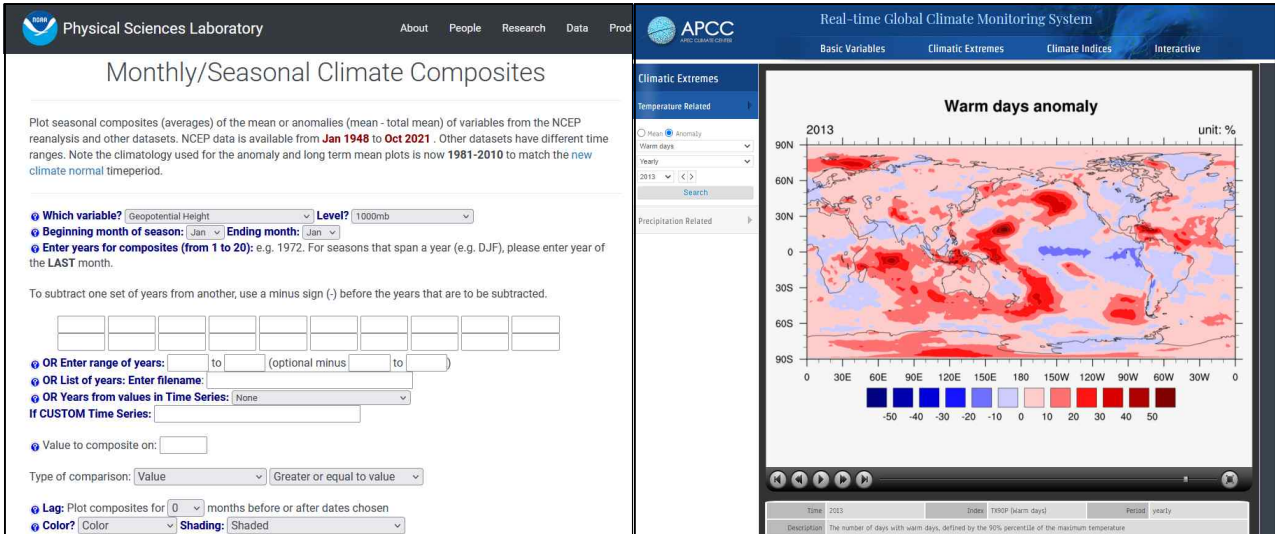


Figure 122. the Physical Sciences Laboratory of NOAA provides the service of Monthly/Seasonal Climate Composites

(나) 시스템 설계

기후분석시스템은 기후감시와 분석을 동시에 할 수 있는 시스템으로 구축되어야 한다. 그리하여 실시간 모니터링 기능과 사용자가 원하는 검색조건을 입력하여 실시간 제공이 가능한 결과 이미지, 파일 등 다양한 방법으로 서비스가 제공되도록 구축하고자 한다. 이를 위해 웹 기반 인터페이스를 개발하고 분석 결과는 웹 브라우저를 통해 제공될 수 있도록 구축하였다. 시계열 분석 서비스도 분석된 결과를 실시간으로 웹 브라우저상에서 생성이 되고 범례를 선택하여 그래프를 숨기거나 표출할 수 있도록 구성하였다. 가변적인 그래프를 통해 사용자가 상세하게 보고자 하는 영역을 세밀하게 볼 수 있도록 하였다.

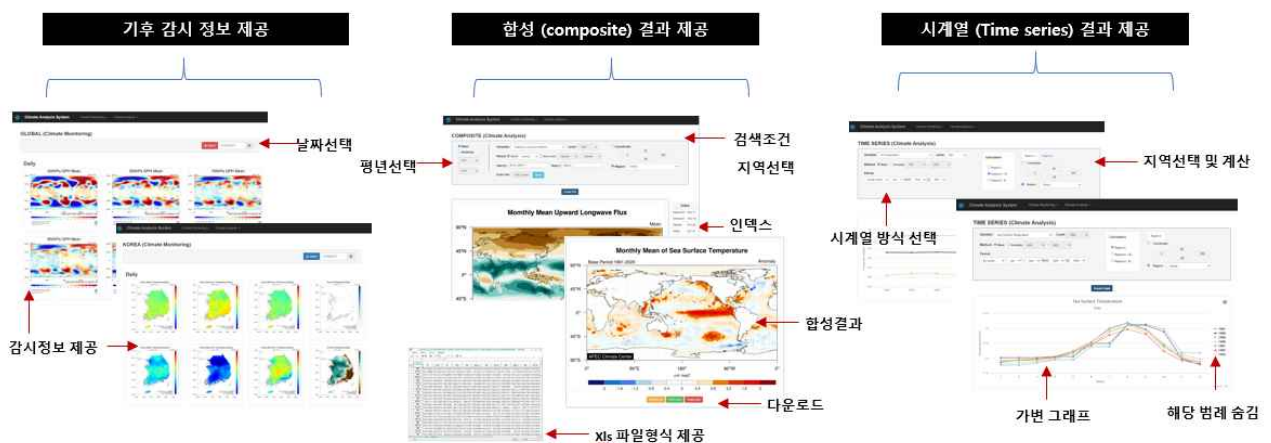


Figure 123. for APCC's climate analysis system development, it was designed in consideration of various services such as providing climate monitoring information, providing composite results, and providing time series results.

(4) 시스템 구현

(가) 사용자 인터페이스

① 자료합성 서비스

기후분석 시스템의 자료합성 서비스는 1948년부터 최근 자료에 대해 월별 합성을 제공하는 서비스다. 합성 분석 정보를 제공하기 위해 조건입력 영역과 결과제공 영역, 결과에 대한 파일제공 영역으로 구성하였다. 조건입력 영역은 여러 파일의 평균값이나 편차값을 선택하는 합성방법 선택과 편차값을 선택할 경우, 사용자가 평년 기간을 자유롭게 선택할 수 있는 기능을 제공한다. 또한, 편차선택, 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 컬러 테이블을 제공하여 결과 이미지를 변경할 수 있도록 하였다.

합성 결과 화면에서는 선택한 지역의 합성분석 결과를 표출해 주는 영역으로 조건 결과를 지도기반으로 이미지 정보를 제공한다. 사용자는 분석결과에 대해 NetCDF파일이나 이미지, 엑셀파일 형태로 제공이 가능하며 선택영역에 대한 최댓값, 최솟값, 평균값, 중간값, 편차, 분산 등의 인덱스 정보를 제공하도록 구성하였다.

COMPOSITE (Climate Analysis)

Mean
 Anomaly

Variables: Level:

Period: Month: Multi-month: ~

Year(+): Year(-):

Color bar:

Coordinate:

 Region:

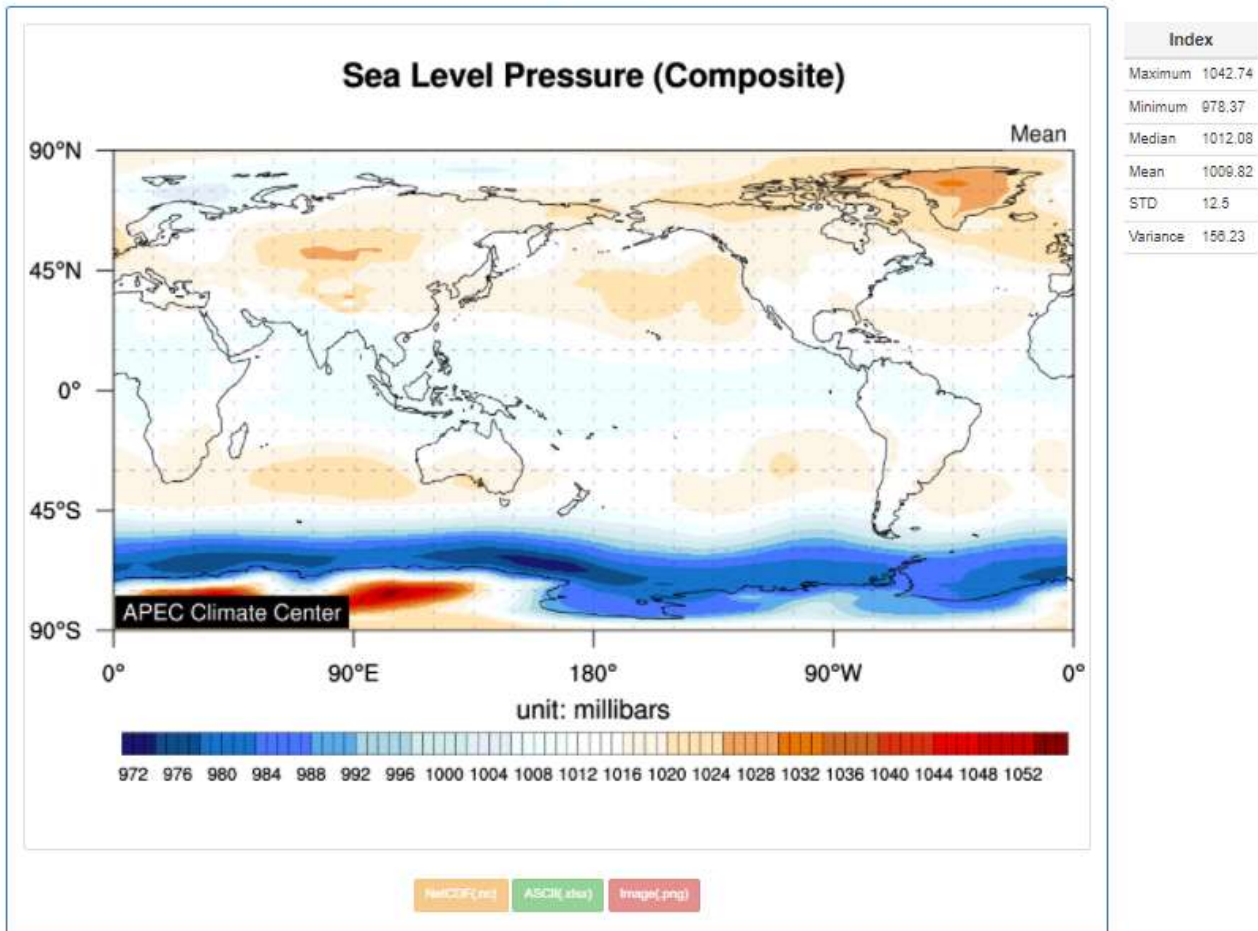


Figure 124. The main interface for the composite service of the climate analysis system was composed of condition input, analysis result provision, and file provision.

② 시계열 분석 서비스

기후분석시스템의 시계열 분석 서비스는 합성 분석 서비스와 비슷하게 상단에 조건입력화면과 하단에 결과화면으로 구성하였다. 조건 검색화면에서는 변수 선택 및 선택된 변수에 따른 Level 선택, 그리고 평균값이나 편차값에 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.

TIME SERIES (Climate Analysis)

Variable: Level:

Method: Mean Anomaly 1951 ~ 2020

Period: ~ from to

Calculation: Region A Region(A + B) Region(A - B)

Region A:

Coordinate:

Region:

Create Graph

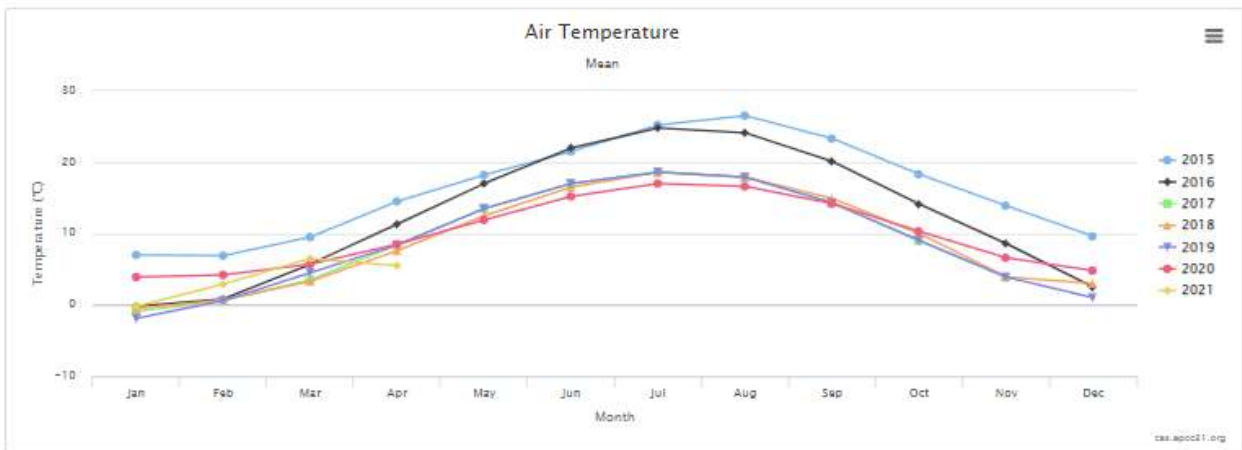


Figure 125. The main interface for the time series service of the climate analysis system was composed of condition input, analysis result provision as graph, and file provision.

(나) 기능별 구성

① 검색조건 입력

기후분석시스템의 검색조건 입력화면은 사용자의 친숙도를 위해 합성 분석 서비스와 시계열 분석 서비스 모두 비슷한 형태로 구성하였다. 좌측 상단에 변수 선택 및 기간을 선택하고 중간에 연도 선택, 마지막에는 지역을 선택하도록 메뉴를 배치하였다.

합성 서비스의 조건입력화면은 합성한 자료의 결과를 평균값으로 제공할 것인지 편차값으로 제공할 것인지를 선택하는 메뉴가 제일 앞에 배치되어 있다. 평균값을 합성하고 싶다면 중간에 선택된 합성할 연도에 대한 평균을 계산해 주고, 편차값으로 합성하고 싶다면 평년을 기준으로 선택한 연도의 편차를 계산하여 준다. 평년은 30년(1991~2020)을 기본으로 정의되어 있으며 사용자는 새로운 평년기간으로 수정하여 분석할 수 있다. 사용자에게 제공되는 변수는 Sea level Pressure, Outgoing Longwave Radiation, Sea Surface Temperature, Air Temperature, Air Temperature at sigma level 0.995, Ice Concentration Geopotential Height, Relative Humidity, Zonal Wind, Meridional Wind, Omega이다. Level은 Air Temperature와 같이 하나의 파일에 level정보를 갖고 있다면 해당하는 정보를 보여주고 있다. 각 변수의 특성에 따라 활성화되기

나 비활성화 되도록 구축하였다. 기간은 1948년부터 월단위로 선택이 가능하며 1월부터 12월의 기간을 선택하거나 특정 월을 선택할 수 있다. 또한, 합성한 연도를 1948년부터 최근까지 선택하거나 합성에서 제외할 연도를 같은 방식으로 선택할 수 있도록 구성하였다. 결과는 각 변수에 따라 컬러바를 기본으로 제공하고 있으나 사용자가 원하는 컬러바로 변경이 가능하도록 다양한 컬러바를 제공한다. 합성정보는 기본적으로 전구를 제공하지만, 사용자가 특정지역을 원할 경우, 미리 지정된 지역을 선택하거나 좌표를 직접입력하여 원하는 지역을 분석할 수 있도록 메뉴를 제공한다.

COMPOSITE (Climate Analysis)

Figure 126. Composite service provides various menus such as variable selection, period selection, region selection, and color selection are provided.

시계열 서비스의 조건입력화면은 우선, 변수를 선택하도록 구성하였다. 제공되는 변수는 Sea level Pressure, Outgoing Longwave Radiation, Sea Surface Temperature, Air Temperature, Air Temperature at sigma level 0.995, Ice Concentration Geopotential Height, Relative Humidity, Zonal Wind, Meridional Wind, Omega로 변수의 특성에 따라 Level 메뉴가 활성화되거나 비활성화되도록 구축하였다. 분석하고자 하는 결과가 평균값인지 편차값인지를 선택할 수 있도록 메뉴를 제공하고 평년을 기준으로 선택한 연도의 편차를 계산하여 준다. 평년은 30년 (1991~2020)을 기본으로 정의되어 있으며 사용자는 새로운 평년 기간으로 수정하여 분석할 수 있다. 제공되는 서비스는 1948년부터 월 단위로 선택이 가능하며 1월부터 12월의 기간을 선택하거나 특정 월을 선택할 수 있다. 기간을 연도와 다중 월을 선택하면 결과값이 월별로 표기되고 해당하는 연도별로 그래프가 생산된다. 하지만 특정 월을 선택하면 결과가 최댓값, 중간값, 최솟값으로 그래프가 생성되어 연도별 변화를 보여준다. 계산하고자 하는 하나의 지역을 선택하거나 두 지역을 더하거나 뺄 수 있도록 지역 선택기능을 제공하도록 구성하였다.

TIME SERIES (Climate Analysis)

The screenshot shows a web interface for climate analysis. It features several sections:
1. **Variable:** A dropdown menu set to 'Sea level Pressure'.
2. **Level:** A dropdown menu set to '1000'.
3. **Method:** Radio buttons for 'Mean' (selected) and 'Anomaly'.
4. **Period:** Two dropdown menus for years, set to '1991' and '2020'.
5. **Period (Detailed):** A section with 'By month', 'Jan', 'Dec', 'from', '2014', 'to', and '2021' dropdowns.
6. **Calculation:** Radio buttons for 'Region A' (selected), 'Region(A + B)', and 'Region(A - B)'.
7. **Region A:** A text input field.
8. **Coordinate:** Radio buttons for 'Coordinate' and 'Region'.
9. **Region:** A dropdown menu set to 'Global'.
10. **Coordinate values:** Input fields for longitude (0, 90) and latitude (-90, 360).

Figure 127. In the search area of the Time series service, various menus such as variable selection, period selection, region selection, and calculation of values for two regions are provided.

② 결과제공

합성된 결과는 아래와 같이 지도를 기반으로 분석 결과를 제공하고 있다. 사용자가 선택한 지역을 대상으로 제공되며 아래의 결과는 전 지구를 대상으로 합성한 결과다. 사용자가 선택한 합성조건에 따라 계산된 결과를 지도 기반으로 시각화하여 제공한다. 우측 상단에는 결과에 대한 최댓값, 최솟값, 중간값, 평균값, 표준편차, 분산에 대한 인덱스 정보를 제공하도록 하였다. 하단에는 결과에 대해 NetCDF파일이나 엑셀형식의 파일, 이미지 형태의 파일로 내려받기 기능을 제공한다.

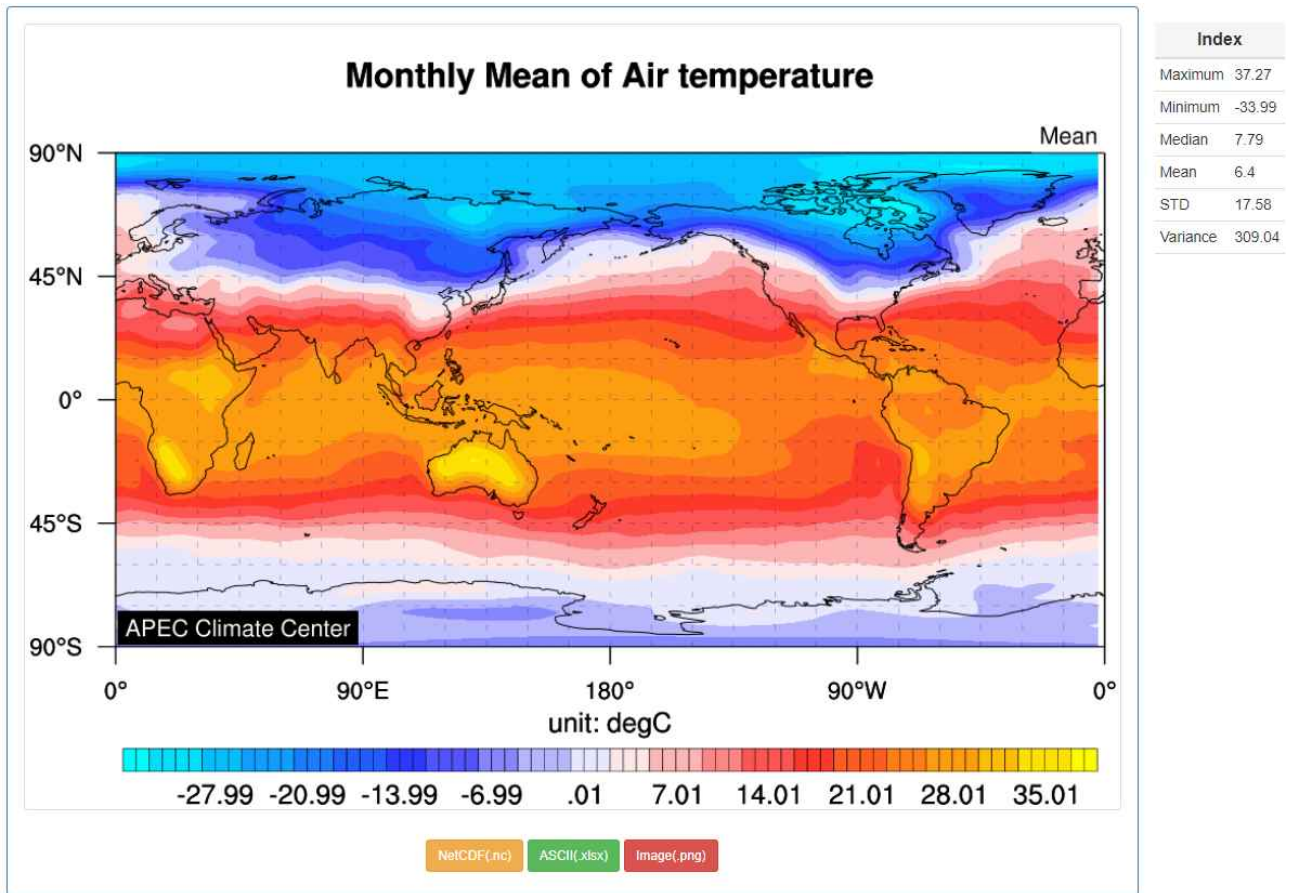


Figure 128. AS a result of the composite service, the results analyzed based on the map are provided as visualized information. In addition, index information for the selected region is provided.

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.

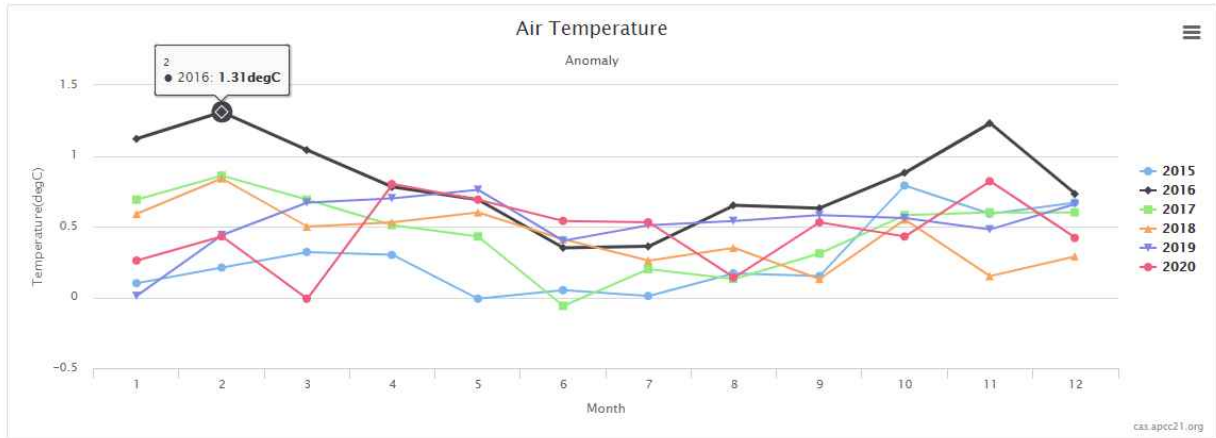


Figure 129. Time series analysis service provides results so that you can see the change in values over time using graphs.

③ 파일제공

분석된 결과는 다양한 형태로 제공되고 있다. 웹 브라우저에서 프린트를 할 수 있으며 이미지 파일인 PNG파일, JPEG파일, PDF파일, SVG파일로 변환하여 다양 형태의 파일로 내려받기 기능을 제공한다.

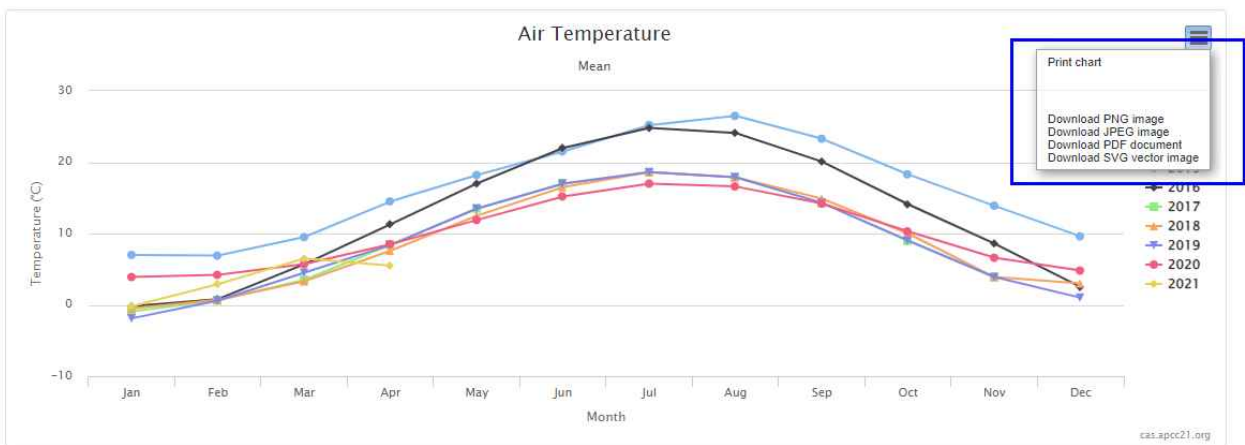


Figure 130. Analyzed results are provided to users in the format of various files.

또한, 아래와 같이 분석된 결과값을 엑셀 파일로 내려받을 수 있다. 이를 통해 사용자는 결과값을 활용하여 다양한 형태로 그래프를 그리거나 다른 용도로 재사용이 가능하다.

composite_slp_01_[2019,2018]-None_monthly_-90_90_0.360.default_Mean.xlsx [C:\Users\Wgoal_Development\Downloads\W] - 엑셀 뷰어

파일(F) 편집(E) 보기(V) 도움말(H)

100%

	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

Mean composite

준비

100%

Figure 131. The analyzed results are provided in the form of an Excel file including coordinate information.

(5) 요약과 결론

이상기후 발생 시 연구자가 진행하던 자료처리 및 분석 과정을 신규 구축된 기후분석시스템을 이용함으로써 자료처리 시간을 줄이고 빠른 원인분석이 가능하게 함으로써 이상기후 대응 역량 강화에 기여하고 있다. NCEP의 재분석 자료와 KMA의 종관기상관측자료(ASOS)의 최신자료를 주기적으로 수집하여 표준화 프로그램을 통해 자료 전처리를 통해 분석 서비스를 위한 기초자료를 생성하고 사용자가 원하는 평년을 선택함으로써 자유롭게 자료를 분석할 수 있도록 서비스를 구현하였다.

사용자가 원하는 변수, 지역을 선택하여 합성하고자 하는 기간을 자유롭게 선택하는 기능을 제공하고 미리 정해진 지역이나 좌표를 직접 입력하여 평균이나 편차에 대한 합성 분석 정보를 제공하는 서비스를 제공함으로써 사용자 편리성을 강화하였다. 또한, 사용자가 선택한 조건과 지역에 따라 분석된 결과의 최댓값, 최솟값, 중간값, 평균값, 표준편차, 분산 등의 인덱스 정보 제공 및 분석을 원하는 지역에 대해 선택한 기간의 평균 정보나 사용자가 선택한 평년의 기간을 정하여 편차 결과 및 두 지역의 합성이나 차이 정보에 대한 월별, 연도별 시계열 분석을 할 수 있는 다양한 서비스를 제공하였다.

다. 동아시아 이상기후 시스템 개선

(1) 연구 배경

지구온난화에 의한 기후변화의 위협과 함께 이상기후는 세계 곳곳에서 발생하는 인명피해 뿐만 아니라 일상적으로 사회경제적 영향을 미치고 있다. 한국과 동아시아에서도 폭염, 한파, 가뭄, 폭우의 강도, 지속시간, 빈도가 점점 증가할 것으로 예상되며 이에 따라 시의성 있는 대응체계 마련이 시급한 상황이다. 본 시스템에서는 준 실시간 재분석 자료를 이용하여 한국 및 동아시아 지역의 이상기후 감시 및 분석 정보를 효과적으로 제공할 수 있는 체계를 제안한다.

주기적으로 이상기후 감시정보 생산 및 가시화 과정을 통하여 매일 다양한 감시 정보를 APEC 기후센터 웹페이지에서 한 눈에 파악할 수 있도록 하고, 동아시아 및 한반도에서 발생하는 이상기후 현상을 쉽고 빠르게 전달하고자 하여, 2019년부터 APEC 기후센터에서는 이상기후 감시 정보 계산을 통해 준 실시간 이상기후 감시 정보를 주기적으로 생산하고, 전지구 및 동아시아 지역에 대해 표출하는 서비스 체계를 구축하여 이상기후 감시 정보 웹 서비스를 시작하였다.

동아시아 이상기후 모니터링 시스템 개발 1차년도인 2019년에는 APCC 웹 사이트를 통해 월별 6개, 주별 4개 총 10개의 감시정보를 표출하였다. 총 10개의 지수는 모두 동아시아 지역에 대한 각 지수의 월별/주별 감시 정보의 공간 분포로 표출하여 제공하였으며, 이러한 공간 분포도를 통해 각 감시 기간 동안 어느 지역에서 이상기후가 빈번하게 나타났는지 각 지수별로 비교하여 확인할 수 있었다. 하지만, 각 월에 대한 이상기후 감시 정보는 현재의 상황만을 반영하여 표출하고 있어 과거 값과의 비교가 힘들 뿐만 아니라, 월별 및 주별 총 10개의 감시 정보를 전체적으로 함께 이해하는 데에 큰 어려움이 있었다.

개발 2차년도인 2020년에는 개발 1차년도에서 적용하였던 요일 기준으로 감시 정보를 계산하는 주별 감시 정보 생산 및 표출 체계(Figure 132)를 없애고, 매 월 날짜를 기준으로 순별 감시 정보를 생산하여 월별 감시 정보의 보조 자료로 이용하였다. 이렇게 날짜 기준인 월별, 요일 기준인 주별 감시 정보를 모두 날짜를 기준으로 계산하여, 순별 감시 정보를 월별 감시 정보의 부가 정보로 활용하여 함께 해석에 활용할 수 있도록 통합하였다. 감시 정보 표출 자동화 시스템 스케줄은 Figure 133에서와 같이 통합된 자동화 일정에서 함께 월별 자료를 생산하고 표출하여 더욱 효율적인 운영이 가능하게 개선되었다.

또한 이상기후 감시 정보에 부가 정보를 추가적으로 생산하여 더욱 이상기후 감시 정보에 대한 이해도를 높이하고자 하였고, 월별 이상기후 감시 정보와 함께 제공되는 부가 정보로 한반도 지역에 대한 과거 기간 대비 현재의 순위를 추가 생산하였다. 과거 기간을 포함한 순위 정보를 추가적으로 생산하여, 과거 자료 대비 현재 감시 중인 감시 정보의 월 대푯값이 어느 정도에 위치해 있는지 한 눈에 함께 파악함으로써 이상기후 감시 정보에 대한 이해도를 더욱 높일 수 있도록 개선하였다.



Figure 132. Schedules on the HPC and WEB before improvement extreme climate monitoring system.



Figure 133. Schedules on the HPC and WEB after improvement extreme climate monitoring system.

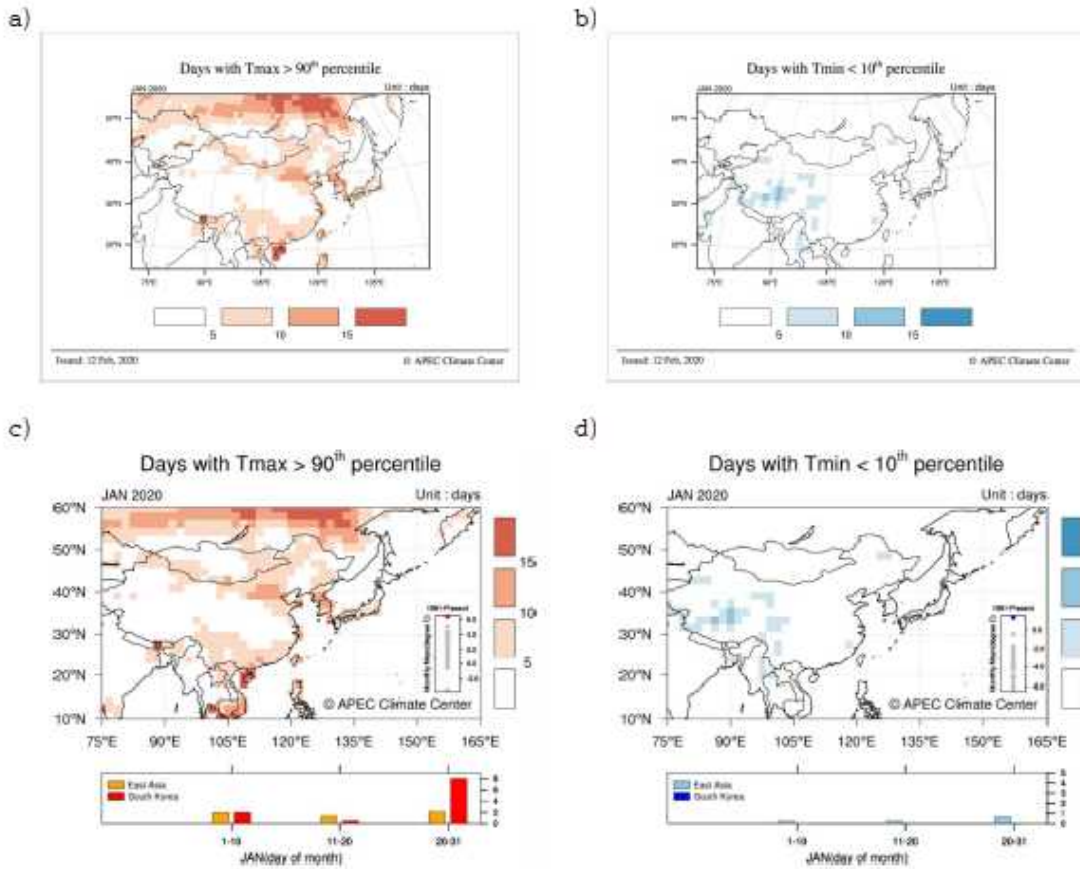


Figure 134. Monthly extreme climate monitoring map (a), (b) before and (c), (d) after improvement visualization technique for (a), (c) daily maximum temperature above 90th percentile and (b), (d) daily minimum temperature below 10th percentile.

가시화 기법 개선 전에는 이상 고온 및 이상 저온 발생일수의 공간 분포도만 보고 해석을 해야 했으나, 가시화 기법 개선 후에는 과거 값 분포도 대비 현재 위치가 어떠한지 순위 분포도를 통해 알 수 있으며, 순별로 비교하여 같은 1개월 내 기간이라도 언제 더욱 이상기후 발생일수가 빈번했는지 함께 살펴볼 수 있도록 개선하였다. (Figure 134)

2019년에 동아시아 이상기후 모니터링 시스템이 개발된 이후, 더욱 효율적인 자료 생산 및 표출을 위해 생산 스케줄 개선을 통해 월 1회, 주 1회씩 생산되던 이상기후 감시정보를 월 1회에 통합하여 생산 및 표출할 수 있도록 자동화 시스템을 개선하였다. 또한 동아시아 지역에 대한 월별 이상기후 발생일수 공간분포만 볼 수 있었던 감시정보를 과거 자료 및 순별 자료와 함께 표출 함으로써 부가 정보를 한 눈에 함께 살펴보며 해석할 수 있도록 정보를 개선하였다. 하지만 이상기후 감시정보의 기준이 되는 과거 기간은 평년 기간으로 정의된 1981년~2010년 동안의 30년 자료였으므로, 최근 추세를 반영하지 못하는 단점이 있었고, 최근에 더욱 빈번하게 이상기후가 자주 발생하면서, 더욱 현 상황에 맞고 이해하기 쉽게 최신 기후 자료를 반영해야 할 필요가 있다.

2021년 개발 3차년도에는, 동아시아 지역의 이상기후 감시 웹서비스에 이용되는 변수는

일 단위 강수량, 최고 기온, 최저 기온 등으로 평년 기간을 구 평년 기간(1981~2010년)에서 신 평년 기간(1991~2020년)으로 변경하며, 변수별 일 단위 백분위 값을 새롭게 계산하여 새로운 이상기후 감시 기준으로 선정한다. 기후 평년값 변화에 맞게 이상기후 감시 기준을 새로이 선정함으로써, 현 상황에 맞는 이상기후 감시 정보를 제공하고자 한다. 더불어, 새로운 기준을 선정할 뿐만 아니라, 구 평년 기간에서 신 평년 기간으로 기준이 변경됨으로써, 이상기후 감시정보의 기준이 되는 일 최고 기온 및 일 최저 기온의 90백분위 값, 10백분위 값의 변화가 공간적으로는 어떻게 분포되고 있으며, 이렇게 바뀐 감시 기준으로 인해 이상기후 발생일수의 변화도 어떻게 바뀔지 살펴보고자 한다.

(2) 자료와 방법

(가) 재분석 자료

① 자료

NCEP/NCAR의 전지구 재분석자료 중 일 최고 및 최저 기온자료와 CPC의 전지구 일 강수량 자료 등을 이용하여 구 평년 기간(1981-2010년) 및 신 평년 기간(1991-2020년)에 대한 일별 90 백분위 값과 10백분위 값을 각각 계산하였고, 이를 이상기후 감시 기준으로 선정하여 매월/매주 발생하는 이상기후 발생일 수(days)와 강도 지수를 생산하였다.

기온 자료의 공간 해상도는 T62 가우시안 그리드로 경도192개 × 위도 92개의 그리드를 가지고 있다. 그리고 CPC 일 강수량자료의 공간 해상도는 0.5도× 0.5도로 기온보다 더욱 고해상도이고, 해양과 극지역 마스크가 되어있는 육지 자료다. 이상기후 감시 정보 기준 선정을 위한 백분위값 계산을 위해 윤년(2월 29일)자료는 모두 제외되었다.

② 동아시아 이상기후 모니터링 감시정보

매월 생산 및 표출되고 있는 동아시아 이상기후 모니터링 감시정보에는 월별 이상고온 발생일수, 월별 이상저온 발생일수, 최대 강수 사상 및 최대 강수 재현 기간, 표준 강수 지수(SPI) 과 표준 증발량 부족 지수(SEDD), 토양 수분 지수(SMI)를 통합한 월별 가뭄 감시 통합맵이 있다. 그리고 이상고온, 이상저온과 SPI1을 이용하여 습윤한 지역, 건조한 지역을 하나의 동아시아 맵에 나타내는 월별 이상기후 통합맵까지 포함하면, 매월 5개의 이상기후 감시정보가 APCC 홈페이지에서 웹서비스 되고 있다.

(나) 방법

동아시아 이상기후 모니터링 시스템에서 매월 현업으로 자동화 구축 되어 생산되고 있는 이상기후 감시정보(이상기후 발생일수 및 강도 지수)는 과거 평년기간인 구 평년(1981-2010년) 자료를 이용하여 90백분위 값과 10백분위 값을 계산하여 이상기후 감시 기준으로 선정하였다.

비교를 위해 새롭게 적용 되는 신 평년(1991-2020년) 자료를 이용하여 90백분위 값과 10백분위 값을 계산하여 새로운 이상기후 감시 기준을 선정하였고, 구 평년 기간의 이상기후 감시 기준과의 비교를 실시하였다. 또한 이상기후 발생일수도 구 평년 기간과 신 평년 기간에 대해 각각 계산하여 비교를 실시하였다.

이상기후 감시기준 및 발생일수는 동아시아 지역 및 한반도 지역에 대해 월별로 계산하여 비교하였으며, 평년값을 기준으로 사용하여 계산하는 일 최저기온 및 일 최고기온 변수에 대해서만 비교를 진행하였다.

(3) 평년 기간 변화에 따른 변화 비교

(가) 평년 기간 변화에 따른 동아시아 이상기후 감시기준 변화 비교

구 평년(1981~2010년) 대비 신 평년(1991~2020년)으로 이상기후 감시 기준 선정을 위한 평년 기간을 바꾸면서, 신 평년 기간 자료를 이용하여 계산 된 90백분위와 10백분위 값과 구 평년 기간 자료를 이용하여 계산 된 값의 차이를 동아시아 지역에 대해 공간 분포로 나타내어 두 기간의 변화를 월 별로 비교하였다.

일 최고 기온의 구 평년 대비 신 평년의 이상기후 감시 기준의 차이는 Figure 135부터 Figure 138까지, 일 최저 기온에 대해서는 Figure 139부터 Figure 142까지 공간 분포로 나타내었다.

동아시아 지역에 대해 최근 기후를 반영한 이상기후 감시 기준에는 어떠한 공간적인 변화가 나타났는지 월별로 살펴볼 수 있다. 90백분위와 10백분위의 동아시아 공간 분포를 살펴보면, 구 평년에서 신 평년으로의 변화가 공간적으로 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

월별로 공간적인 분포 특성이 많이 다르게 나타나지만, 1월에는 일 최고기온의 90백분위 값이 몽골지역의 서쪽에서 크게 떨어짐과 동시에 러시아 동쪽에는 기온이 뚜렷하게 상승한 것이 특징이며, 2월과 3월에는 중국 지역에서 10백분위 값이 증가한 특징을 보인다. 한반도에 대해서는 1월과 2월에 90백분위 값의 상승을 볼 수 있고, 3월에는 10백분위 값에서 약간 상승한 특징을 보인다. (Figure 135)

5월과 6월에는 중국 서부 지역에서 90백분위 값이 크게 하강한 것이 특징적으로 나타나고 있으며, 10백분위 값의 변화에서는 4월에 나타난 중국 지역의 온난화와 6월에 나타난 러시아 남부지역의 큰 폭의 상승세가 가장 눈에 띄는 특징으로 보인다. 한반도 지역에 대해서는 5월에 90백분위와 10백분위 값 모두 약간 상승한 특징을 볼 수 있다. (Figure 136)

7, 8, 9월에서 볼 수 있는 가장 큰 특징은 6월부터 자리 잡고 있던 10백분위 값의 러시아 남부 지역 온난화 현상이다. 90백분위 값은 중국 북부와 은 그리 큰 변화를 보이지 않고 있지만, 10백분위 값에서는 러시아 남부 지역에서 전체적으로 온난화 시그널을 보이며, 이상기후 감시 기준이 구 평년에 비해 크게 상승한 것을 알 수 있다. (Figure 137)

10, 11, 12월이 되면서 6월부터 자리 잡았던 10백분위 값의 온난화 시그널이 10월까지도 지속되는 것을 볼 수 있다. 특히 히말라야에서는 12월에 90백분위 값이 매우 큰 값으로 증가하였고, 10분위 값 또한 10월부터 12월까지 온난화 시그널로 크게 기온이 상승한 것을 알 수 있다. 한반도 지역에서도 90백분위 값이 10월과 11월에 더욱 상승한 특징을 보인다. (Figure 138)

이상고온 감시기준으로 선정된 일 최고기온의 90백분위 값이 상승함으로써, 구 평년 기간보다 이상고온 감시 기준이 크게 상승한 지역도 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 지역에서 이상기후 발생일수 또는 이상기후 강도 지수를 계산하게 되면, 이전보다 더욱 상승한 이상고온 감시기준으로 인해, 구 평년 기준으로는 이상고온에 해당되지만, 신 평년 기준으로는 해당되지 않을 수 있다는 것을 뜻한다.

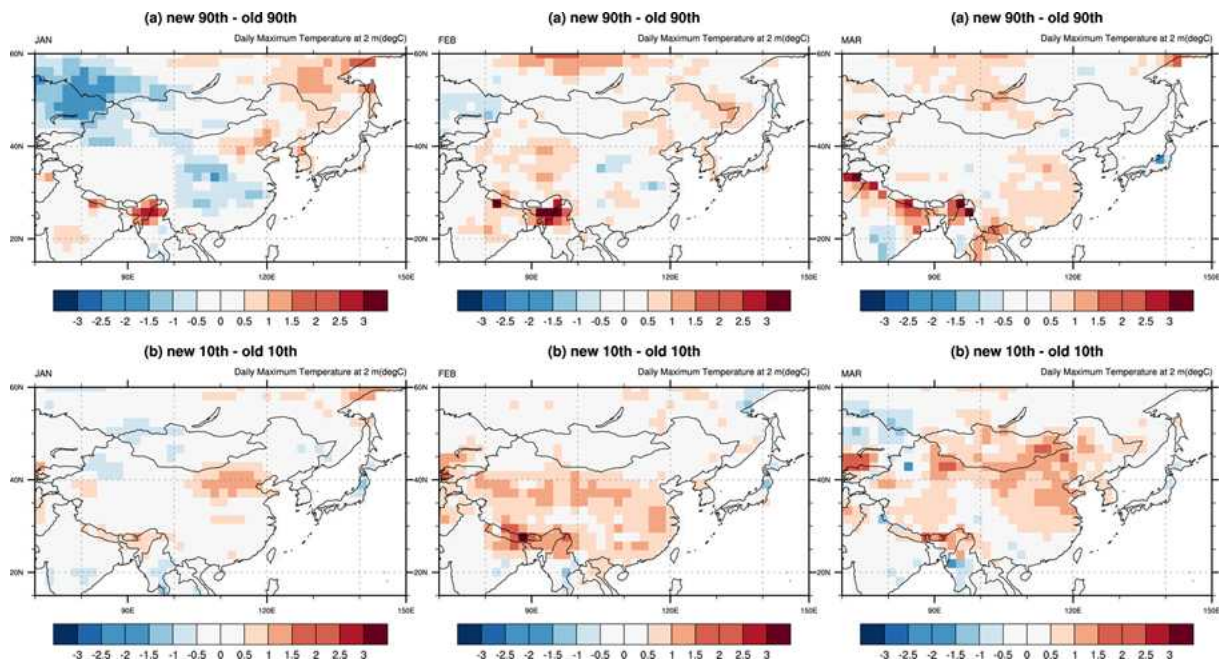


Figure 135. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on January (left), February (middle) and March (right).

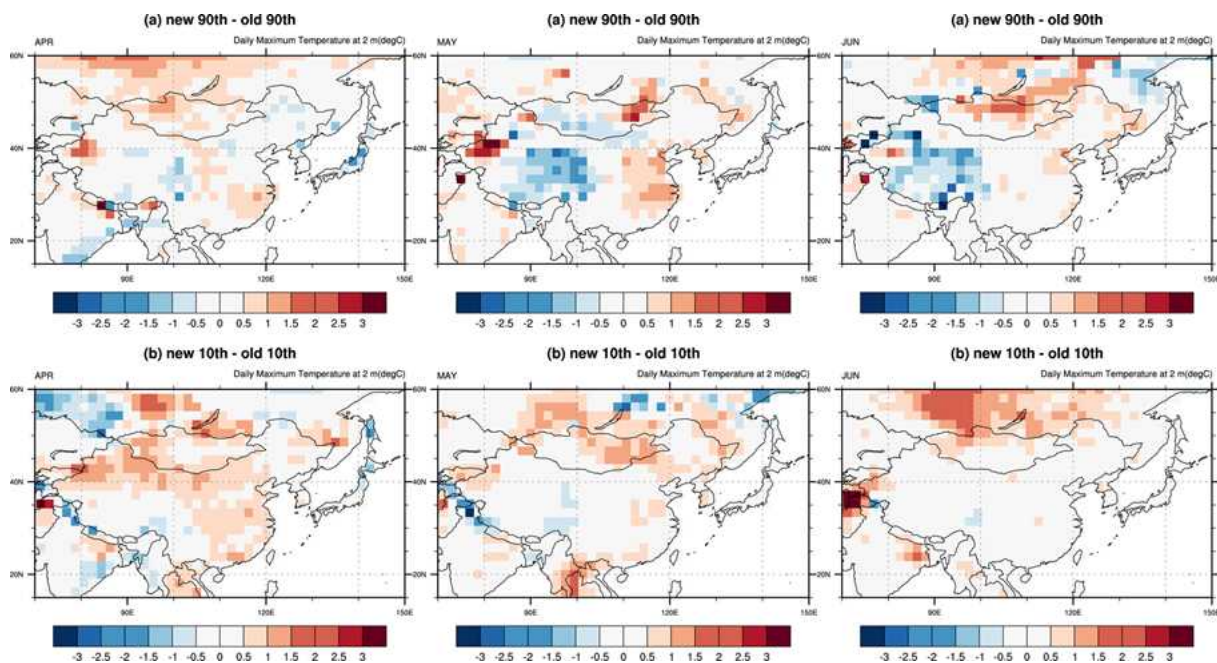


Figure 136. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on April (left), May (middle) and June (right).

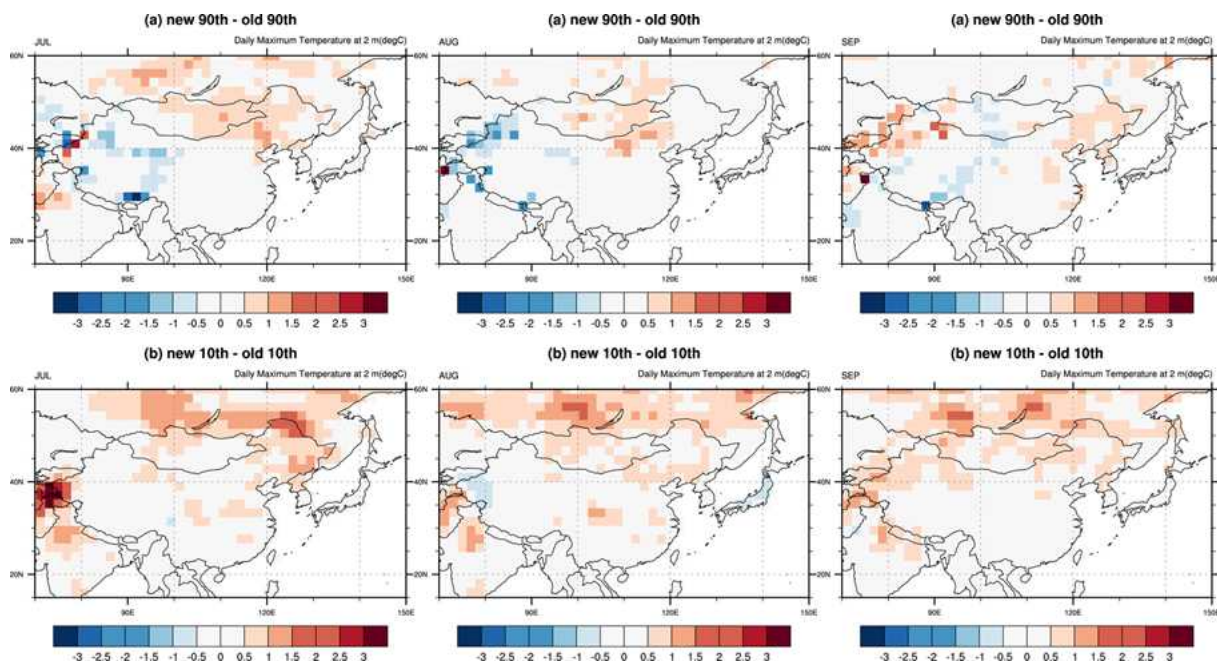


Figure 137. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on July (left), August (middle) and September (right).

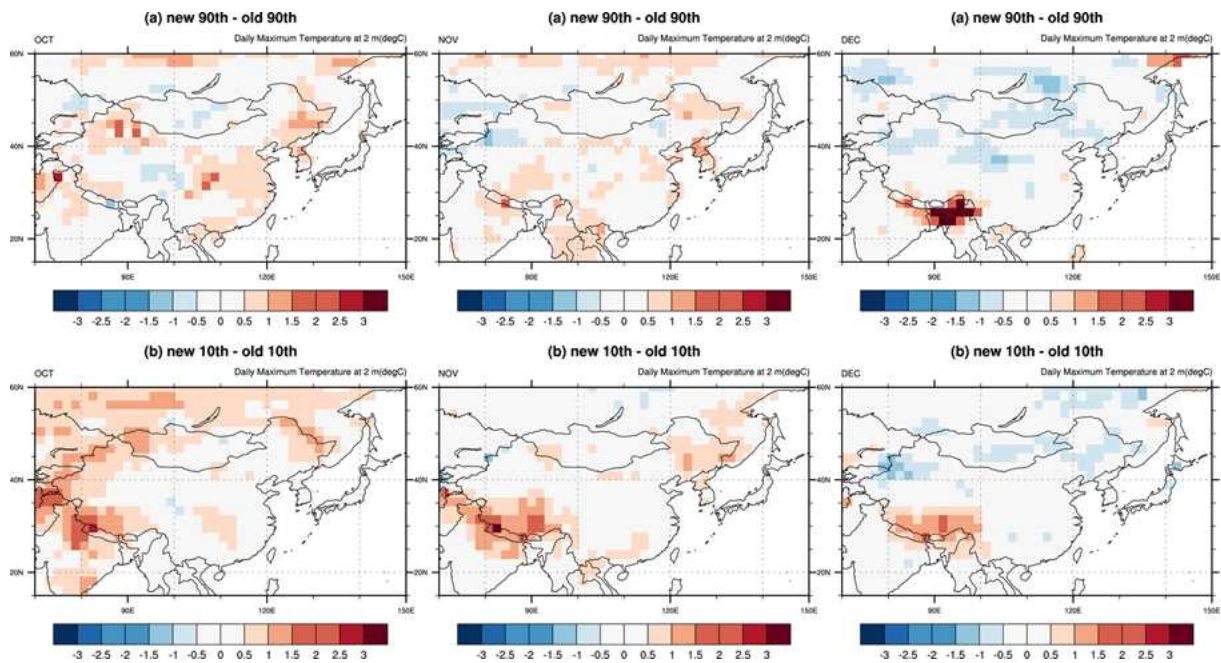


Figure 138. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on October (left), November (middle) and December (right).

일 최저기온을 이용한 90백분위 및 10백분위 값을 비교 해 보면, 1월에는 중국지역에 90 백분위 값이 크게 떨어지는 것을 볼 수 있고, 2월과 3월에는 히말라야 인근에 강한 온난화 시그널이 90백분위와 10백분위 값 모두에서 나타난다. (Figure 139)

4월부터 6월까지의 히말라야 산맥 북부 지역에 90백분위 값이 크게 떨어지는 것이 지속되고, 몽골 지역과 러시아 남부 지역에서는 90백분위 값이 증가하는 특징을 보인다. (Figure 140)

9월에는 중국의 서북부 지역과 러시아 동남부 지역에서 강한 온난화를 보이며, 이상저온 감시기준인 10백분위 값에서도 중국 서북부 지역에서 기온이 오르는 특징을 볼 수 있다. (Figure 141)

10월부터 12월에는 히말라야 산맥 부근 강한 온난화 시그널이 지속적으로 나타나는 특징이 있으며, 12월에는 히말라야 부근 외에는 오히려 90백분위 값과 10백분위 값에서 모두 동아시아 지역에 대한 기온 하강 특징이 나타났다. (Figure 142)

구 평년과 신 평년 기간에 대한 비교를 실시 해 보니, 각 월마다 패턴은 다르지만 이상저온 90백분위 및 10백분위 값에 대해서는 이미 온난화 시그널이 뚜렷하게 보이는 지역들이 나타나고 있다. 또한 강한 음의 값으로 기온이 떨어지는 지역들도 있어서, 신 평년 기준으로 바꾸어 이상저온 발생일수를 계산한다면 기존에 계산하던 구 평년 기준 이상저온 발생일수와는 또 다른 공간 패턴을 나타낼 가능성이 크다.

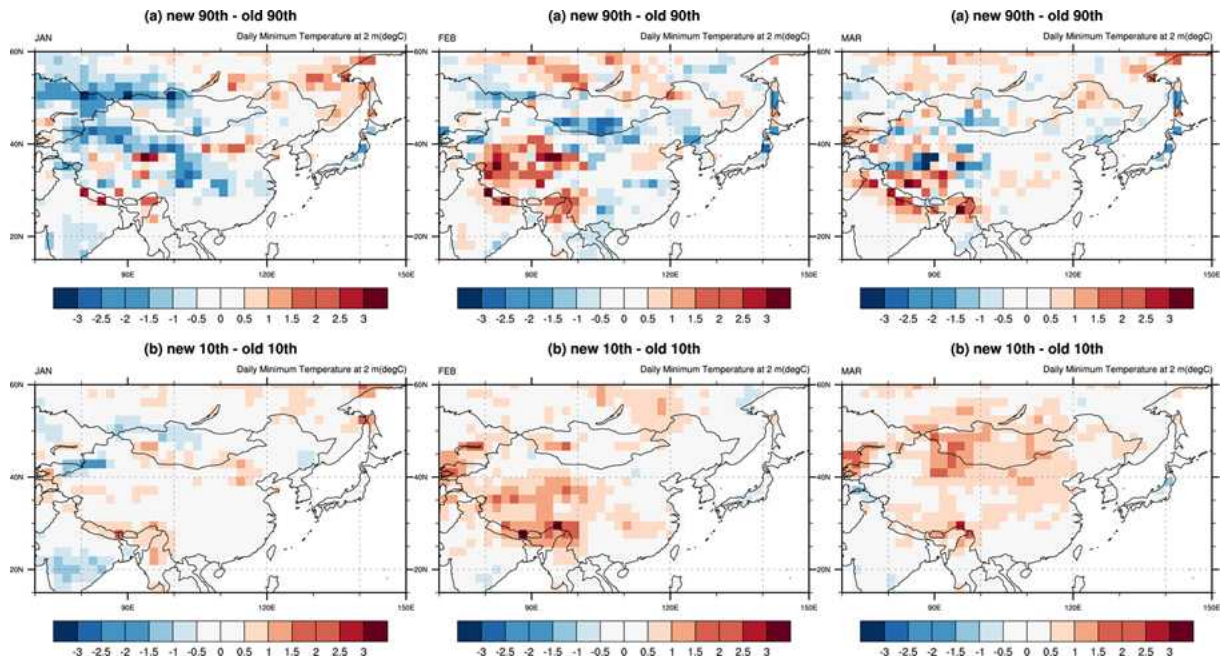


Figure 139. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Minimum Temperature on January (left), February (middle) and March (right).

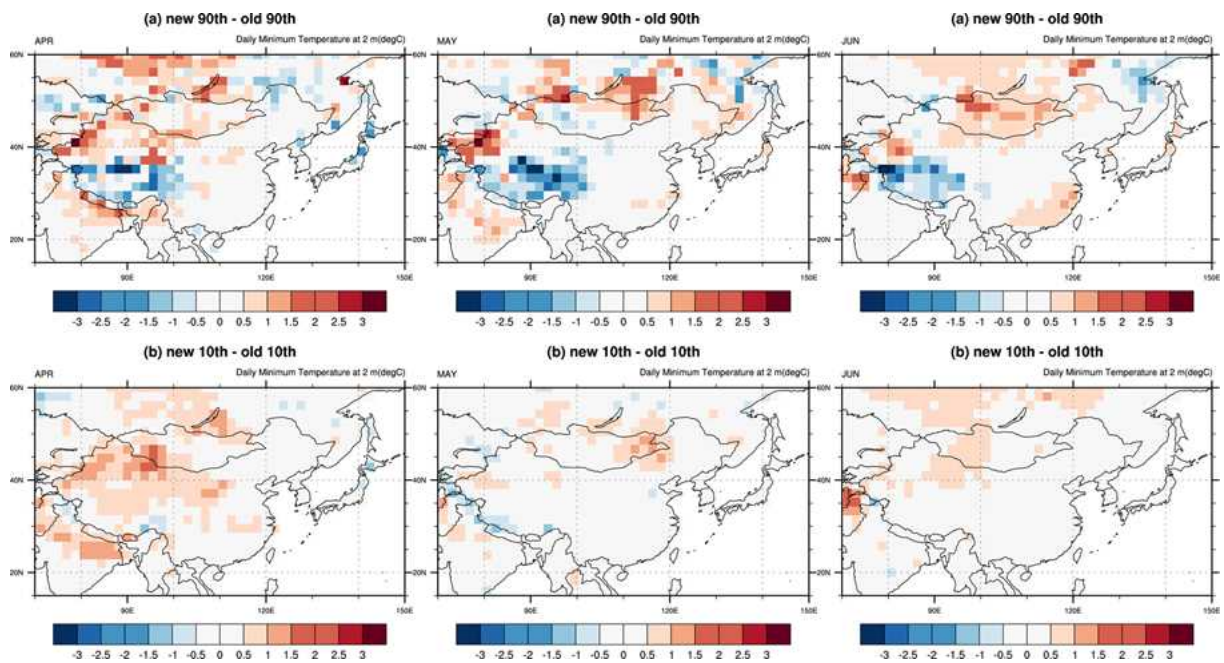


Figure 140. Difference between new base period(1991-2020) and old base period(1981-2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Maximum Temperature on April (left), May (middle) and June (right).

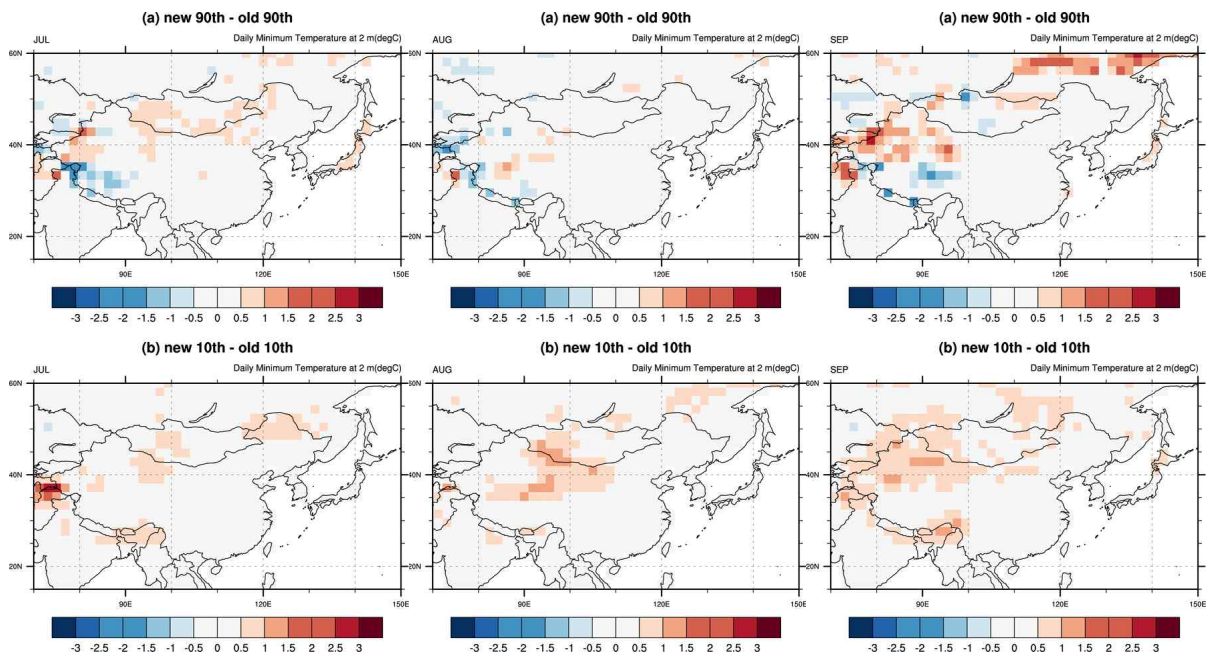


Figure 141. Difference between new base period(1991–2020) and old base period(1981–2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Minimum Temperature on July (left), August (middle) and September (right).

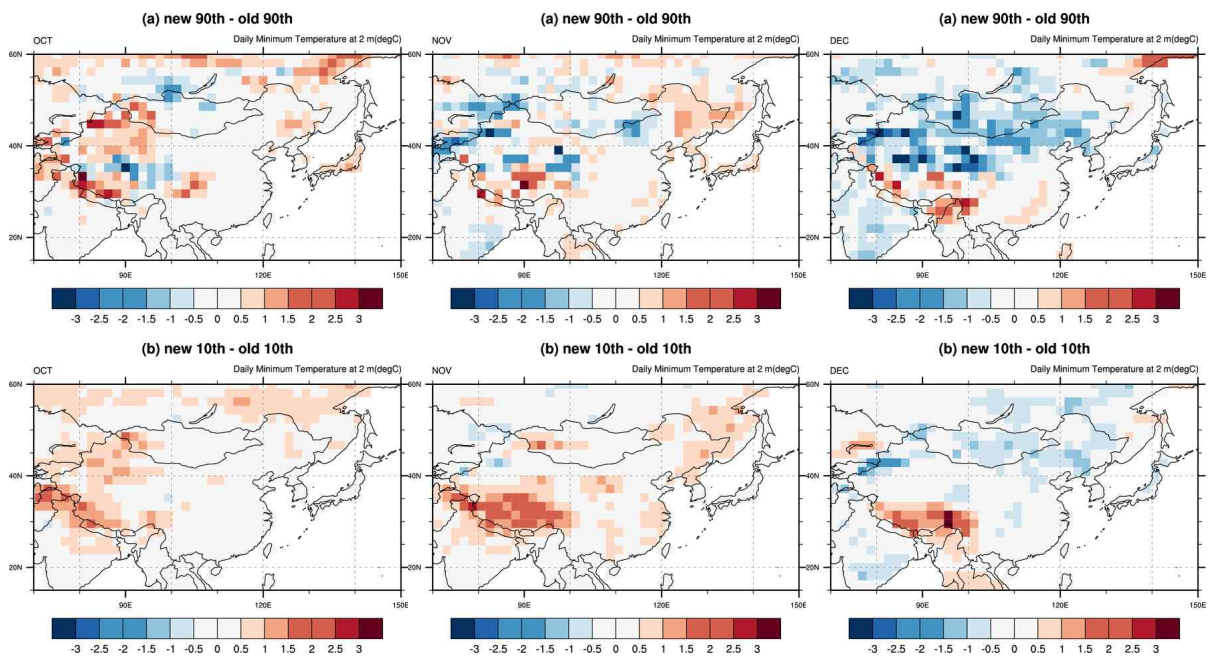


Figure 142. Difference between new base period(1991–2020) and old base period(1981–2010) of 90th (top) and 10th (bottom) percentile of Daily Minimum Temperature on October (left), November (middle) and December (right).

(나) 평년 기간 변화에 따른 동아시아 이상기후 발생일수 변화 비교

이상기후 감시 기준 선정을 위한 과거 자료 기간을 구 평년에서 신 평년으로 변경함에 따라 이상고온 감시 기준인 일 최고기온의 90백분위 값과 일 최저기온의 10백분위 값의 변화를 앞에서 살펴보았다. 이렇게 이상기후 감시 기준이 변경됨에 따라 이상기후 발생일수는 어떻게 바뀌는지 두 변수에 대해 월별로 비교를 하였다.

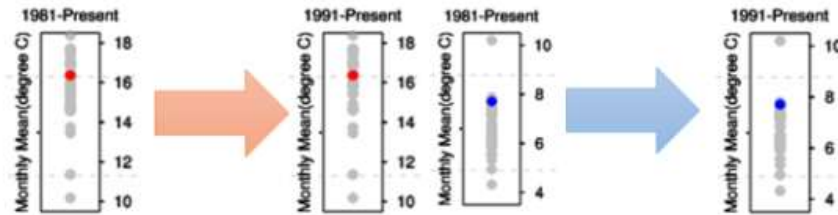


Figure 143. Comparison of base period (1981-2010) and new base period (1991-2020) for Monthly Mean of Daily Maximum (left) and Minimum (right) Temperature and over South Korea.

먼저 공간 분포와 함께 제공하는 보조자료인 월평균 연별 분포도에서는 기존에 사용하던 구 평년 기간을 신 평년 기간을 변경하여 적용해도 분포에는 큰 변화가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. (Figure 143)

아래에서는 월 별로 동아시아 지역에 대한 이상기후 발생일수 공간 패턴과 순별 동아시아, 한반도 이상기후 발생일수를 구 평년과 신 평년에 대해 비교를 하였다. Figure 144부터 Figure 154까지는 2021년 1월부터 11월까지의 이상고온, Figure 155에서 Figure 165까지는 2021년 1월부터 11월까지의 이상저온 감시정보를 구 평년과 신 평년에 대해 나타낸 것이다.

이상고온 감시 기준인 일 최고기온 90백분위 값은 온난화 시그널에 의해 구 평년보다 신 평년에서 더욱 기온이 높아진 지역이 많이 나타났다. 이상고온 감시 기준이 더욱 높아짐에 따라 구 평년에는 이상고온 발생으로 카운트 된 지역이 신 평년에는 이상고온으로 카운트 되지 않아서, 전체적으로 이상고온 발생일수가 줄어드는 것과 같이 보인다.

3월에는 중국 지역에서 이상고온의 온난화가 뚜렷하게 나타났기 때문에, 구 평년일 때 보다 신 평년 일 때 이상고온 발생 지역이 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 또한 순별 상황을 살펴보면, 구 평년 기간에는 한반도 지역의 순별 이상고온 발생이 크게 나타났으나, 신 평년 기간을 적용 한 후에는 이상고온 감시 기준이 더욱 증가함에 따라 이상고온 발생 일수가 줄어든 것을 알 수 있다. 한반도 지역에 대해서는 구 평년에 비해 신 평년의 이상기후 감시기준이 더욱 높아짐에 따라 신평년 이상기후 감시기준을 새롭게 적용할 시 이상기후 발생일수가 줄어드는 변화를 보이게 된다.(Figure 146) 2021년에는 7월 하순이나 11월 중순 한반도에 발생한 이상고온 발생일수를 살펴보면, 구 평년보다 신 평년에서 한반도 이상고온 발생일수가 현저하게 적

계 나타나는 것을 볼 수 있다. (Figure 150, 154)

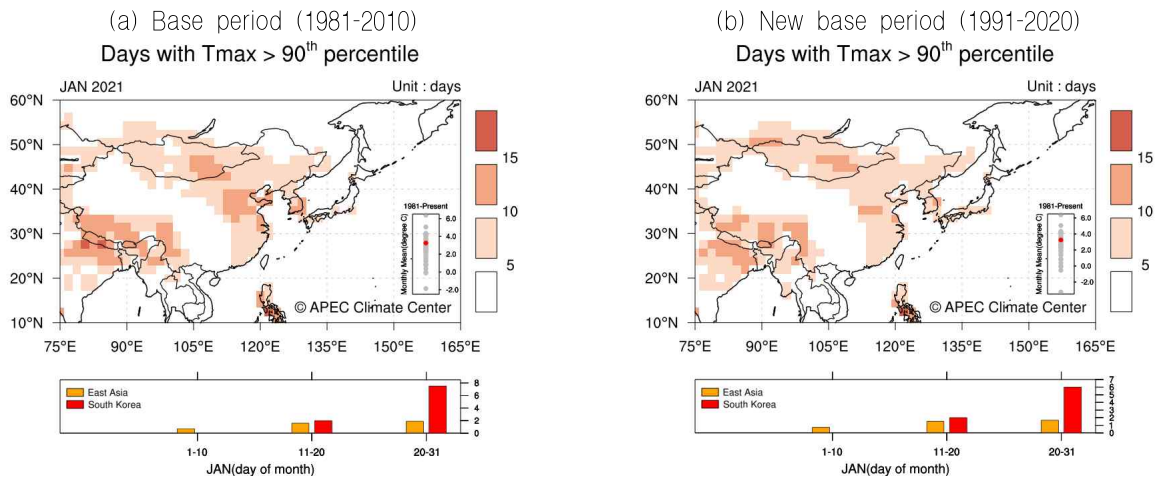


Figure 144. Monthly extreme climate monitoring map(2021/01) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

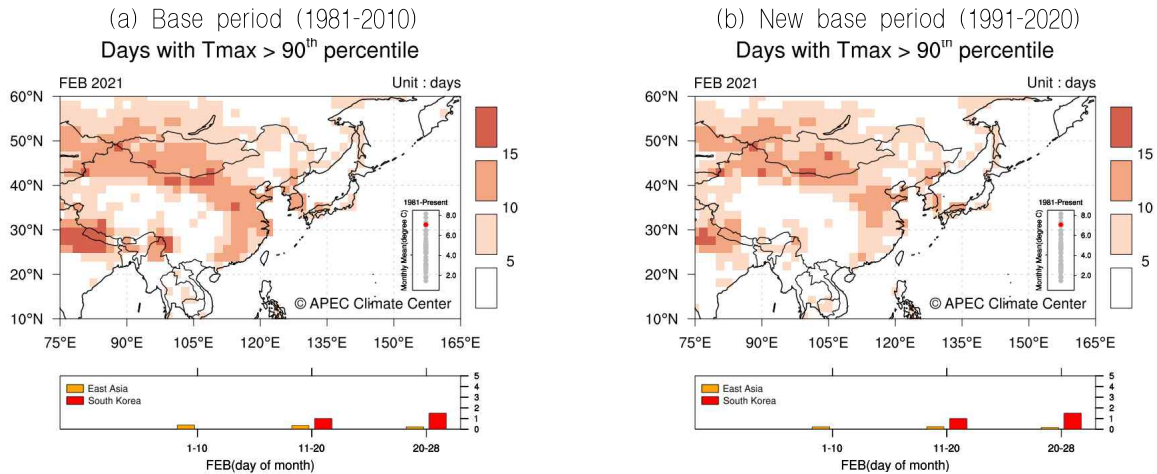


Figure 145. Monthly extreme climate monitoring map(2021/02) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

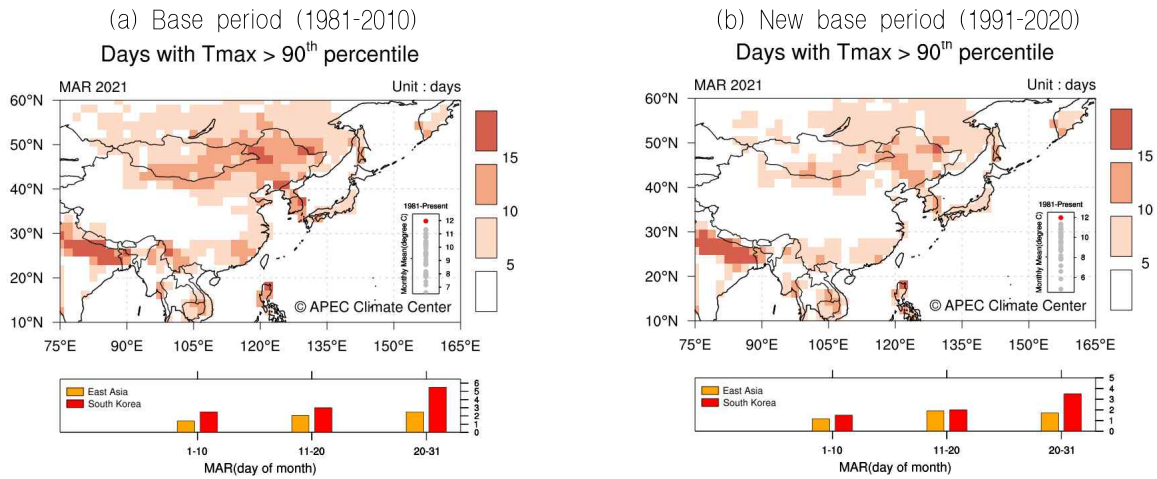


Figure 146. Monthly extreme climate monitoring map(2021/03) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

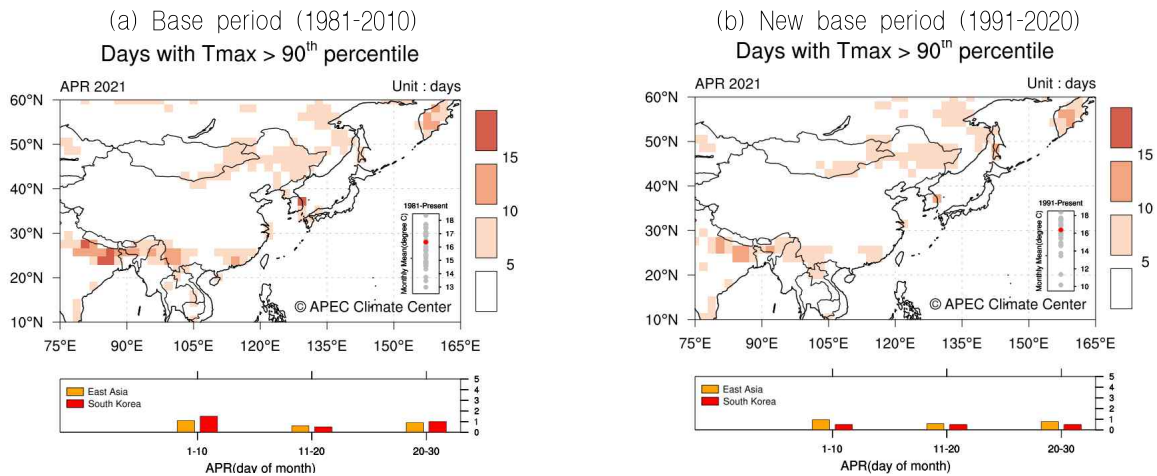


Figure 147. Monthly extreme climate monitoring map(2021/04) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

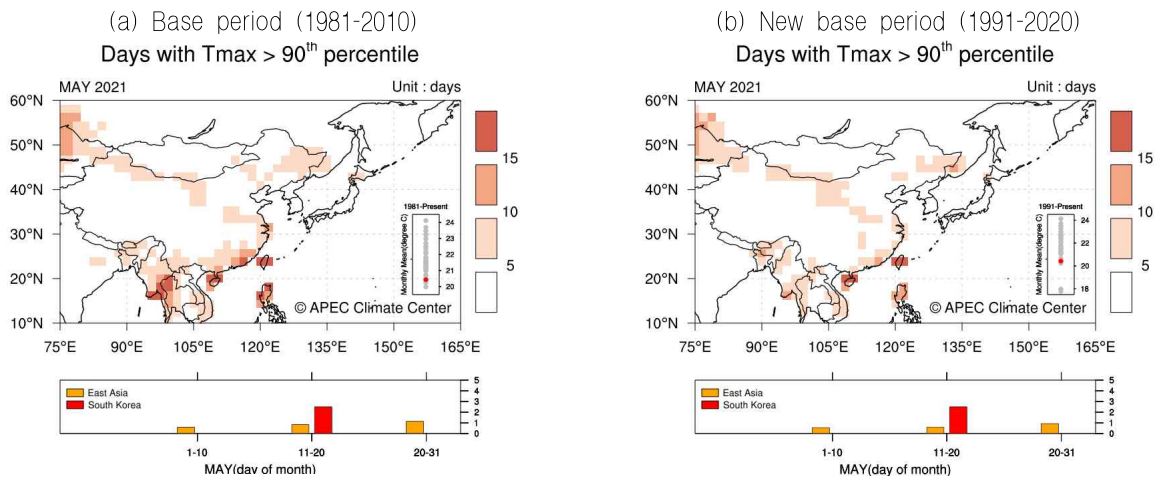


Figure 148. Monthly extreme climate monitoring map(2021/05) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

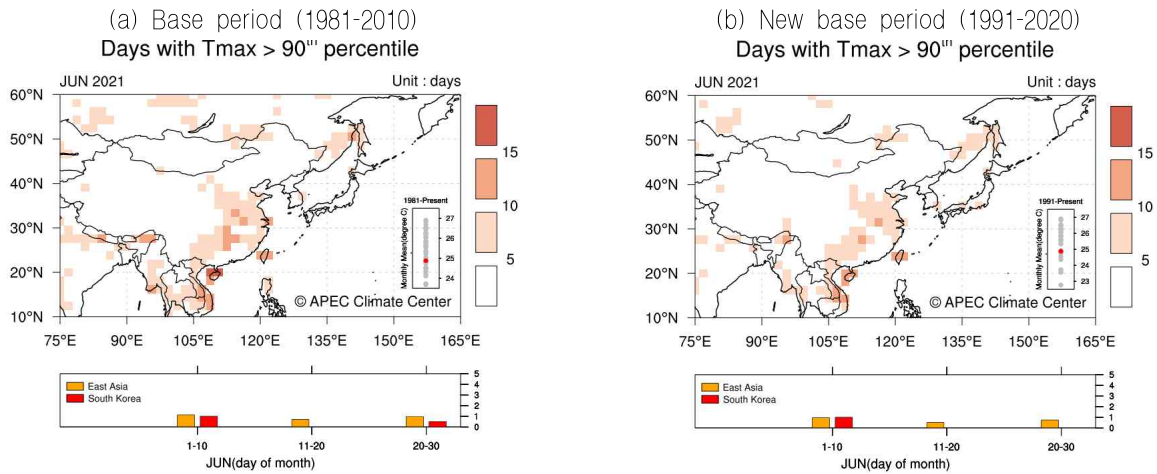


Figure 149. Monthly extreme climate monitoring map(2021/06) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

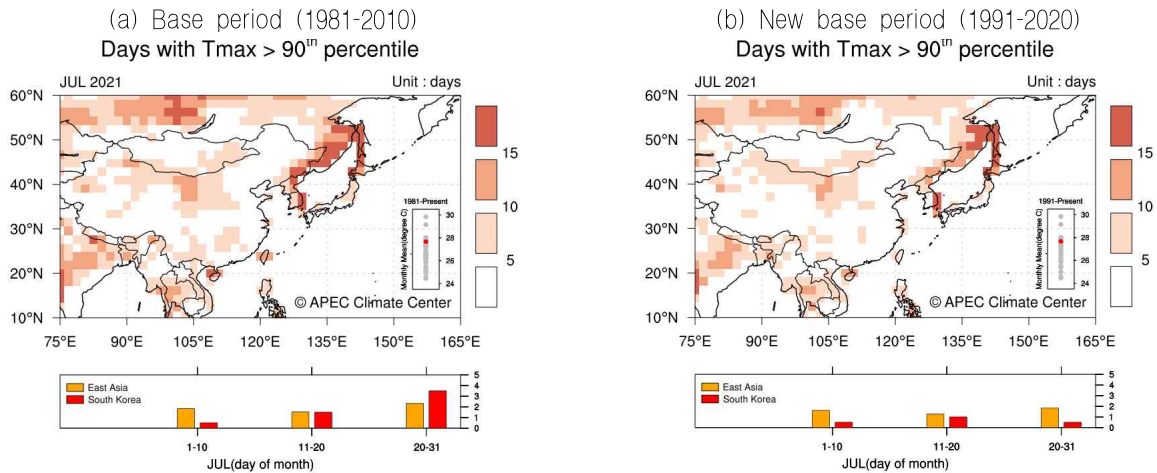


Figure 150. Monthly extreme climate monitoring map(2021/07) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

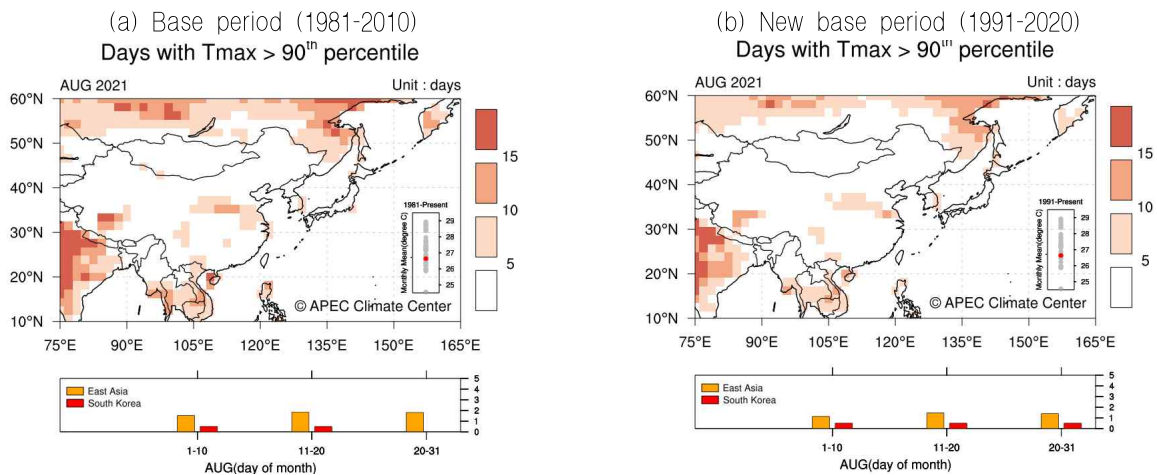


Figure 151. Monthly extreme climate monitoring map(2021/08) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

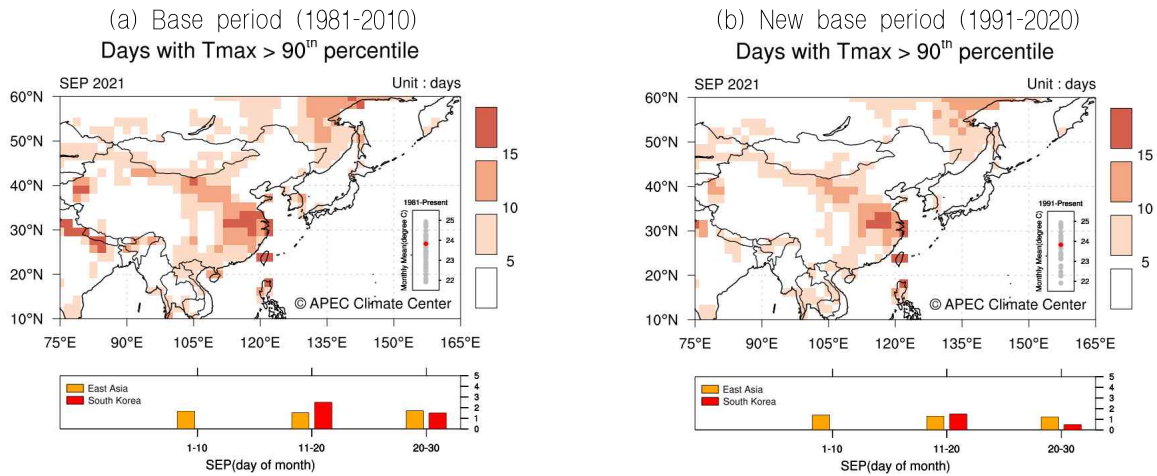


Figure 152. Monthly extreme climate monitoring map(2021/09) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

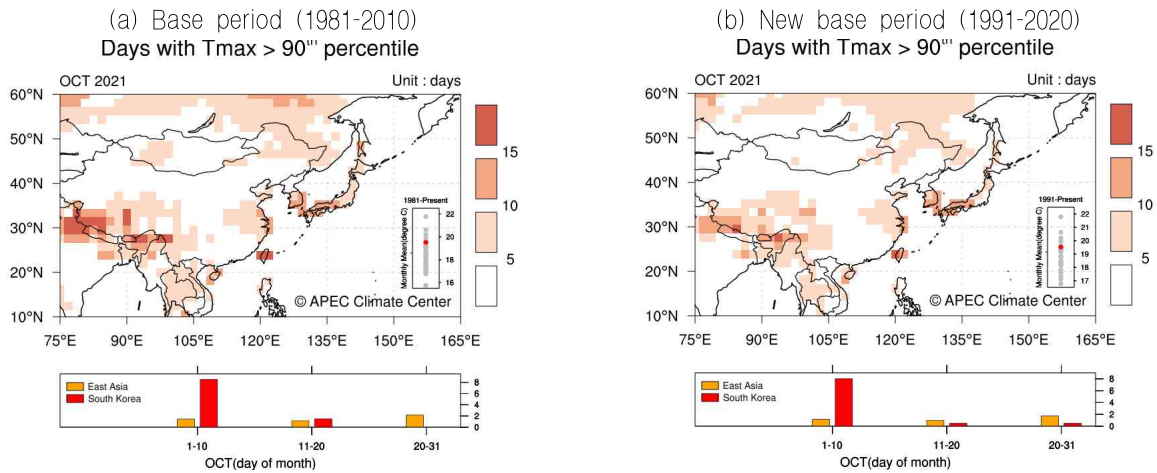


Figure 153. Monthly extreme climate monitoring map(2021/10) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

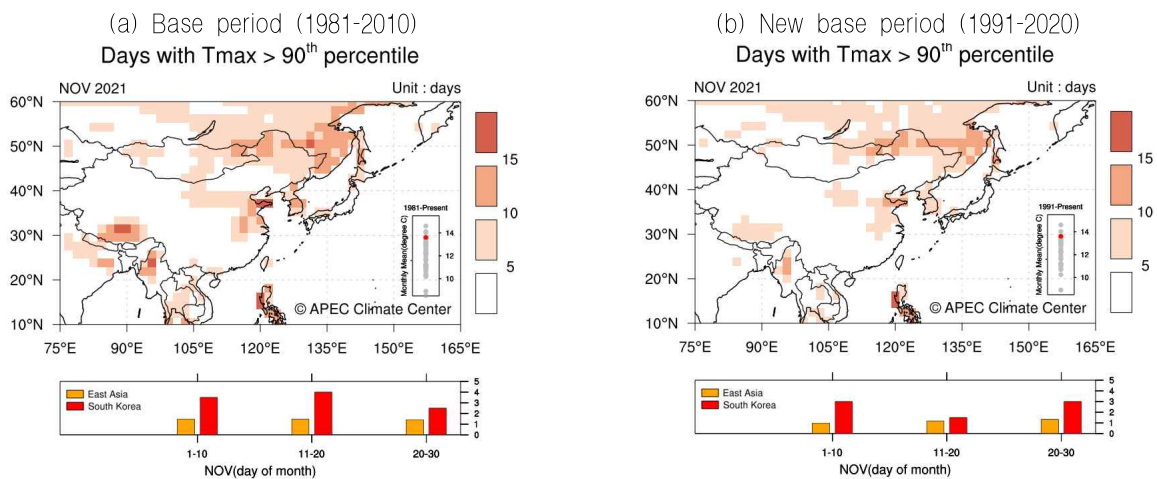


Figure 154. Monthly extreme climate monitoring map(2021/11) for daily maximum temperature above 90th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

Figure 155부터 165까지는 이상저온 발생일수 감시정보를 구 평년과 신 평년에 대해 각각 나타낸 것이다. 평년 변화에 따른 이상저온 감시정보의 차이는 이상고온 감시정보의 차이보다 크게 두드러지지 않는 것 같다. 공간적으로 약간의 변동이 보이기는 하지만, 그 차이는 이상고온에서 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

1월 하순, 6월 중순, 9월 초순, 10월 하순에는 오히려 신 평년 기간에서 한반도 지역의 이상저온 발생일수가 늘어난 것을 알 수 있다. 1월 중순, 6월 하순에는 한반도 지역의 이상저온 발생일수가 줄어든 것을 알 수 있다.

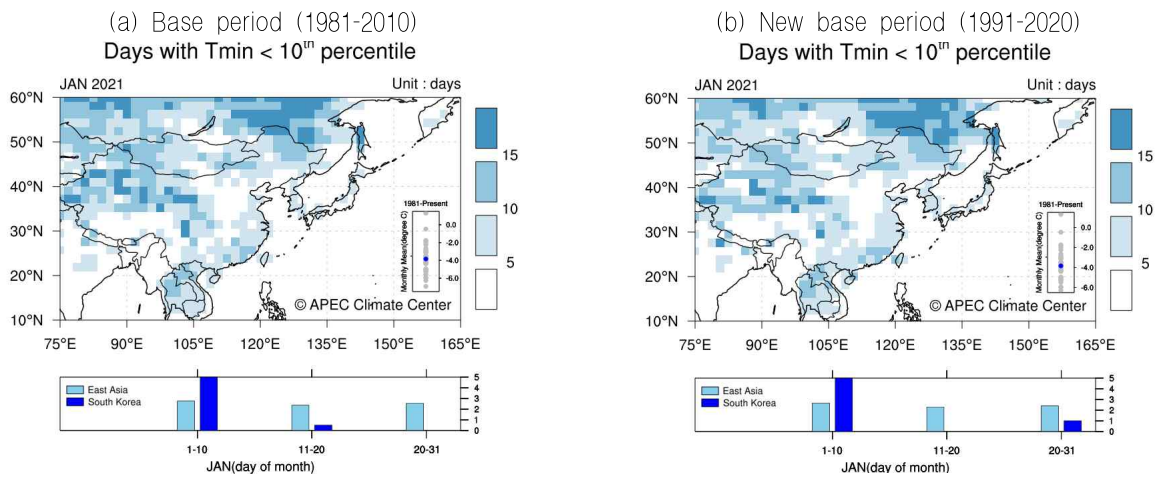


Figure 155. Monthly extreme climate monitoring map(2021/01) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

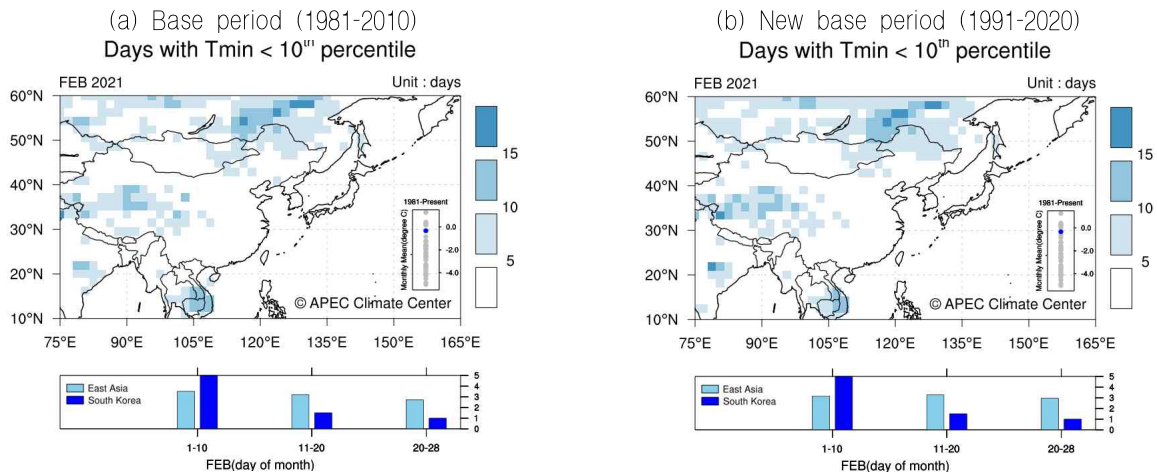


Figure 156. Monthly extreme climate monitoring map(2021/02) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

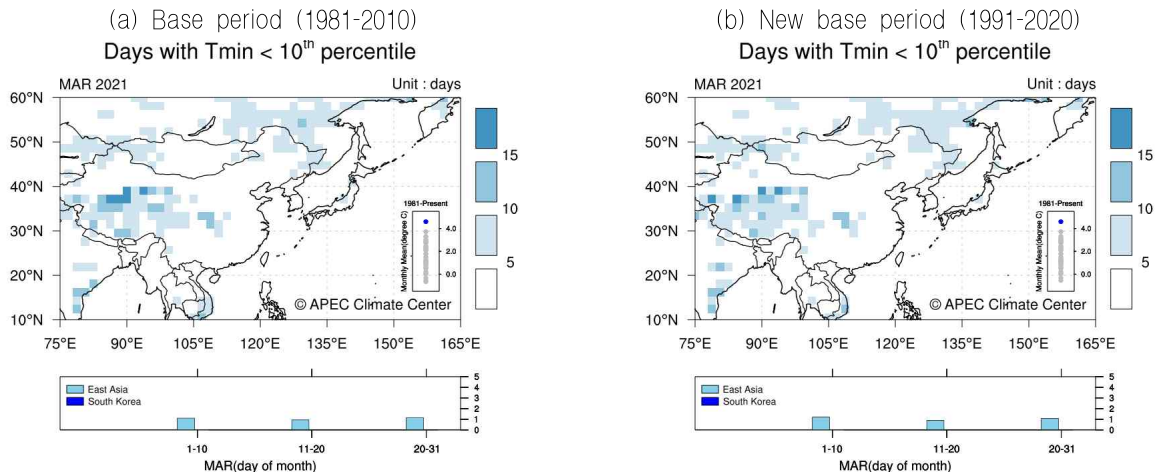


Figure 157. Monthly extreme climate monitoring map(2021/03) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

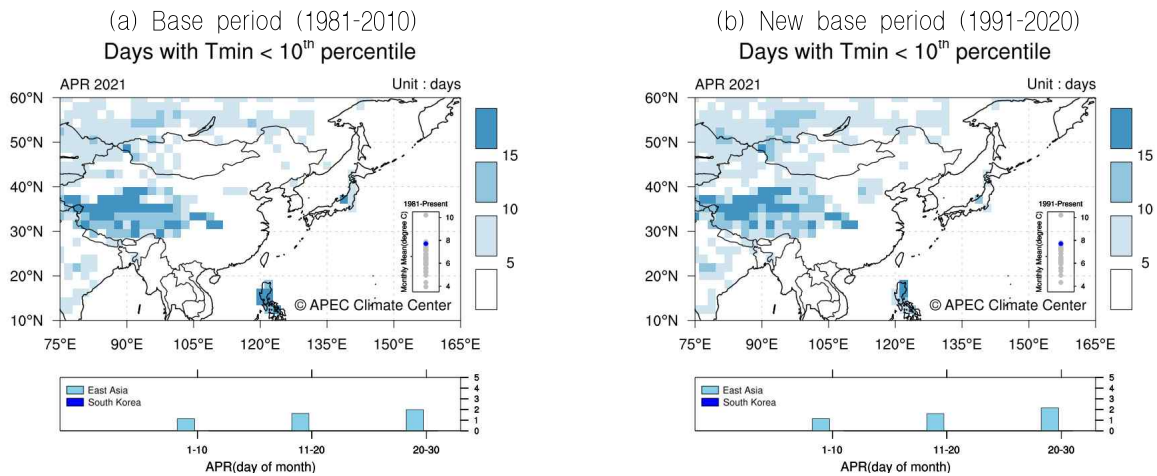


Figure 158. Monthly extreme climate monitoring map(2021/04) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

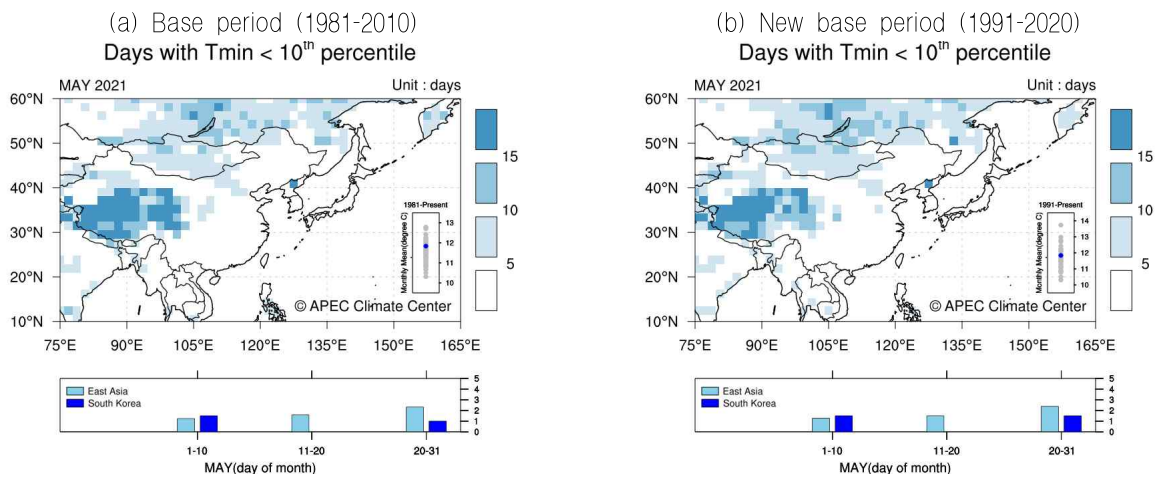


Figure 159. Monthly extreme climate monitoring map(2021/05) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

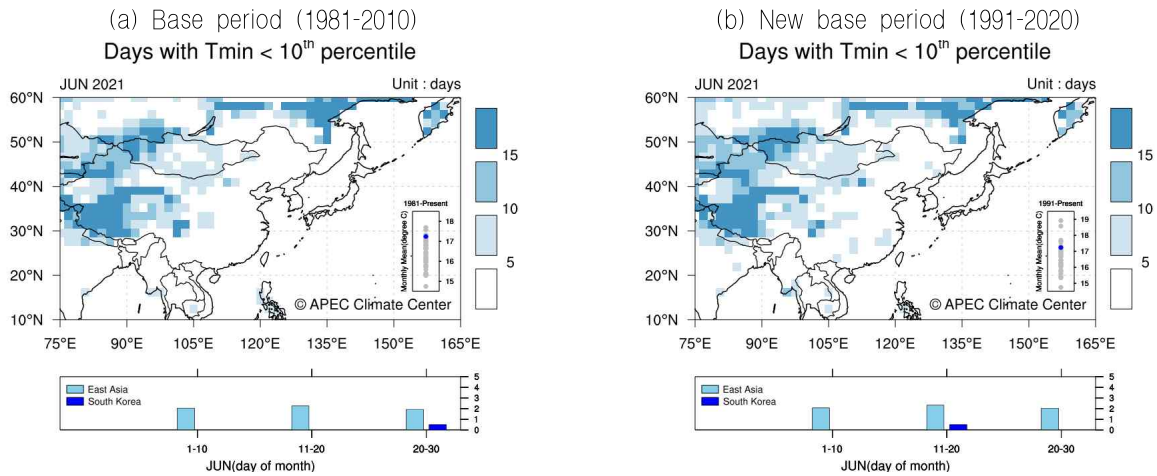


Figure 160. Monthly extreme climate monitoring map(2021/06) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

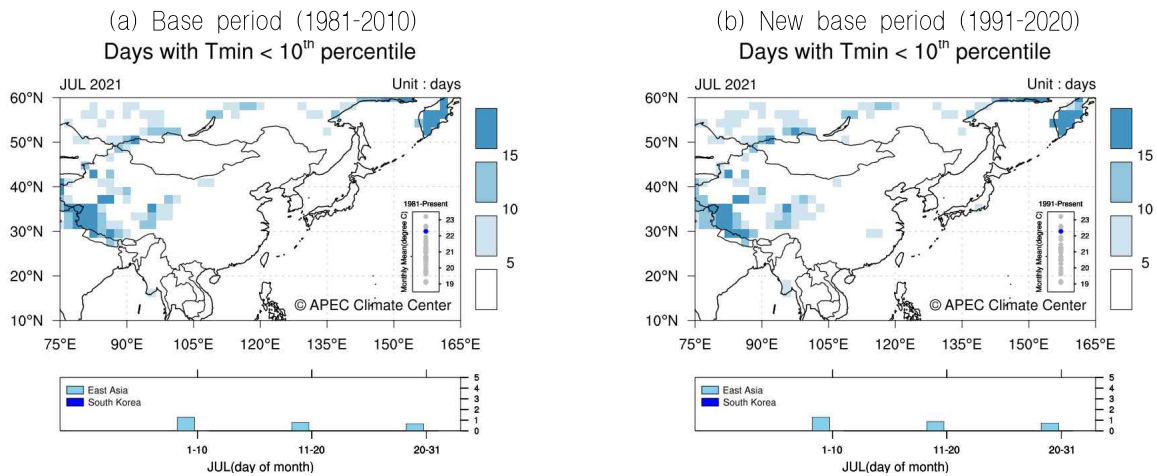


Figure 161. Monthly extreme climate monitoring map(2021/07) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

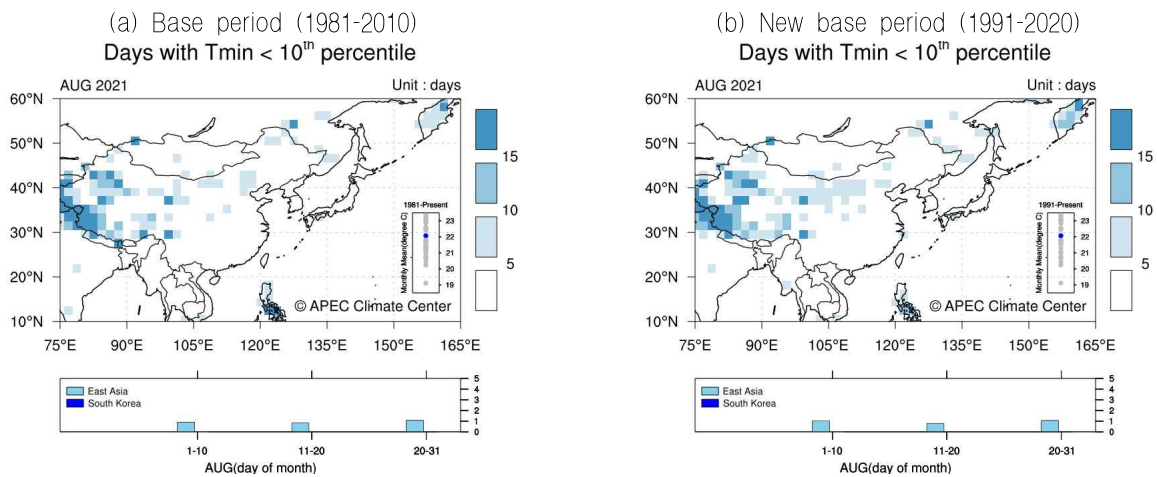


Figure 162. Monthly extreme climate monitoring map(2021/08) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

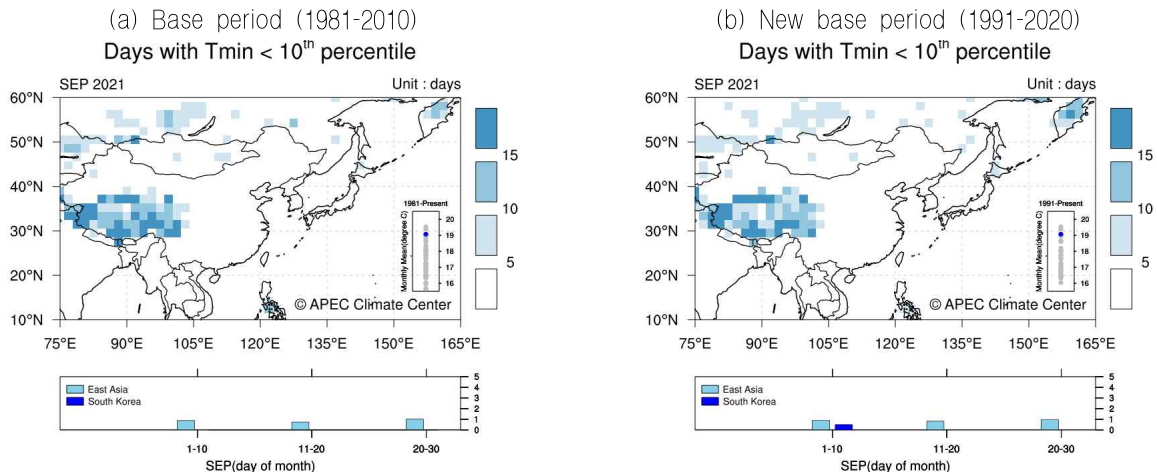


Figure 163. Monthly extreme climate monitoring map(2021/09) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

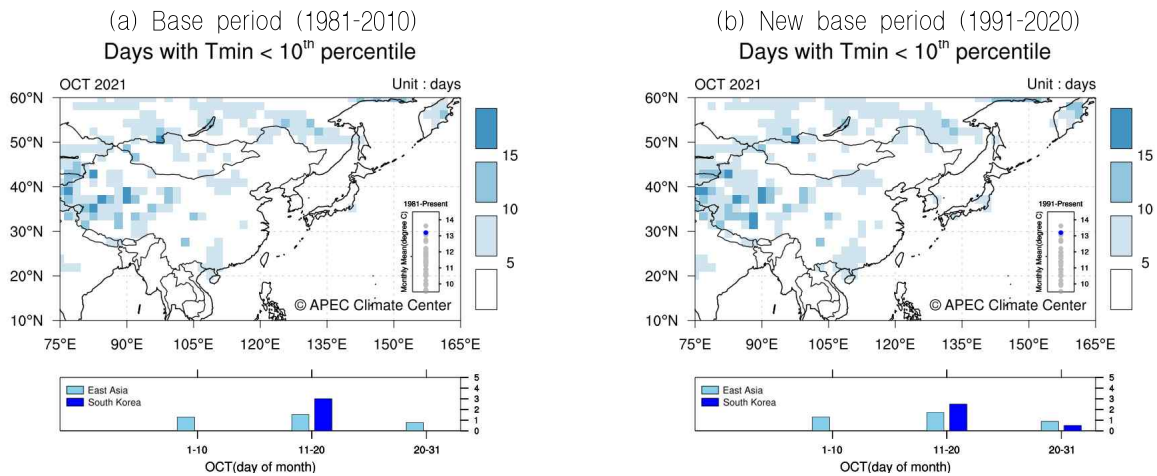


Figure 164. Monthly extreme climate monitoring map(2021/10) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

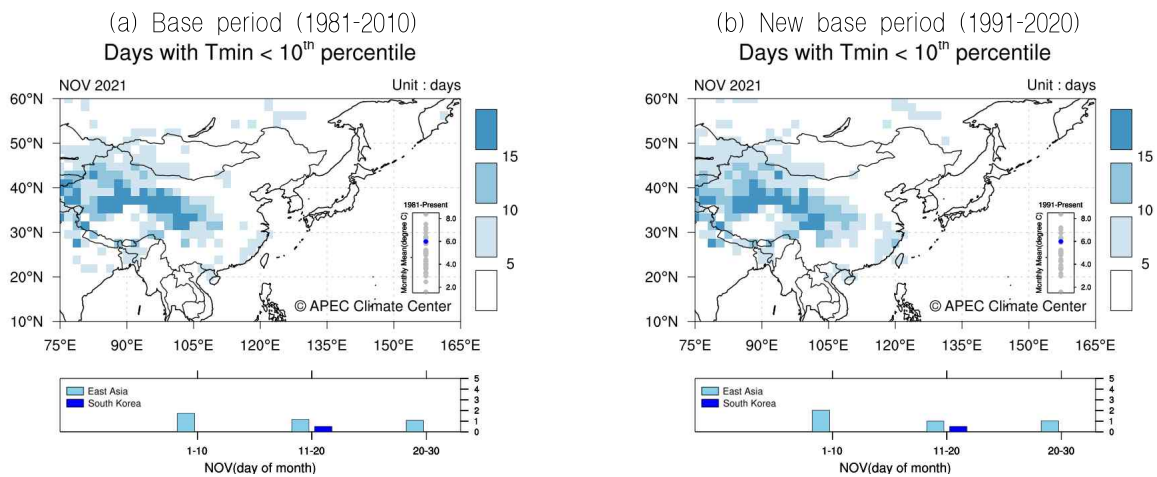


Figure 165. Monthly extreme climate monitoring map(2021/11) for daily minimum temperature below 10th percentile using (a) Base period(1981-2010) and (b) New base period (1991-2020).

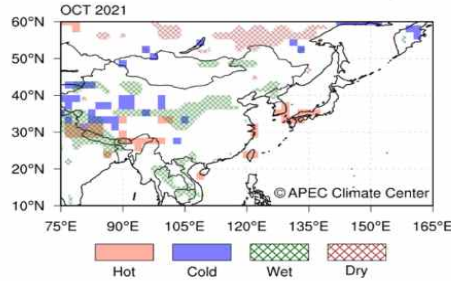
(다) 개선된 동아시아 이상기후 감시정보 웹 서비스

동아시아 이상기후 감시 : 2021년 10월

2021년 11월 12일 발표

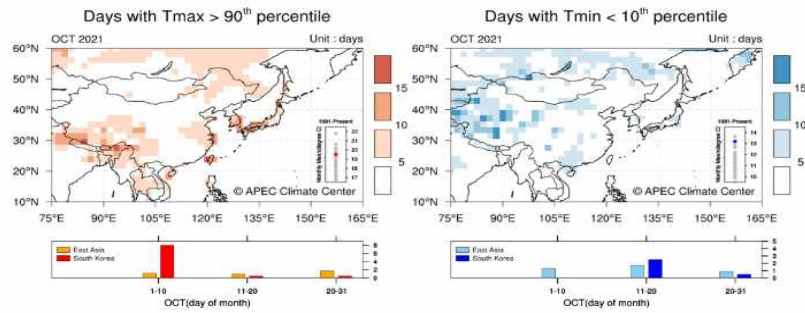
동아시아 이상기후 통합정보

East Asia Extreme Climate Map



- Hot : 이상고온 발생일수가 10일 이상인 지역을 적색으로 표시
- Cold : 이상저온 발생일수가 10일 이상인 지역을 푸른색으로 표시
- Wet : SPI1 지수 1.3 이상인 지역으로 습윤한 지역을 녹색 빗금으로 표시
- Dry : SPI1 지수 -1.3 이하(가뭄이 severe보다 강함)인 지역으로 건조한 지역을 갈색 빗금으로 표시

월간 이상고온 및 이상저온 발생일수



최대강수 사상 재현기간 및 동아시아 가뭄 통합정보

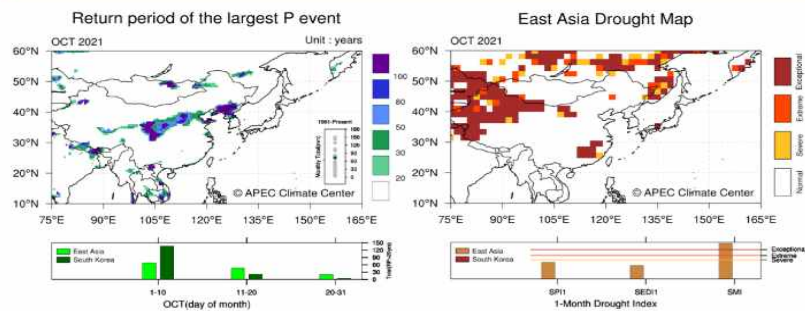


Figure 166. East Asia Extreme Monitoring in APCC web page for October, 2021.

신 평년 과거기간 자료를 적용하여 새롭게 계산한 이상기후 감시기준을 반영한 이상기후 감시정보 웹서비스를 재개하였으며, 홈페이지 내 표출 화면은 Figure 166와 같다.

(5) 요약과 결론

2019년도에 개발되어 현재까지 APCC 홈페이지 내에서 현업으로 운영되고 있는 동아시아 이상기후 모니터링 시스템은 매월 준수시간 이상기후 감시정보를 한 눈에 볼 수 있도록 웹서비스를 실시하고 있다. 다양한 변수들을 이용하여, 지난 달의 월별 및 순별 이상기후 발생 현황과 함께 과거 자료 30년 대비 현재의 순위도 대략적으로 확인할 수 있기 때문에, 더욱 빠르게 이상기후 통합 정보를 손쉽게 만나볼 수 있도록 시스템을 구축하였다.

개발 3차년도인 2021년도에는 기존에 사용하던 구 평년 기간 자료가 아닌 신 평년 자료를 이용하여, 새로운 이상기후 감시정보의 감시 기준을 계산 후 선정하였으며, 구 평년 대비 신 평년에서 바뀐 점을 동아시아 지역에 대해 월별로 비교하였다.

먼저 이상고온의 감시 기준이 되는 일 최고 기온의 90백분위 값, 이상저온의 감시 기준이 되는 일 최저기온의 10백분위 값에 대해서 두 기간의 차이를 비교했을 때, 공통적으로 히말라야 산맥 인근에서 뚜렷한 고온 현상이 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 일 최고 기온은 월마다 편차는 있지만 러시아 남부지역에서 강한 온난화 시그널을 보였고, 일 최저 기온은 온도가 강하게 하강하는 지역도 월별로 뚜렷하게 나타났다.

이렇게 두 평년 사이에서 발생하는 변화 때문에, 신 평년 기간을 적용함으로써 이상기후 발생일수 또한 변화가 나타났는데, 이상저온보다는 이상고온 발생일수에서 그 변화가 더욱 뚜렷하였다. 신 평년 기간에서 일 최고 기온의 온난화 시그널이 뚜렷해짐에 따라, 구 평년 기간에서는 이상고온 발생지역이었던 부분들이 신 평년 기간에는 이상고온으로 탐지되지 않았기 때문이다. 이상저온 또한 평년 기간 변화에 따라 약간의 차이들을 나타내었지만, 이상고온만큼 크고 뚜렷한 차이는 보이지 못했다. 구 평년과 신 평년의 공간패턴 차이를 이해함으로써, 새롭게 바뀐 평년에 따른 이상기후 감시정보를 해석하는 데에 더욱 도움이 되고자 하였다.

5. 요약 및 결론

이 과제는 5단계(2019-2021년) 아태 기후 정보 서비스 및 연구 개발 사업의 이상기후 감시, 분석 및 예측을 주제로 국민이 체감할 수 있는 이상 기후 장기 예보 서비스 개선에 기여를 목표로 3년 동안 진행되었다. 첫 번째 연차(2019년)에서 시의성 있는 이상기후 정보 제공을 위해서 여러 연구가 수행되었다. 먼저 이상기후 감시기법 및 이상기후에 대한 원인을 신속하게 분석하고 제공하기 위한 기법들을 개발하였다. 즉, 이상기후를 감시하기 위해서는 이상기후 현상을 잘 나타내는 지수를 활용하게 되는데, 세계적으로 널리 사용하고 있는 (WMO에서 제안하는) 기온과 강수를 기반으로 한 지수뿐만 아니라 대기와 지면이 서로 주고받는 작용이 이상기후 현상에 영향을 주기 때문에 토양수분, 지표 증발산량을 활용하여 전 세계 폭염이나 가뭄과 같은 이상기후를 감시하는 기법을 개발하였다. 아울러 최근 주목을 받고 있는 소셜네트워킹서비스(SNS) 자료에 텍스트 마이닝과 기계학습 기법을 적용하여 일반 사람들이 반응하는 이상기후에 대한 영향을 알아보는 기법을 개발하였다. 개발된 감시 기법들을 통해 생산된 이상기후 감시정보를 제공하기 위해서 웹기반 감시 정보 서비스를 구축하였다. 아울러 시의성 있는 이상기후 원인 정보 제공을 위해서 대기나 해양의 상태와 우리나라 이상기후와의 상관관계 및 조성분 분석을 적용하여 이상기후에 대한 원인을 효율적으로 분석하는 기법을 개발하여 신속하게 대응할 수 있는 토대를 마련하였다. 개발된 이상기후 원인 분석 방법은 2019년 발생한 이상기후에 대한 원인 분석에 적용되어 활용되었다.

두 번째 연차(2020년)에서는 우리나라 이상기후 장기 전망 정보 개선을 위해서 혹서기 감시 정보 및 원인 분석서 생산, 1-3개월 예측 콘텐츠 개발을 목표로 하여 연구가 수행되었다. 준 실시간으로 이상기후 감시 정보 제공을 위해서 2019년에 구축되어 운영되고 있는 동아시아 이상기후 감시 정보 웹 서비스 개선을 위해서 이상기후 정보 콘텐츠를 확대하고 전달력 강화 및 이해도를 높이고자 그래픽 품질 개선이 이루어졌다. 폭염 같은 이상 기후 발생 전망에서 감시 인자들의 활용성을 높이기 위해서 감시인자의 우리나라 이상기후 영향에 대한 주요 상세 기작을 고려할 수 있는 감시 인자 검증 시스템을 구축하였다. 2020년 여름철 한반도 이상 기후 발생 예측을 위해서 구축된 검증 시스템을 활용하였으며, 감시 인자의 예측성을 개선할 수 있다는 결론을 얻었다. 아울러 우리나라 여름철 폭염을 예측하기 위해서 봄철 원격 상관 지수 등의 관련된 기작들을 분석하여 새로운 예측 인자로 제시하였다. 이상기후 계절 예측 정보 확대를 위해서 과거 유사해 추출 방법과 기계학습 방법을 이용하여 통계 모델들을 구축하였으며 전국 및 지역별 혹서기 이상 기후 1-3개월 확률 전망정보를 생산하였다. 구축된 통계 모델들의 이상기후 지수 예측 성능이 상당히 우수함을 확인하였으며, 이상기후 전망정보를 시각적, 효과적으로 나타낼 수 있는 방안 또한 제시하였다. 그리고 기상청 현업모델의 이상기후 예측 정보의 신뢰도 및 활용성을 높이기 위해서 여러 가지 방안들을 제시하였다. 1개월 이상기후 확률 예측 전망 정보의 예측성 향상을 위해서 예측 오류들을 보정하는 편의 보정 방법을 개발하였으며, 최고 기온 등의 이상 기후 지수 예측에서 보정효과가 있음을 확인하였다. 그리고 3개월 계절 예측에서 3분위/5분위 이상 기후 확률전망 정보 생산을 위해서 예측성이 확보 될 수 있는 분위 기준값을 제시하였다. 또한 2020년 우리나라 기록적인 이상 기온과 강수 발생에 대한 감시, 원인, 예측 사후 분석이 통합되어 있는 원인 분석서를 작성하였으며, 관측에서 감시 인자 설정 및 예측 모델의 예측 오류를 확인하고, 개선에 도움을 줄 수 있도록 하였다.

3차년도(2021년)에는 APCC의 기후 감시와 분석 체계를 구축하여 기후 분석 관련 현업 장
기예보 및 이상기후 이슈에 대응 역량을 강화하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

먼저 인도양의 해양-대기 변동성이 우리나라 기후 변동성에 미치는 영향을 계절별로 살펴
보았다. 봄철 인도양 대류 활동의 우리나라 기온 및 강수 변동에 대한 영향을 분석하기 위해
SVD 주성분 분석을 적용하였다. 3-4월은 1-2개월 선행 시간에서 남인도양 해수면 온도 상승에
의한 강수 발생 및 대류 강화로 인한 보상작용과 관계가 있는 벵갈만 지역에서 대류 억제 신
호로부터 대기 파동 전파를 통해 우리나라에 고온, 다습한 특성이 나타난다. 특히 강한 엘니뇨
발달 뒤에 남인도양의 해수면 온도 상승이 있었으며, 4월 우리나라 기온은 평년보다 높았고,
강한 라니냐 뒤에 봄철 남인도양 해수면 온도 하강이 있었고, 한반도 주변 저기압성 순환의 좌
측으로 저온 건조한 북풍의 유입으로 강수가 평년 보다 적은 경향이 있었다. 5월에는 아라비아
해 지역에서 대류 강화 신호로부터 대기 파동이 전파되어 한반도 고온, 다습한 특성이 나타나
는데, 아라비아해 지역에서 대류 강화 신호에 대한 1-2개월 선행인자로서 이 지역에서 해수면
온도 편차를 활용할 수 있음을 확인하였다. 여름철의 경우는 인도양 축전지이론을 기반으로
1950년 이후 해들을 분류하여 합성장 분석을 수행하였다. 엘니뇨가 쇠퇴하는 봄철 인도양 해수
면 온도가 상승할 때, 북서 태평양 고기압성 순환 편차가 여름철에 다시 강화되어 8월까지 유
지 되었으며, 우리나라가 남서풍의 영향을 받게 하였다. 반면에 라니냐가 쇠퇴하는 봄철 인도
양 해수면 온도가 하강할 때 북서 태평양 저기압 발달 전개 과정에서 비선형성이 존재하였다.
즉 약한 저기압성 순환 편차가 7월까지 유지 되었으며, 우리나라는 동풍 혹은 남동풍의 영향을
받게 하였다. 엘니뇨 발달 이후 7월의 기온은 평년보다 비슷하거나 낮은 경향, 강수는 평년 보
다 많은 경향이 우세하였다. 라니냐의 경우, 6-7월 기온은 평년 보다 낮은 경향, 강수는 6월에
평년 보다 많은 경향을 보였다. 여기서 여름철 열대 대서양 해수면 온도 편차 상황을 고려하
면, 라니냐 발달 이후 봄철 인도양 해수면 온도 하강과 여름철 열대 대서양 해수면 온도 상승
이 있을 때 북서 태평양에서 저기압성 순환 편차 발달이 8월 까지 유지되었다. 한반도 6-7월
기온은 평년보다 낮은 경향을 보였고, 열대 대서양 해수면 온도 상승과 관련한 서태평양 아열
대 고기압 편차가 북서 태평양에서 저기압성 순환 편차를 북편으로 이동시켜서, 한반도가 건조
한 북동풍의 영향을 받게 되어 강수가 평년과 비슷하거나 평년보다 적었다. 엘니뇨 발달 이후
봄철 인도양 해수면 온도 상승과 여름철 대서양 해수면 온도 상승이 있을 때 북서 태평양 고
기압이 더 강화되었다.

우리나라 가을철 고온 현상에 영향을 미치는 인도양의 대류 특성을 k-mean clustering 분
석을 통해 분류하였다. 첫 번째 cluster는 동인도양 대류 억제, 아열대 서태평양 대류 강화 신
호로 이는 MJO의 위상 5와 관련된 대류 구조이다. 이 대류 구조로 인해 아열대 서태평양 지역
하층에서 저기압성 순환, 동아시아로 파동 전파를 통해 고기압성 순환이 형성되어 가을철 고온
현상이 나타나게 된다. 두 번째 cluster는 동인도양부터 북인도양까지 대류가 강화된 특징으로
이 때 라니냐 특성이 유의하게 나타났다. 특히 북인도양의 대류 강화로 인한 열적 forcing으로
부터 유라시아 대륙을 가로지르는 CGT와 유사한 대기 파동 구조가 더욱 강화되어 동아시아로
고기압성 순환이 형성되어 고온이 유도된다. 마지막 cluster는 서인도양에서 대류 강화 동인도
양에서 대류가 억제되는 전형적인 양의 IOD와 엘니뇨의 반응으로, 서태평양 지역의 대류 억제
신호로부터 동아시아로 파동이 전파되어 고온이 유도되는 특징을 확인하였다. 다음으로 겨울

철, 특히 12월의 인도양 변동성과 관련된 우리나라 기후 특성을 분석하였다. 인도양의 열적 강제력으로부터 유도된 아열대 유라시아 대륙 상층의 기압계 패턴을 EOF 분석을 통해 두 가지 모드로 나누어 살펴보았다. 첫 번째 모드는 아열대 유라시아 대륙에서 동-서 방향으로 발달한 저(고)기압성 순환으로 이는 북인도양의 대류 억제(강화)로부터 local Hadley circulation이 유도되어 발달한 대기 패턴이다. 특히 고기압성 순환이 발달할 때 라니냐 패턴이 저기압성 순환의 엘니뇨 패턴보다 뚜렷하게 나타나는 특징이 있으며, 라니냐 시기에 아열대 상층 고기압성 순환이 차가운 대륙 고기압의 남하를 막아주는 역할을 하여 우리나라 12월 기온이 평년과 비슷한 특징을 보인다. 두 번째 모드는 아라비아 반도-인도차이나-동아시아로 상층 대기 파동이 전파되는 모드로, 이는 동인도양의 대류와 북대서양 해수면 온도로부터 유도된 East Atlantic-West Russia 패턴의 복합 영향으로 형성된 것으로 분석된다. 이 경우 고(저)기압성 순환의 중심이 우리나라에 위치하면서 우리나라 12월 기온과 0.7의 높은 상관계수를 나타낸다.

여름철 수시(4월) 기온 및 강수 예측을 위해 3월 이후 값을 사용하는 인자들의 경우, 3월 값으로 대체하여 예측성을 테스트한 결과 SST 기반 인자들의 경우 기존의 예측성과 크게 다르지 않았다. 이는 인자의 시점 앞당김을 통해 많은 예측인자를 수시 예측에도 사용할 수 있음을 의미한다. 한편 다수의 예측인자를 확보한다 하여도 예측 시점과 타겟 시점이 3-5개월 정도 차이 나기 때문에 예측 인자 대부분의 예측성(ACC)은 50%를 초과하지 못하는 등의 한계가 존재한다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 예측 인자가 한반도 기온에 영향을 미치는 상세적인 기작을 이해하고 이러한 상세 기작이 예측 시점에 잘 구현되고 있는지를 분별하는 상세기작 유사성 예측법을 개발하고 검증하였다. 상세기작 유사성 예측법은 1) 예측 인자와 lead/lag를 고려한 대기 변수(e.g, OMG500)와의 지점별 상관관계(과거 33년, 1981-2013)를 예측 인자가 한반도 주변 대기에 미치는 영향으로 규정하고 2) 예측하고자 하는 월의 대기 변수의 편차장(지점별)을 계산한 후, 3) 1)과 2)의 공간적 유사성을 중요 타겟 지역에 대해 패턴상관 계수(Pattern Correlation Coefficient, PCC)로 계산하여 기작의 유사성을 정량화 하는 방법이다. 이러한 방법을 적용하여 인자의 편차만을 고려한 예측보다 상세기작의 유사성을 함께 고려하는 경우 예측성이 향상되었는데 PE_DJF의 경우 42%에서 62%로 20%의 상승을 보였다. 또한 다양한 고도화를 시도하였는데 기온의 경우 장기추세를 제거할 시에 평년 이하의 기온(BN)에 대한 예측력이 상승하며 예측 인자의 영향을 상관관계가 아닌 합성장을 이용하여 구할 경우 일부 인자의 예측력이 상승하였다. 또한 PCC계산 지역의 최적화를 시도하였는데 PE_DJF 인자의 경우 겨울~봄철 동아시아 지역보다 인도/서태평양 지역의 공간적 대류 구조가 중요함을 밝힌 후 그 지역에 대해 PCC를 이용할 경우 예측성은 유지되면서 효율적인 봄철 상세기작 모니터링이 가능해짐을 확인하였다. 이러한 상세기작 유사성 예측법을 적용하여 2021년 7월 고온 예측에 성공할 수 있었다. 상세기작 유사성 예측법에서 산출된 PCC 값은 예측(1-3월의 PCC)뿐만 아니라 예측 이후의 모니터링(4월부터 타겟 월 직전까지의 PCC), 그리고 사후 분석(타겟 월의 PCC)에도 이용할 수 있어 일관성 있는 예측, 감시, 사후분석을 가능하게 한다. 상세기작 유사성 예측법을 강수 예측인자에 적용 시 기온 예측인자의 경우에 비해 예측성이 상대적으로 낮아 그 효용이 제한적이기는 하지만 BN의 경우 AN의 경우보다 예측성이 높아 예측에 참고할 수 있을 것으로 보인다.

겨울철 수시(10월) 기후전망을 위한 선행 예측 인자 분석에서는 겨울철 각 월별 특성을 반영한 분류 기준을 선정해 분류하고 가을철 선행해서 나타나는 특징을 분석해 예측인자로 제

시하였다. 12월은 ENSO 위상별 기온 경향에 따른 선행 특징을 분석했는데, 엘니뇨 해는 인도양 해수면온도, 라니냐 해는 열대 동인도양~서태평양 대류활동과 북극 해빙, 중립 해는 열대 태평양과 북대서양의 해수면온도와 북극 해빙에서 가을철 특징을 찾을 수 있었고 각 ENSO 위상 별로 감시 예측 인자를 제시하였다. 12월은 같은 기온 경향을 보였어도 ENSO 위상에 따라 우리나라에 영향을 줄 수 있는 주요한 인자에 차이가 있었기 때문에 ENSO 상태에 따라 감시 예측 인자를 다르게 적용하면 효율적인 모니터링과 예측성 향상에 도움이 될 것으로 보인다. 1월은 같은 기온 경향을 보였어도 개별 해의 순환장 특징이 다양하게 나타났기 때문에 우리나라 기온과 관련해 주요하게 나타나는 순환장 구조를 찾고 그와 관련된 가을철 선행 특징을 분석했다. 1월 기온이 낮았을 때 특징으로 가을철 바렌츠-카라해 지역 해빙 적은 경향과 연직으로 발달한 고온 편차, 여름철 북대서양 tripole 형태의 해수면온도, 라니냐와 유사한 열대 해수면온도와 대류활동이 있었고 이를 감시 예측 인자로 제시하였다. 2월은 기온의 장기 변화가 크게 나타났던 달로 1990년대 후반을 기준으로 나누어 분석했다. 2월 기온과 관련된 전후반의 차이는 열대 태평양과 북태평양에서 나타났고 대양의 장주기 변동성의 영향으로 차이가 나타난 것으로 보인다. 후반기 2월 기온 낮았을 때의 가을철 선행 특징을 분석해 바렌츠해 북부 해빙과 연직으로 발달한 바렌츠해 주변 고온편차-캐나다 북쪽 저온 편차, 라니냐와 유사한 열대 해수면온도를 감시 예측인자로 제시하였다. 겨울철 세 달에서 북극 해빙이 예측인자로 공통적으로 제시되었는데 해빙의 경우 단독으로 예측 인자로 활용하기 보단 북극 기온이 연직으로 깊게 발달했는지를 함께 고려해서 판단할 필요가 있었다.

기후감시분석시스템은 이상기후에 대한 빠른 원인분석과 대처를 위해 기후분석 연구자를 보조하는 시스템으로 관측 자료 및 재분석 자료를 통해 다양한 원인분석이 가능하도록 구현된 서비스다. 시스템 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 수집을 후 표준화(Climatic 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 지도기반 서비스는 사용자가 원하는 지역, 컬러맵, 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. 이러한 서비스는 웹 브라우저를 통해 특정 소프트웨어 없이 구동할 수 있도록 MVC(Model-View-Controller) 기반의 웹 프레임 워크를 구축하여 통신에 따른 지연을 최소화하도록 구성하였다. 사용자 인터페이스 개발은 다양한 웹 브라우저와 호환 가능해야 하고 사용자들에게 불편한 구성을 피하고자 사전에 Template를 구축하여 사용자의 의견을 반영하였다. APCC의 기후감시분석시스템은 사용자들의 의견을 충분히 반영하여 개발되었으며 이상기후 현상 발생 즉시, 빠른 원인분석 서비스를 제공하고 있다. 동아시아 이상기후 시스템은 2019년도에 개발되었으며, 다양한 개선을 통해 현재 현업으로 APCC 홈페이지 내에서 운영 중인 시스템이다. 최신 기후 트렌드를 반영하고, 더욱 체감에 가까운 이상기후 감시정보를 제공하고자 평년을 최근 30년으로 변경하여 적용하였다. 신 평년과 구 평년의 차이는 이상기후 감시 기준과

이상기후 발생일수에 대해 월별로 계산되어 동아시아와 한반도 지역에 대해, 평년 변화에 따른 차이가 어떻게 다른지 비교 분석하였다. 일 최고 기온 자료를 이용한 90백분위와 10백분위 값 비교 분석에서는 전체적으로 온난화 시그널이 뚜렷하게 나타났지만, 일 최저 기온 자료를 이용한 90백분위와 10백분위 값 비교 분석에서는 오히려 신 평년 기간 동안 기온이 뚜렷하게 하강한 특징을 보이는 월이 있다는 것을 알게 되었다. 평년 기간을 최신 기후 자료로 바꿈으로써, 백분위 값이 변하고, 백분위 값이 변함에 따라 이상기후 감시정보 또한 변화하는 것을 매 월, 동아시아와 한반도에 대해 비교 분석하였다. 일 최고 기온의 90백분위 및 10백분위 값의 뚜렷한 온난화 시그널이 중국과 러시아 남부 지역에서 신 평년 기간동안 두드러지게 나타났고, 이러한 이상고온 감시기준을 이용하여 계산된 월별 이상고온 발생일수 분포 또한 온난화 시그널이 반영 되어 나타났다. 2021년 7월 하순이나 11월 중순 한반도에 발생한 이상고온이 구 평년보다 신 평년에서 현저히 적게 나타나는 특징을 보인다. 이상고온과는 달리 이상저온 감시기준 10백분위와 90백분위 값에서는, 온난화 시그널보다 기온이 낮아지는 지역들도 많이 나타나는 특징이 있었다. 이상기후 발생일수의 공간분포를 비교 해 보면 구 평년에서 신 평년으로 변화함에 있어서 차이가 도드라지게 나타나지 않았다. 평년 기간을 변동함으로써, 이상기후 발생일수 또는 공간 분포에는 월별로 차이가 발생하게 되었지만, 더욱 최신 기후 자료를 반영하여 계산하였기에 먼 과거 자료가 아닌 더욱 체감할 수 있는 이상기후 감시정보를 제공하는 데에 큰 의미를 둘 수 있다.

사사

이 연구는 APCC의 지원을 통해 수행 되었습니다. NCEP 재분석 자료와 CPC 강수자료는 NOAA/OAR/ESRL, Boulder, Colorado, USA 의 웹사이트 (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>) 로부터 제공되었습니다

References

- 손석우 등, 2020: 극/성층권/지면과정 변동 특성을 활용한 중위도 순환장 예측기술개발. 기상지진 See-At 기술개발연구 보고서
- 여새림, 임슬희, 이현주, 윤순조, 김가은, 박다인, 2020: 현업 장기예보 정확도 향상을 위한 기상청 지원체계 강화. APEC기후센터 연구보고서
- 예상욱 등, 2020: 대양간 상호작용 및 변동에 기인한 한반도 기후예측 기술개발. 기상지진 See-At 기술개발연구 보고서
- 우성호, 2016: 한반도 겨울철 기온 계절예측을 위한 기후인자 선정 및 통계 모델 개선. APCC 연구보고서, 2016-17, ISBN 979-11-5698-168-8
- 한보름, 임유나, 김혜진, 손석우, 2018: 한반도 겨울철 기온의 월별 통계 예측 모형 구축 및 검증. 대기, 28(2), 153-162. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.2.153>
- Alexander, M.A., I. Bladé, M. Newman, J.R. Lanzante, N. Lau, and J.D. Scott, 2002: The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate*, 15(16), 2205-2231. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2)
- Barnston, A. G., M. K. Tippett, M. L. L'Heureux, S. Li, and D. G. DeWitt, 2012: Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002-11: Is Our Capability Increasing? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 631-651. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00111.1>
- Black, E., M. Blackburn, G. Harrison, B. Hoskins, J. Methven, 2004: Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather* 59(8), 217-223. <https://doi.org/10.1256/wea.74.04>.
- Cai, W. et al. 2019: Pantropical climate interactions. *Science*, 363, eaav4236.
- Cai, W., P. Van Rensch, T. Cowan, and H. H. Hendon, 2011: Teleconnection pathways of ENSO and the IOD and the mechanisms for impacts on Australian rainfall. *Journal of Climate*, 24(15), 3910-3923. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4129.1>
- Chen, Z., R. Wu, and Z. Wang, 2019: Impacts of Summer North Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies on the East Asian Winter Monsoon Variability. *Journal of Climate*, 32, 6513-6532. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0061.1>
- Chiang, J. C. H., and D. J. Vimont, 2004: Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability. *Journal of Climate*, 17, 4143-4158.
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere

- summer. *Journal of Climate*, 18(17), 3483–3505. <https://doi.org/10.1175/JCLI3473.1>
- Dippe, T., J. F. Lubbecke, and R. J. Greatbatch, 2019: A comparison of the Atlantic and Pacific Bjerknes feedbacks: seasonality, symmetry, and stationarity. *Journal of Geophysical Research–Oceans*, 124, 2374–2403.
- Gill, A. E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 447–462.
- Graham, N. E., and T. P. Barnett, 1987: Sea surface temperature, surface wind divergence, and convection over tropical oceans. *Science*, 238, 657–659.
- Ham, Y. G., J. S. Kug, J. Y. Park, and F. F. Jin, 2013: Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events *Nat. Geosci.* 6, 112–116
- Ham, Y. G., J. Y. Choi, and J. S. Kug, 2017: The weakening of the ENSO–Indian Ocean dipole (IOD) coupling strength in recent decades. *Climate Dynamics*, 49(1), 249–261. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3339-5>
- He, S., X. Xu, T. Furevik, and Y. Gao, 2020: Eurasian cooling linked to the vertical distribution of Arctic warming. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087212. <https://doi.org/10.1029/2020GL087212>
- Hoskins, B.J., and D.J. Karoly, 1981: The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *Journal of Atmospheric Science*, 38(6), 1179–1196. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2981\)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2981)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2)
- 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, B., P.W. Thorne, V. F. Banzon, T. Boyer, G. Chepurin, J. H. Lawrimore, ... and H.M. Zhang, 2017: Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 30(20), 8179–8205. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1>
- Johnson, N. C., and S.-P. Xie, 2010: Changes in the sea surface temperature threshold for tropical convection. *Nature Geoscience*, 3, 842–845.
- Johnson, N.C., 2013: How many ENSO flavors can we distinguish? *Journal of Climate*, 26(13), 4816–4827. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00649.1>
- 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>
- Keenlyside, N. S., H. Ding, and M. Latif, 2013: Potential of equatorial Atlantic variability to enhance El Nino prediction. *Geophysical Research Letters*, 40, 2278-2283.
- Kim, B.M., S.W. Son, S.K. Min, J.H. Jeong, S.J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.H. Yoon, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.*, 5, 4646. <https://doi.org/10.1038/ncomms5646>
- Kim, J.S., and J.S. Kug, 2019: Role of off-equatorial SST in El Nino teleconnection to East Asia during El Niño decaying spring. *Climate Dynamics*, 52, 7293-7308. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3473-0>
- Klein, S. A., B. J. Soden, and N.-C. Lau, 1999: Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate*, 12, 917-932.
- Labe, Z., Y. Peings, and G. Magnúsdóttir, 2020: Warm Arctic, cold Siberia pattern: Role of full Arctic amplification versus sea ice loss alone. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088583. <https://doi.org/10.1029/2020GL088583>
- Li, S. L., 2004: Impact of northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during early winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 971-988. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2004.971>.
- 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
- Lim, W., and K. Seo, 2019: Physical-Statistical Model for Summer Extreme Temperature Events over South Korea. *Journal of Climate*, 32, 1725-1742.
- Lin, J. S., B. Wu, and T.J. Zhou, 2016: Is the interdecadal circumglobal teleconnection pattern excited by the Atlantic multidecadal Oscillation? *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(6), 451-457. <https://doi.org/10.1080/16742834.2016.1233800>
- Matsuno, T., 1966: Quasigeostrophic motions in the equatorial area. *Journal of Meteorological Society in Japan*, 44, 25-43.
- 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. *Environ. Res. Lett.* 16, p084014, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1134>.

- Okumura, Y. M., and C. Deser, 2010: Asymmetry in the duration of El Niño and La Niña, *Journal of Climate*, 23(21), 5826–5843.
- Polo, I., M. Martín-Rey, B. Rodríguez-Fonseca, F. Kucharski, and C. R. Mechoso, 2015: Processes in the Pacific La Niña onset triggered by the Atlantic Niño. *Climate Dynamics*, 44, 115–131.
- 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)
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401, 360–363.
- Saji, N. H., S. P. Xie, and T. Yamagata, 2006: Tropical Indian Ocean variability in the IPCC twentieth-century climate simulations. *Journal of Climate*, 19(17), 4397–4417.
- Son, H.Y., J.Y. Park, J.S. Kug, J. Yoo, and C.H. Kim, 2014: Winter precipitation variability over Korean peninsula associated with ENSO. *Climate Dynamics*, 42(11–12):3171–3186. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2008-1>
- Son, H.Y., J.Y. Park, and J.S. Kug, 2016: Precipitation variability in September over the Korean Peninsula during ENSO developing phase. *Climate Dynamics*, 46(11), 3419–3430. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2776-x>
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase independent wave–activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *Journal of Atmospheric Science*, 58(6), 608–627. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2)
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific–East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?. *Journal of Climate*, 13(9), 1517–1536. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2)
- Wang, L., and W. Chen, 2010: Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L09707. <https://doi.org/10.1029/2010GL042659>.
- Wu, B., T. J. Zhou, and T. Li, 2009: Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate. *Journal of Climate*, 22, 2992–3005.
- 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.

- Xu, X., S. He, Y. Gao, T. Furevik, H. Wang, F. Li, and F. Ogawa, 2019: Strengthened linkage between midlatitudes and Arctic in boreal winter. *Climate Dynamics*, 53, 3971–3983. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04764-7>
- Yoo, S.-H., S. Yang, and C.-H. Ho, 2006: Variability of the Indian Ocean sea surface temperature and its impacts on Asian–Australian monsoon climate, *Journal of Geophysical Research–Atmospheres*, 111, D03108.
- Yuan, Y., H. Yang, W. Zhou, and C. Li, 2008: Influences of the Indian Ocean dipole on the Asian summer monsoon in the following year. *International Journal of Climatology*, 28(14), 1849–1859. <https://doi.org/10.1002/joc.1678>

부록 A. 기후 평년 변화 및 최신 연구 결과를 반영한 장기예보 가이던스 개선

2015년 발간된 기후 감시와 분석 기반의 현업 장기예보 지침서인 장기예보 가이던스를 평년 기간 변화 (1981-2010년에서 1991-2020년으로) 및 2018년 이후 최신 연구 결과를 반영하여 개선하였다. 장기예보에 활용도를 높이기 위하여 우리나라 기후에 대한 기초 통계 자료를 체계적으로 정리하였으며, 월별, 계절별 예측 인자들을 정리하였다. 단지 예측 인자들의 상관계수만을 나타내는 것이 아니라 인자의 연도별 현황을 함께 제시함으로써 현업에서 예측 인자에 대한 신뢰도를 판단하기 용이하게 구성하였다. 또한 최근의 이상기후 사례 및 메커니즘을 제시하여 최근 기후 변동 특성에 대한 이해도를 높였으며, 평년 변화로 인한 예측 정보의 변화를 모두 반영하여 변화된 환경에서의 활용도를 높일 수 있도록 구성하였다. 뿐만 아니라 2018년부터 2020년에 연구된 기상청 R&D 2중 (대양간 상호작용 및 변동에 기인한 한반도 기후 예측 기술 개발, 극/성층권/지면과정 변동 특성을 활용한 중위도 순환장 예측기술 개발)의 방대한 연구 결과 중 현업 장기예보에 활용도가 높은 부분을 추려내고, 이를 도식화, 요약화하여 장기예보에 활용도가 증대될 수 있도록 구성하였다. Figure A1에 개선된 장기예보 가이던스의 예시를 첨부하였다.

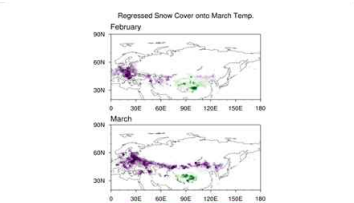


그림 33. 3월 기온과 2월, 3월의 적설량 변화와의 상관관계. 특히 2월, 3월의 적설량과 3월 기온의 상관관계. 통계적으로 95% 수준에서 유의한 양의 상관관계를 보임

○ 2월 유럽 지역(15°E-30°E, 45°N-55°N) 눈덮임 현상이 많았던 7개 해와 적었던 7개의 3월 우리나라 기온을 살펴보면, 눈덮임이 적은 경우, 대체로 기온이 높은 경향을, 눈덮임이 많은 경우, 대체로 기온이 낮은 경향을 보임 (표 3.2)

표 3.2. 2월 유럽 지역(15°E-30°E, 45°N-55°N) 눈덮임 현상이 많았던 해와 적었던 해 우리나라 3월 기온 편차(°C)

2월 유럽 지역 눈덮임 현상 해	3월 기온 편차	2월 유럽 지역 눈덮임 현상 해	3월 기온 편차
1992	-0.2	2005	-0.6
1999	-0.2	2010	-0.9
2002	1.5	2012	-0.6
2006	0.7	2009	-0.3
2015	0.6	1996	-1.0
1995	-0.4	1998	-0.8
1990	0.9	2013	0.5

표 7.4. 엘니뇨 발생 확률에서 엘니뇨 발생 9~11월 우리나라 기온 편차(°C)와 엘니뇨 발생 9~11월 우리나라 기온 편차(°C)의 상관관계. 통계적으로 95% 수준에서 유의한 양의 상관관계를 보임

연도	9월 기온편차(°C)	10월 기온편차(°C)	11월 기온편차(°C)
1979	-1.2	144.6	0.6
1981	-1.2	20.6	0.4
1982	-1.5	1.8	-2.0
1983	-2.2	174.7	-5.1
1984	-0.8	36.8	-2.1
1985	-1.1	61.1	-1.1
2003	-2.7	87.6	-1.8
2008	0.1	193.9	-2.1
2014	0.1	119.4	0.2
평균			

○ 엘니뇨 발생기로 발달 중인 가을에는 서해안-동해안도의 대륙 지역 신초가 매우 뚜렷하게 나타나는데, 9월에는 서인도양까지 대륙 지역 신초가 이어진 반면, 10월과 11월에는 서인도양에는 대륙 지역 신초가 나타나 인도-서태평양-동태평양까지 Triple 대륙 구조를 나타낸 8월에는 저기압 상현의 영향을 받으며 고온 건조 신초가 유입된 반면, 11월에는 고기압 상현의 영향을 받으며 9월과는 반대 특성을 나타냄 (그림 7.5)

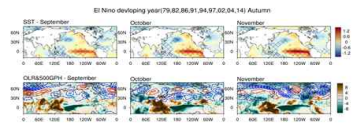


그림 7.5. 엘니뇨 발생기로 발달 중인 가을에는 서해안-동해안도의 대륙 지역 신초가 매우 뚜렷하게 나타나는데, 9월에는 서인도양까지 대륙 지역 신초가 이어진 반면, 10월과 11월에는 서인도양에는 대륙 지역 신초가 나타나 인도-서태평양-동태평양까지 Triple 대륙 구조를 나타낸 8월에는 저기압 상현의 영향을 받으며 고온 건조 신초가 유입된 반면, 11월에는 고기압 상현의 영향을 받으며 9월과는 반대 특성을 나타냄 (그림 7.5)

표 4.6. 6월 기온 상향 예측인자 상관계수와 정확도 값과 관계, 정확도 순위 (최고 순위는 정확도)

상향인자	3월 유럽 지역 눈덮임	4월 유럽 지역 눈덮임	1~3월 북반구 평균 기온	4월 북반구 평균 기온	5월 북반구 평균 기온	6월 북반구 평균 기온
상향인자(상향)	0.47	0.47	0.64	0.44	0.5	
상향인자(하향)	0.65	0.55	0.34	0.45	0.6	
정확도(상향)	39.6%(56.3%)	37.8%(52.1%)	50.0%(62.5%)	59.5%(42.9%)	37.8%(60.2%)	
순위	3	4	3	1	4	
최고 상관계수	65%	35%	30%	50%	60%	
평균 상관계수	2	4	5	3	1	

표 4.7. 6월 기온 상향 예측인자 상관계수와 정확도 값과 관계, 정확도 순위 (최고 순위는 상관계수)

상향인자	3월 유럽 지역 눈덮임	4월 유럽 지역 눈덮임	1~3월 북반구 평균 기온	4월 북반구 평균 기온	5월 북반구 평균 기온	6월 북반구 평균 기온
상향인자(상향)	0.02	0.22	-0.4	0.0	-0.3	-0.04
상향인자(하향)	0.03	0.21	-0.38	0.0	-0.26	-0.04
정확도(상향)	37.8%(41.7%)	41.7%(43.8%)	39.6%(47.9%)	43.8%(37.5%)	50.0%(37.5%)	18.8%(31.8%)
순위	5	3	4	2	1	6
최고 상관계수	45%	45%	45%	50%	55%	35%
평균 상관계수	3	3	3	2	1	6

6.7.2 우리나라 겨울철 기온 예측을 위한 예측인자 및 예측 모델

- 우리나라 겨울철 기온 예측을 위한 예측인자 구축을 위해, 기온과 관계 강적역 변수들과의 회귀분석을 수행해 높은 상관계수를 가지는 지표와 기간에 대해 예측인자를 선정하고 예측 모델을 구축
- 우리나라 겨울철 기온은 기상청에서 제공하는 45개 관측지점을 사용함
- 동아시아 겨울철 기온과 우리나라 겨울철 기온은 통계적으로 높은 양의 상관관계를 가지지만 동아시아 겨울철 기온 예측 통계 모델은 한반도 겨울철 기온을 예측한 예측 정확도가 떨어짐 이는 한반도 위치상 서쪽의 시베리아 고기압과 동쪽의 알류산 저기압 사이에서 위치해 이들의 강도와 영향방향이 크기에 따라 민감하게 영향을 받기 때문이며, 한반도에 초점을 맞춘 최적화 모델이 필요
- 우리나라 겨울철 기온은 예측 모델 개발을 위해 강적역의 예외를 제거할 규모로 쉽게 가지는 눈덮임, 해빙, 해수면 온도 변수들에 대해 우리나라 기온에 대한 회귀분석을 수행

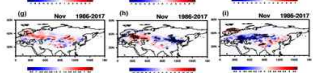
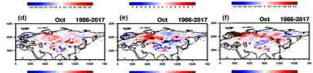
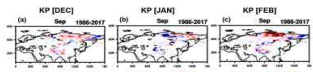


그림 6.55. 월별 한반도 겨울철 기온에 대한 월별 유라시아 지역의 겨울철 눈덮임의 회귀계수 (1960-2017). 1~3월 상하부에서 95% 수준에서 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보임

6.6. 10월 눈덮임(Snowcover) 및 눈덮임속도가 겨울철 기온에 미치는 영향

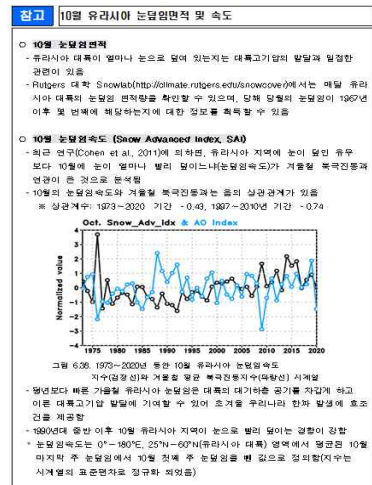


그림 6.56. 1975~2020년 동안 10월 유라시아 눈덮임속도(수심상승률)와 겨울철 평균 북반구동아시아(북반구) 시계열 값을 비교함

- 1990년대 중반 이후 10월 유라시아 지역의 눈덮임 속도가 증가하는 경향을 관찰
- 눈덮임속도는 0°~180°E, 25°N~60°N(유라시아 대륙) 영역에서 평균 10월 마지막 주 눈덮임에서 10월 첫째 주 눈덮임을 뺀 값으로 정의함(즉주는 시계열의 표준편차로 정규화 되었음)

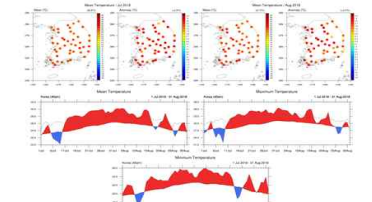


그림 23. 2018년 7월과 8월 전국 45개 지점의 달평균과 편차 분포도, 달평균 기온과 달최고기온. 달최고기온은 시계열 (8시간, 30분 간격) 값을 나타냄

Figure A1. 기후 평년 변화 및 최신 연구 결과를 반영한 장기예보 가이던스 예시

부록 B. 기후 감시와 분석 기반 3개월 전망 정보 제공

기상청 기후예측과에서는 매월 중순 3개월 전망 토의를 개최하고 토의 결과를 바탕으로 3개월 전망 예보를 발표하는데, APCC에서도 3개월 전망 토의에 참여해 APCC MME (Multi-Model Ensemble)와 기후 감시와 분석기반 예측 결과를 제시한다. 이 과제에서는 사후 분석, 주요 기후 감시 요소 정보 및 기후 감시 요소 기반 예측 정보와 유사해 기반 예측 정보를 제공하였다. 특히 유사해 기반 예측 정보는 예측 시점에서 해수면 온도, 대류 구조, 대기 패턴에서 주요 패턴을 규명하고 그와 유사한 패턴이 나타났었던 과거 사례를 예측에 활용하였다. Figure B1에 기후 감시와 분석 기반 예측 정보 예시를 나타내었다.

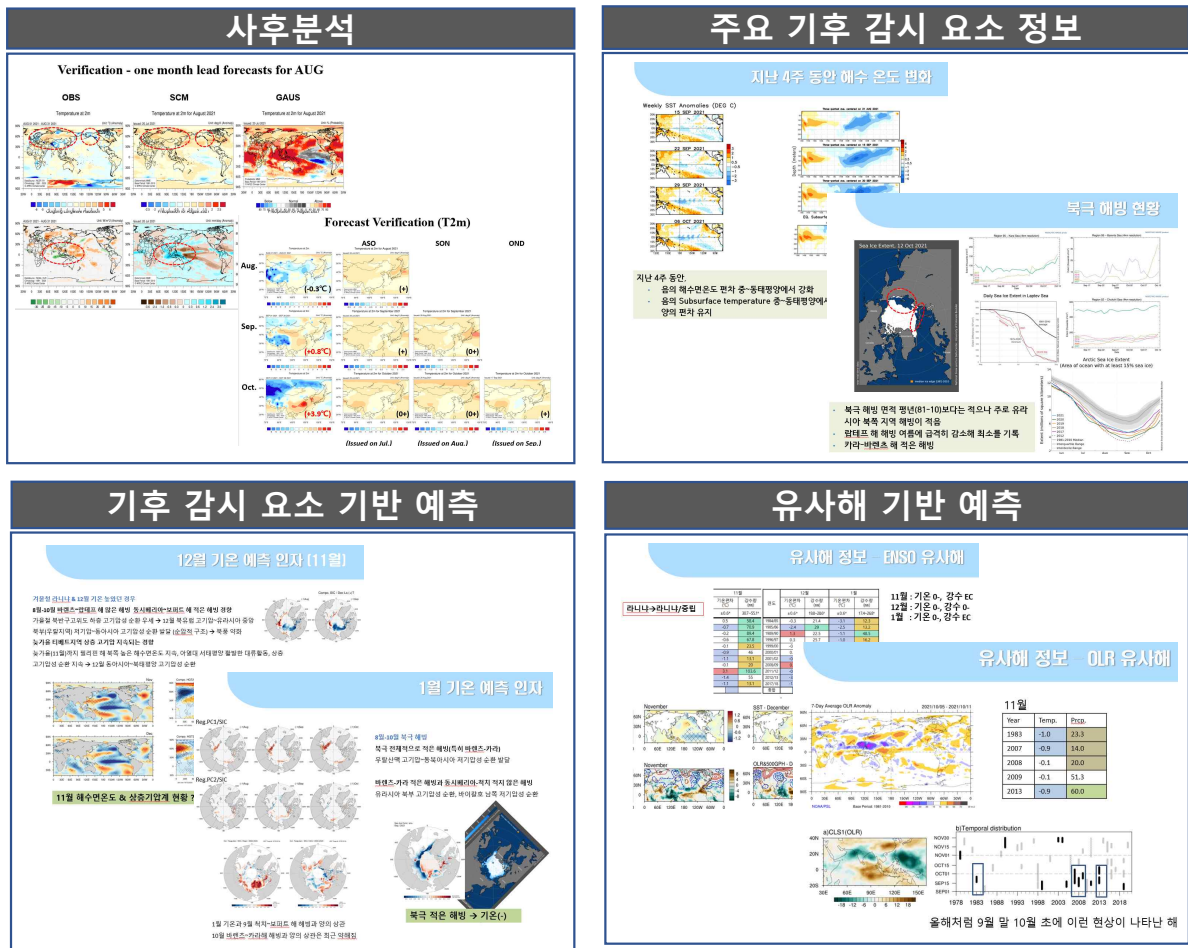


Figure B1. 기후 감시와 분석 기반 예측 정보 예시

부록 C. 월 기후 분석 토의

기상청에서는 우리나라 기후 특성에 대한 이해를 높이고 장기예보관의 분석역량 강화를 위해 우리나라 뿐 만 아니라 전지구 기후시스템과의 연계성을 고려한 체계적이고 심도 있는 기후분석을 추진하고 있으며 이를 위해 매월 말 당월의 특이 기상 발생원인과 기후이슈에 대한 분석과 토의를 정기적으로 하고 있다. APCC에서는 토의에 참여해 전 지구적으로 나타난 기후 현상의 특징과 우리나라 기온 및 강수에 영향을 준 기후 현상 및 요소에 대해 분석한 내용을 발표하고 자료를 기상청에 제공하고 있다. 발표는 기상청 기후변화감시과와 함께 순환 체제로 하고 있으며 내부적으로는 토의 내용을 요약한 보고서를 매달 작성하고 있다. Figure C1에 APCC에서 제공한 분석 내용 예시를 첨부했다.

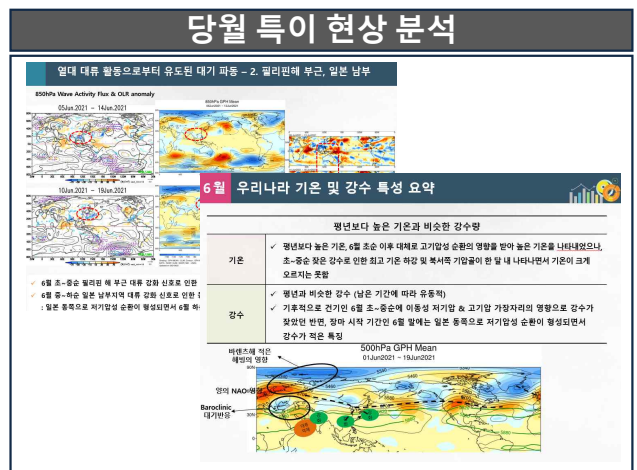
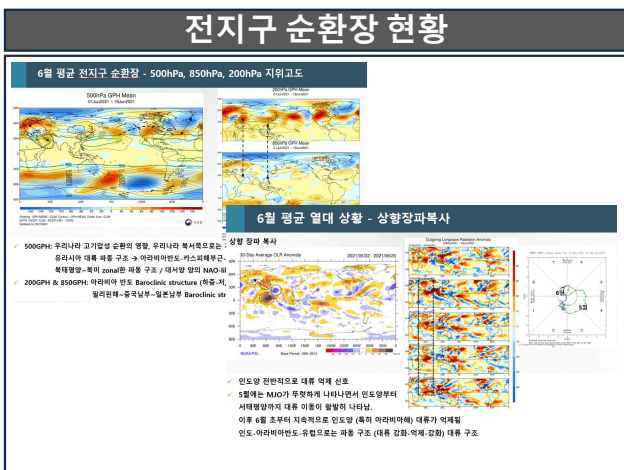
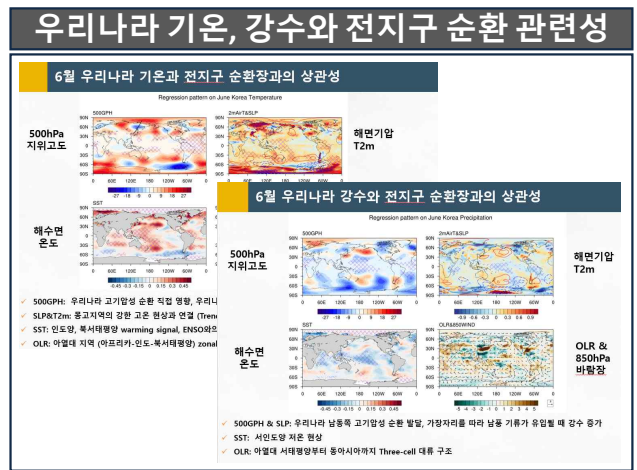
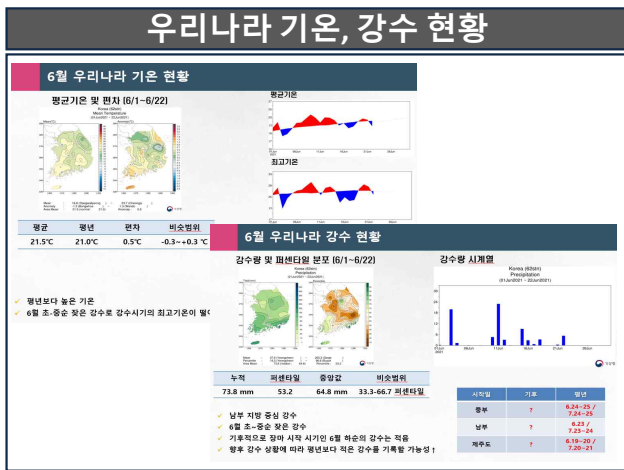


Figure C1. 월 기후 분석 토의 예시

요약하여, 차주 화요일에 Figure D1과 같은 현황 보고를 하며, 기후소통 TF 내 공유를 받게 된다.

APEC 기후센터에서는 매주 실시하는 일일 모니터링 뿐만 아니라, 수시 기후이슈 분석에도 기여를 하고 있다. 전세계 이상기후 중 기후 이슈 발생시에는 적절한 대국민 정보를 제공하기 위해, 기후 이슈 현황 및 원인과 관련하여 분석하여 지원하고 있다.

2021년에는 총 6건의 선제기후자료를 제공하였으며, Figure D2부터 D4까지, 총 6개의 선제 기후자료를 볼 수 있다. 6건의 선제 기후 분석 자료는 1월 말에 발생한 미국 서부 폭우와 동부 눈폭풍 관련 현황 정리 및 기후 분석, 2월에 발생한 미국 한파에 대한 현황 정리 및 기후 분석, 3월 호주 폭우와 관련한 현황 및 기후 분석, 6월 초여름 북반구 폭염에 대한 현황 정리 및 기후 분석, 7월 장마 이후 폭염과 관련하여 현황 정리 및 기후 분석, 10월 초 한반도 고온 현상과 관련하여 현황 정리 및 기후 분석 등을 실시하여 기후소통 TF에 제공하였다.

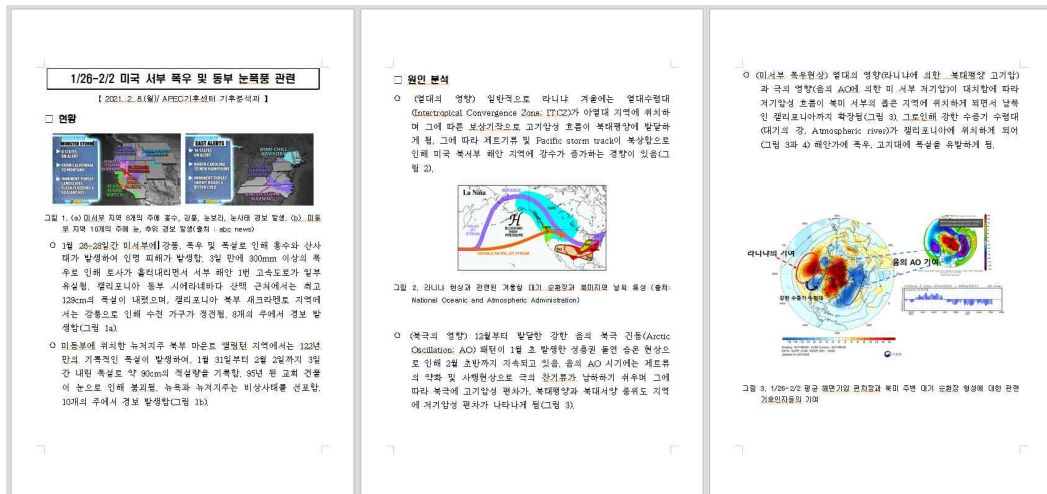


Figure D2. 기후소통 TF 선제기후자료 (1월 미국 폭설)

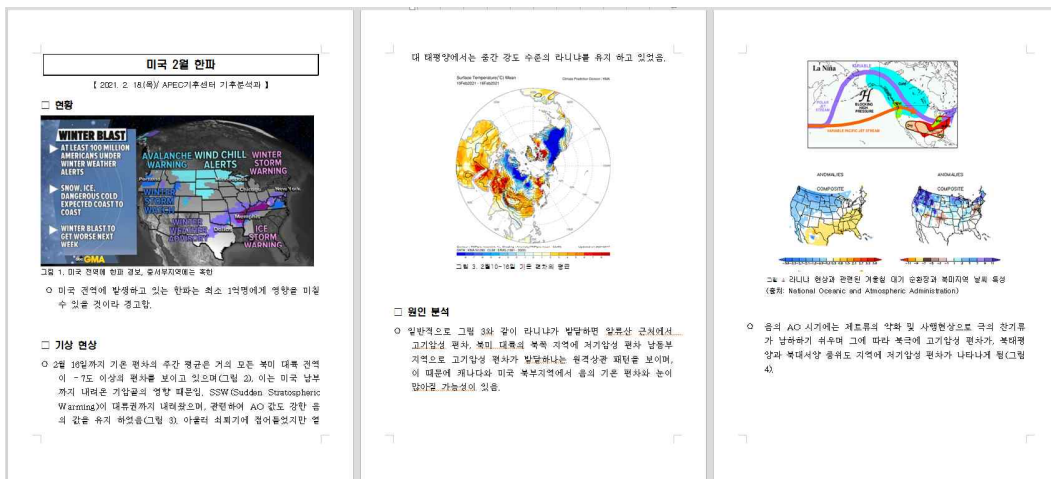


Figure D3. 기후소통 TF 선제기후자료 (1월 미국 한파 및 텍사스 정전)

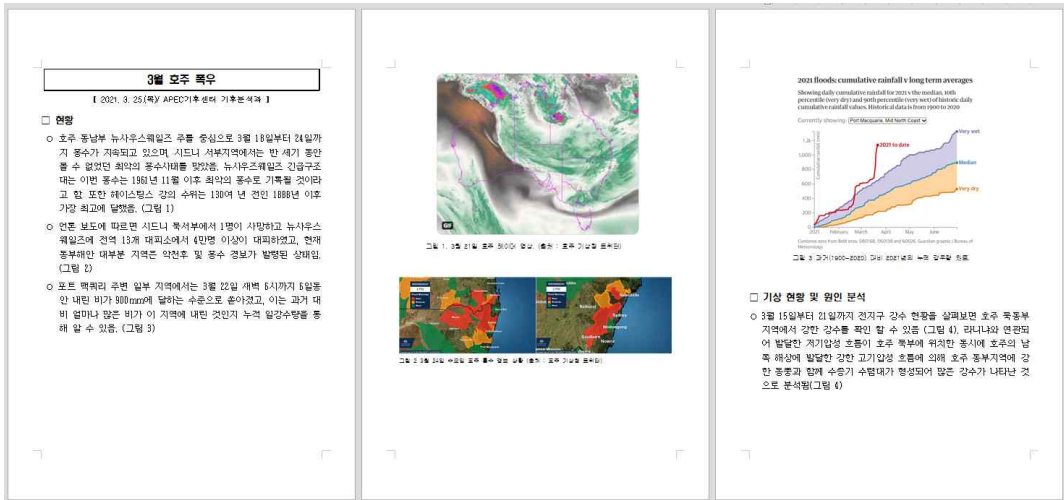


Figure D4. 기후소통 TF 선제기후자료 (3월 호우 폭우)

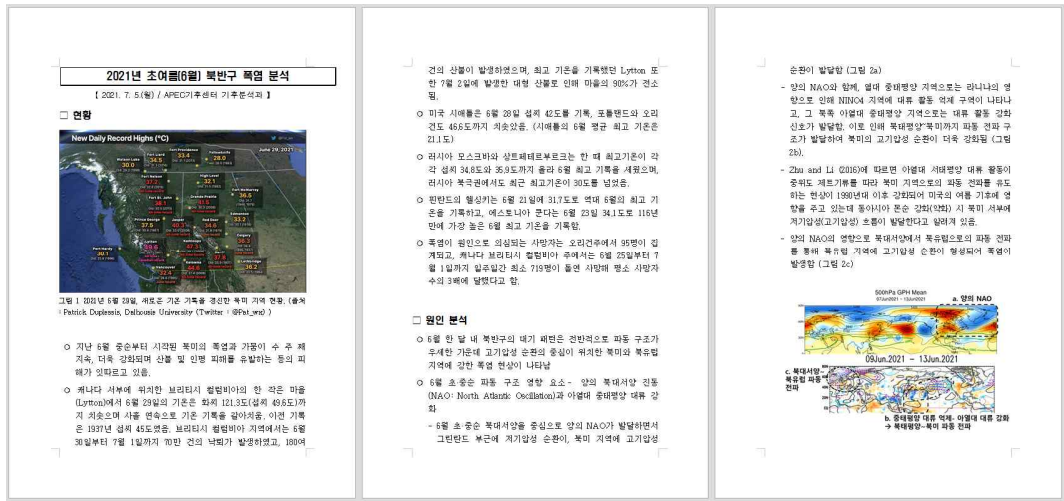


Figure D5. 기후소통 TF 선제기후자료 (초여름 6월 북반구 폭염 분석)

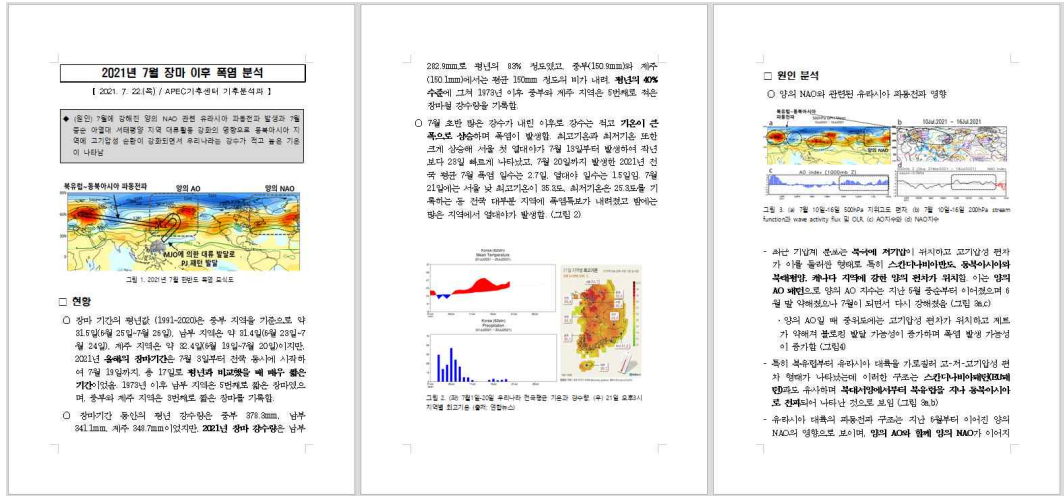


Figure D6. 기후소통 TF 선제기후자료 (7월 장마 이후 폭염 분석)

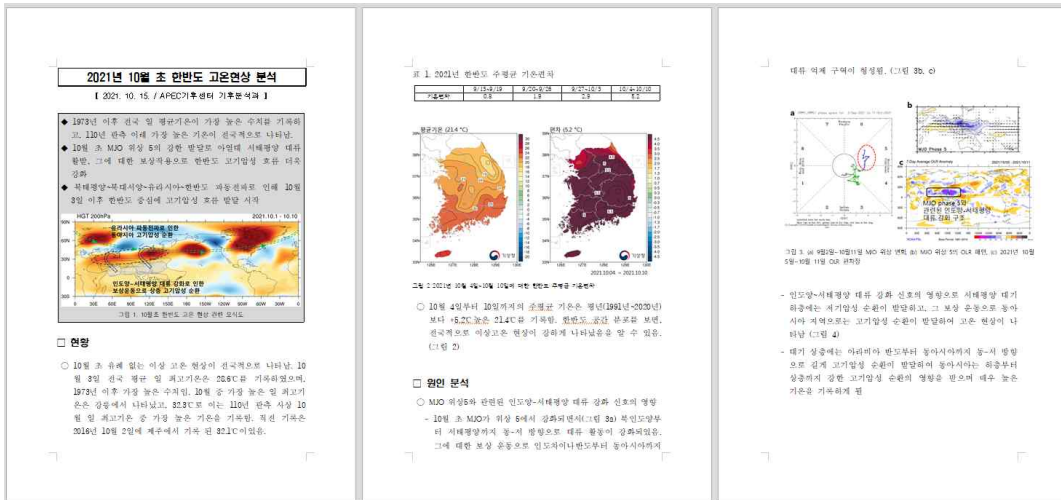


Figure D7. 기후소통 TF 선제기후자료 (10월 초 한반도 고온현상 분석)

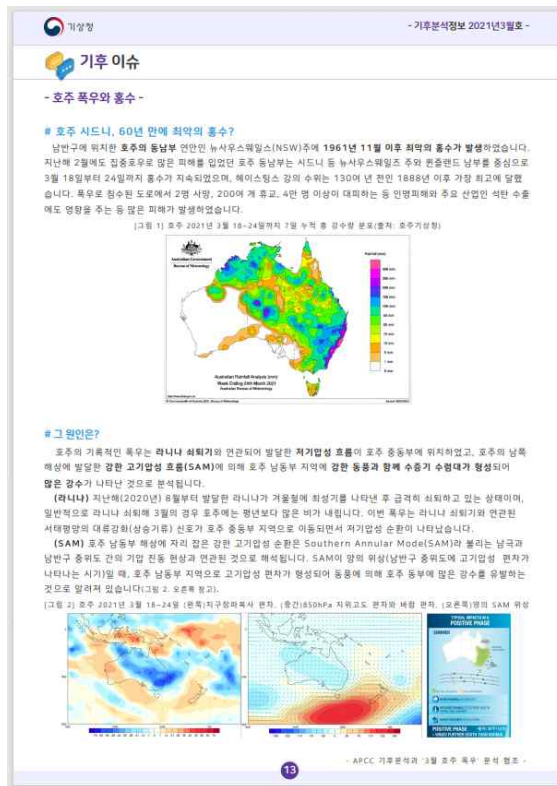


Figure D8. 기상청 월간 기후분석정보 2021년 3월호에 게재 된 APEC 기후센터 ‘3월 호주 폭우’ 분석 지원 내용

또한 이렇게 선제 기후 자료로 제공 된 기후 분석 자료 들은 기상청 등에서 보조 자료로 활용하고 있으며, 기상청 기후분석정보 2021년 3월호에는 선제 기후 자료로 제공한 ‘3월 호주 폭우’ 와 관련 분석 내용이 함께 게재되었다. (Figure D8)