

**현업 장기에보 정확도 향상을 위한 APCC-기상청
협력시스템 구축**

**Development of the APCC-KMA Collaboration
System for Improving Operational
Long-Range Forecast**

여새림, 임슬희, 김유진, 이현주,

윤순조, 김가은, 박다인

기후사업본부 기후분석과

김원무 기후사업본부 예측기술과

김상철 기후사업본부 예측운영과

2019.12.

APEC기후센터

평문 초록

신뢰도 높은 기후예측 정보는 수자원 및 에너지 수급 계획, 각종 계절 질환에 대한 예방, 재해 방제 등 다양한 분야에 활용되어 국민의 일상생활에 큰 영향을 미칩니다. 따라서 장기예보 생산 기관인 기상청과 기후예측 전문 기관인 APEC 기후센터(APCC)는 기후예측 정보의 신뢰도와 정확도를 높이기 위해 다방면으로 노력하여 왔습니다. 특히 APCC는 기상청과 함께 World Meteorological Organization(WMO) 장기예보 선도센터를 운영하면서 WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 기후예측 서비스를 제공하고 있습니다. 또한 지난 2017년부터는 기상청과 APCC 두 기관의 협력을 통해서 시너지 효과를 창출하고자 현업 장기예보 정확도 향상을 위한 APCC-기상청 협력 시스템 구축 과제를 시작하였습니다. 지난 3년간 과제 수행을 통하여 두 기관 협력 시스템 구축의 초석을 마련하고 시스템을 안정화 하였으며 두 기관의 발전적인 관계를 구축하기 위해 노력하였습니다.

장기예보는 기후예측 모델의 결과와 함께 우리나라 기온과 강수에 영향을 미치는 다양한 기후요소의 현황과 추이를 종합적으로 고려하여 생산됩니다. 따라서 신뢰도 높은 장기예보의 생산을 위해서 우리나라 기후 변동성에 대한 물리, 역학적 이해와 함께 기후예측 모델 결과에 대한 올바른 해석과 이를 바탕으로 한 예측 성능 향상 기법 개발이 필요합니다. 이 과정은 이러한 부분들을 아우를 수 있도록 구성되었습니다. 먼저 관측 자료를 기반으로 우리나라 폭염과 여름철 강수 변동성에 대하여 분석하였고, 여름철과 겨울철 극한 기온 사례에 대한 상세 분석을 통해 장기예보의 기후 감시 및 분석 업무에 활용될 수 있도록 하였습니다. 또한 역학 모델의 우리나라 지역 예측 특성을 조사하고 이를 향상시키기 위해 다양한 기술을 개발하였습니다. 예를 들면, 역학 모델의 서태평양 지역 강수 모의 특성 활용을 통한 강수 예측 시스템과 역학 모델 결과에 상세화 기법을 적용하여 월별 강수 예측 시스템을 개발하였습니다. 그 이외에도 실제 장기예보 생산에 활용될 수 있는 다양한 예측 콘텐츠를 개발하였습니다.

이 과제의 연구 결과들은 학문적인 연구에만 그치는 것이 아니라 실제 현업 장기예보 업무에 적용되는 것을 목표로 합니다. 따라서 위의 연구 결과를 바탕으로 기상청의 현업 장기예보 관련 회의에 직접 참여하는 것이 이 과제의 가장 큰 특징입니다. 이를 통해 현업 장기예보의 질적 향상에 APCC가 직접적으로 기여할 수 있으며 APCC 내부적으로도 우리나라 기후예측과 관련한 역량 강화를 기대할 수 있습니다. 더 나아가 신뢰도 높은 장기예보 생산을 통해 일반 국민을 포함하여 다양한 전문가 수요자 그룹에서 가치 있는 정보로 활용될 수 있기를 기대합니다.

Executive Summary

This project aims to improve fidelity of operational long-range forecast in Korea by engaging Korea Meteorological Administration(KMA)'s operational works. KMA provides roughly two types of long-range forecast, one is monthly-rolling 3-month forecast and the other is weekly-rolling 1-month forecast. These long-range forecasts are produced by combining the results from climate prediction models and extensive understanding on Korean climate variability through forecast discussions. Meanwhile, APEC Climate Center(APCC) is a specialized institution of climate prediction based on Multi-Model Ensemble(MME) and they have been participating in KMA's operational forecast discussion since their initial state. Also, APCC have been conducted diverse analyses on Korean climate such as a relationship between major climatic modes, which can be directly applicable to operational long-range forecast.

As such, this project has been launched for effective management on the APCC's tasks on operational long-range forecast. This project comprises four main research subjects. The first subject is Korean climate analysis based on observational reanalysis dataset. Especially, heat wave variability in Korea have been investigated. It is found that most of heat waves in Korea can be classified into two distinct types based on the spatial patterns of atmospheric circulation anomalies. The zonal wave type is accompanied by large-scale atmospheric waves across the Eurasian continent, while the meridional wave type is associated with convective activities over the subtropical western North Pacific. Next, we also investigate Korean summer precipitation variability in relation to the western North Pacific anticyclonic circulation. In particular, their non-linear relationship has been focused in this research, which provides better insight into the potential impacts of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and circulation/convection anomaly over the western North Pacific on summer Korean precipitation. In order to utilize long-range forecast and post-analysis, the special cases of extreme winter/summer Korean temperature have been extensively analyzed. The mechanisms and influencing climate factors of the summer extreme high temperature cases and the winter extreme low temperature cases are investigated based on the monthly data. We have also developed a statistical model for predicting Korean climate by using the up-to-date statistical technique, which can reflect seasonality and trend.

The second subject is about improving prediction skill based on operational climate models including APCC MME, GloSea5, and World Meteorological Organization Lead Center (WMO LC). First, the prediction model for Korean monthly precipitation have been developed based on the close relationship between Korean precipitation and precipitation over tropical western Pacific. Since climate models have fairly good prediction skill on tropical western Pacific, Korean precipitation can be inferred from climate models' prediction on tropical

western Pacific. Second, an expert seasonal prediction system has been developed based on the APCC MME and expert-guided statistical downscaling techniques. Especially, the monthly precipitation prediction system has been developed and it has been more elaborated in technically during this year. Meanwhile, APCC also supports 1-month forecast as well as 3-month forecast by establishing WMO sub-seasonal MME system. In this regard, we are not only providing prediction results but also developing various prediction contents such as daily timeseries for supporting forecaster's decision making. Finally, we investigate the characteristics of subseasonal winter temperature variability during different phase relationship of Arctic Oscillation and ENSO and also diagnose the climate models' prediction skill for supporting 1-month forecast.

The third subject is about operating WMO Lead Center for Long Range Forecast (WMO LC-LRFMME). The WMO LC-LRFMME collected forecast data from global producing center and standardized forecast and hindcast data and redistributed the Multi Model Ensemble (MME) results through the website. Also the seasonal forecast information from WMO LC-LRFMME was provided in Regional Climate Outlook Forums, Global Seasonal Climate Updates (GSCU) and KMA to support a consensus on the state of the global and regional climate outlook. Meanwhile, the improvements of operational system for WMO LC-LRFMME have been carried out the various aspects such as providing customized seasonal forecast information, expanding the service on website for users and improving the management of seasonal forecast data.

Finally, in order to directly apply the above described research results to operational long-range forecast, we participate in KMA's regular forecast discussions. These discussions include 3-month and 1-month forecast discussions and monthly climate analysis discussion. We also provided monitoring information about heat wave during summer season. Likewise, this project contributes to strengthen specificity of long-range forecast over Korea. We hope that this research results are acting for the cornerstone of improving Korean operational long-range forecast.

국문 요약

이 과제는 기상청의 현업 장기예보 업무 지원을 통해 장기예보 정확도 향상에 기여하는 것을 목표로 합니다. 기상청에서 제공하는 현업 장기예보는 주별 기반의 1개월 예보와 월별 기반의 3개월 예보로 구성됩니다. 장기예보는 기후 예측 모델 결과와 우리나라 기후에 영향을 미치는 다양한 기후 요소에 대한 이해를 바탕으로 기상청 내부뿐만 아니라 외부 전문가들과의 예보 토의를 통해 생산됩니다. APEC 기후센터(APCC)는 Multi-Model Ensemble(MME)를 기반으로 한 기후예측 전문 기관으로써, 설립 초기부터 기상청의 장기 예보 생산을 위한 예보 토의에 참여하여 왔습니다. 뿐만 아니라, APCC에서는 우리나라 기후 특성 이해를 위해 다양한 기후 인자들과의 관련성을 연구하는 등 장기예보 생산에 적용 가능한 기후 분석 업무를 수행하여왔습니다.

이와 같이 기상청의 현업 장기예보 지원과 관련한 APCC 내부의 업무들을 효과적이고 효율적으로 관리하고자 이 과제가 시작되었습니다. 이 과제는 다음과 같은 네 가지 주제로 이루어집니다. 첫째, 관측 자료를 기반으로 우리나라 기후 특성을 이해하고 월별 기온 강수 변동성에 영향을 미치는 기후 인자들에 대한 연구입니다. 특히, 우리나라 폭염 특성 이해를 위해 폭염 사례들을 대기 순환 구조에 따라서 두 가지 타입으로 나누어 살펴보고 각각의 모니터링 인자를 발굴하였습니다. 유라시아 대륙을 가로지르는 동-서 방향 파동 형태 폭염의 경우 북대서양 대기 변동성과 인도 여름 몬순이 주요 역할을 하는 반면 북서태평양 지역부터 동아시아까지 남-북 방향 파동 형태 폭염의 경우 북서태평양 대류활동이 주요 역할을 하는 것으로 분석되었습니다. 또한 우리나라 여름철 강수 변동성과 북서태평양 아열대 고기압과의 비선형적인 관련성을 살펴봄으로써 우리나라 강수 변동성의 다양한 형태를 이해하고 열대태평양 엘니뇨-남방진동과의 관련성을 연구하였습니다. 다음으로 우리나라 여름철과 겨울철 극한 기온이 발생한 사례에 대하여 그 특징과 이에 영향을 주는 기후학적 현상들에 대한 분석을 통해 장기 예보 및 사후 분석 업무에 적용하고자 합니다. 분석 결과 여름철의 경우 사례별로 원인이 달랐는데, 하층에서 서풍에 의한 고온 건조한 대기 유입, 아열대 서태평양 대류활동, 유라시아 대륙을 가로지르는 파동 형태의 순환장과 관련된 고기압 발달, 북대서양 해수면온도와 관련된 대기 변동성, 티베트와 중국에 걸쳐 발달한 상층 고기압의 강화, 캄차카반도의 블로킹 고기압과 몽골 상층 고기압 발달 등이 여름철 고온의 주요 영향 인자로 나타났습니다. 겨울철의 경우 사례에서 공통적으로 우랄산맥 주변에 기압능이 발달하고 동아시아 기압골이 강해지면서 북풍의 영향을 받아 우리나라 기온이 하강하였고 기압능과 기압골 발달에는 북극 해빙의 영향, 열대 대류활동의 영향이 주요 영향 인자로 나타났습니다. 다음으로 최신 통계 기법을 적용하여 우리나라 기온 예측 통계 모형을 개발하였습니다. 이 모형은 데이터의 계절성과 트렌드를 반영할 수 있는 시계열 모형입니다. 최근 우리나라 기온은 지구온난화와 이상기후로 인해 계절의 주기가 달라지고 있고 기온의 트렌드는 높아지고 있습니다. 계절의 주기변동과 트렌드를 반영한 모형을 이용하여 한반도 기온을 예측할 수 있다면 기온예측 정확도 향상에 기여할 수 있습니다.

두 번째 연구 주제는 APCC MME, GloSea5, 및 World Meteorological Organization(WMO)

장기예보 선도센터 등 실제 장기예보에 활용되는 기후예측 모델의 우리나라 예측 성능에 대한 이해와 이를 향상시키기 위한 기술 개발에 관한 부분입니다. 먼저 우리나라 월별 강수 예측 성능을 향상 시키고자 기후 예측 모델에서 상대적으로 예측 성능이 좋으며 우리나라 강수와 상관관계가 높은 서태평양 지역 강수를 활용하는 모형을 개발하였습니다. 분석 결과 4월, 9월, 11월, 12월 우리나라 강수 예측 시 모형에서 예측한 서태평양 강수를 활용할 수 있다는 것을 제시하였습니다. 다음은 APCC MME를 기반으로 우리나라 지점 기온과 강수 자료를 활용하여 예측 인자를 선택하여 예측 모형을 구축하는 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템을 개발하였습니다. 특히 올 해에는 1개월 선행 시간의 월별 강수 예측 시스템을 개발하는데 주력하였습니다. 한편, APCC에서는 3개월 예보뿐만 아니라 WMO 장기예보 선도센터 계절내 MME를 구축하여 이를 바탕으로 매주 1개월 예보토의를 지원하고 있는데, 이때 계절내 MME 예측 정보와 함께 예측 성능, 기압계 및 기온 일 변동성 등 보다 다양한 예측 콘텐츠를 개발하여 예보관의 의사 결정을 지원하고 있습니다. 또한 1개월 전망의 겨울철 주별 기온 예측 지원을 위해 주요 기후 모드인 북극 진동과 엘니뇨-남방진동의 위상에 따라 기온 경향성 및 계절내 예측 모형에서의 예측성능을 진단하였습니다.

세 번째로 계절 예측 전문기관으로서 APCC에서는 2011년부터 WMO 장기예보 선도센터의 실질적인 운영을 담당하고 있습니다. WMO 장기예보 선도센터에서는 각 Global Producing Center(GPC)에서 생산하는 장기예보 자료를 수집하고, 다양한 MME 기법을 개발하여 서비스하고, 각 GPC의 예측자료와 MME 예측자료를 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 통해 일관된 형태로 서비스하는 등 안정적으로 시스템을 운영할 뿐만 아니라 자료 품질 개선 등 사용자의 편의성을 증대시키고자 노력하였습니다. 또한 WMO 장기예보 선도센터의 국제적 위상 증진과 계절 예측 자료의 활용성 증대를 위해 다양한 지역기후 포럼에 맞춤형 MME 예측정보를 제공하고 Global Seasonal Climate Update(GSCU) 발간을 지원하였습니다.

마지막으로 위에 서술한 연구 개발 결과들을 실제 현업 장기예보 업무에 적용하기 위하여 기상청에서 수행하는 현업 장기예보 관련 회의에 직접적으로 참여하고 있습니다. 매월 APCC MME를 기반으로 한 예측 정보를 바탕으로 3개월 예보토의에 참여하고, 매주 WMO 계절내 MME를 기반으로 1개월 예보토의에 참여하고 있습니다. 또한 매월 우리나라 기후 특성과 이에 영향을 미친 전 지구 기후 특성을 살펴보는 월 기후 분석토의에 참석하였으며 여름철 방재 기간 동안에는 기후 이슈에 선제적으로 대응하고자 매주 폭염 모니터링 정보와 전 지구 기압계 모니터링 정보를 제공하였습니다.

이와 같이 우리나라 현업 장기예보 지원을 위해 깊이 있는 연구 결과뿐만 아니라 직접 현업 업무에 참여함으로써 우리나라 기후예측 기술의 전문성 향상에 기여하였습니다. 향후에도 이 과제의 연구 결과들이 현업 장기예보 업무에 적극 활용되고 예측 기술 발전의 초석이 되기를 바랍니다.

목차

평문 초록	i
Executive Summary	ii
국문 요약	iv
목차	vi
표 차례	ix
그림 차례	xi
1. 서론	1
2. 관측기반 기후분석 및 과거 사례 심층 분석	3
가. 대기 순환 구조에 따른 우리나라 폭염 분류 및 특성 분석	3
(1) 연구 배경	3
(2) 자료와 방법	3
(3) 우리나라 폭염의 일반적 특성	4
(4) 대기 순환 구조에 따른 두 가지 타입의 폭염 특성	7
(5) 두 가지 타입 폭염의 변동 과정	10
(6) 요약 및 결론	14
나. 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 비선형적 관련성	17
(1) 연구 배경	17
(2) 자료와 방법	17
(3) 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 관련성	18
(4) 우리나라 여름철 강수가 많을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 특징	20
(5) 우리나라 여름철 강수가 많을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 진화 과정	24
(6) 우리나라 여름철 강수가 적을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 특징	26
(7) 우리나라 여름철 강수가 적을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 진화 과정	28
(8) 요약 및 결론	31
다. 우리나라 여름철과 겨울철 극한 기온 사례 분석	33
(1) 연구 배경과 극한 기온 사례 선정 방법	33
(2) 여름철 극한 기온 사례	35
(3) 겨울철 극한 기온 사례	59
(4) 요약	85
라. 기온 예측 통계 모형 개발	87

(1) 연구배경	87
(2) 방법론	88
(3) 연구자료	92
(4) 자료 분석 및 결과	93
(5) 요약 및 결론	108
3. 역학 모델 분석 및 예측 기술 개발	111
가. 월별 강수 전망을 위한 역학 모형의 서태평양 순환 모의 특성 분석	111
(1) 우리나라 현업 월별/3개월 예측 지원을 위한 APCC MME 스킴 (TCC, HSS) 비교	111
(2) 4월 서태평양 대류활동과 우리나라 강수 상관관계	113
(3) 11월 서태평양 대류활동과 우리나라 강수 상관관계	125
(4) 12월 서태평양 대류활동과 우리나라 강수 상관관계	137
(5) APCC MME 모델 기반 서태평양 강수 기후인자 요약	147
나. 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템 개발	149
(1) 연구 배경	149
(2) 자료와 방법	149
(3) 2019년 운용 결과	150
(4) 예측 성능 평가	151
(5) 요약 및 결론	152
다. 1개월 전망 지원을 위한 예측 콘텐츠 개발	154
(1) 연구 배경	154
(2) 우리나라 기온 예측을 위한 해면기압 예측결과 추가	154
(3) 우리나라 주변 지역 변수 및 모델별 일단위 시계열 예측결과 추가	158
(4) PMME 및 개별 모델의 확률예측 결과 비교자료 추가	160
(5) 개별 모델의 예측성 검증 결과 추가	160
라. 북극 진동과 엘니뇨-남방진동 복합 영향에 따른 우리나라 겨울철 기온 주별 예측 특성 분석	163
(1) 연구배경	163
(2) 자료 및 방법	164
(3) 재분석 자료에서 기후인자별 대기순환장 특성	166
(4) 계절 내 예측 모델에서 예측성 평가	171
(5) 요약 및 결론	178
4. WMO 장기예보 선도센터 운영	180

가. WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영	180
(1) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영의 배경	180
(2) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영 개요	181
(3) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 개선	192
(4) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 자료 제공	197
(5) 기타 기상청 기후예측과와의 협력 사항	202
나. WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템 시범운영	204
(1) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템 개발의 개요	204
(2) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템의 참여모델 특성	204
(3) WMO 장기예보 선도센터 계절내 MME 예측 방법	205
(4) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 자료수신 및 시스템 운영	208
(5) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 검증	210
다. WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 개선 용역 사업 지원	219
(1) 목적 및 기대효과	219
(2) 사업 수행 내용	219
5. 요약 및 결론	221
사사	224
References	225
부록 A. 현업 장기예보 생산을 위한 관련 회의 참여 및 자료 지원	237
부록 B. 현업 활용을 위한 관측 기반 기후 분석 및 기후 예측 모델 특성 분석 Fact Sheet	261
부록 C. WMO 장기예보 선도센터 계절예측에 사용된 검증 기법	270
부록 D. 개인정보처리시스템 접근권한 관리 기준	275
부록 E. WMO 장기예보 선도센터 만족도 조사 설문 문항 및 결과	278

표 차례

Table	page
Table 1. List of typhoon name for typhoon-related precipitation events in PosKP+PosWNP and PosKP+NegWNP categories	23
Table 2. Extreme temperature cases, and the temperature and rank (based on 1973-2018) of the each case.	35
Table 3. climate indexes	93
Table 4. Cross correlation between south Korea temperature and climate indices	96
Table 5. Parameter estimation of south Korea temperature prediction	96
Table 6. Comparison of third quartile predictions between MME and Prophet models	97
Table 7. Model validation of 3-month temperature prediction in south Korea	98
Table 8. Selected indices without multi collinearity among December 50 indices	101
Table 9. Parameter estimation of south Korea December temperature	101
Table 10. Hit rate and hss in December temperature forecast	102
Table 11. Selected indices without multi collinearity among January 50 indices	104
Table 12. Parameter estimation of south Korea January temperature	104
Table 13. Hit rate and hss in January temperature forecast	105
Table 14. Selected indices without multi collinearity among February 50 indices	107
Table 15. Parameter estimation of south Korea February temperature	107
Table 16. Hit rate and hss in February temperature forecast	108
Table 17. TCC and HSS hindcast forecast skill for temperature/precipitation of South Korea for different lead times. Hindcast period is 1983-2005 for Jan-Oct and 1983-2010 for Nov-Dec. Red shading indicates 90% confidence level in TCC and positive value in HSS.	112
Table 18. Forecast and verification of South Korea precipitation in Apr 2019. AN, NN, and BN indicate Above Normal, Near Normal, and Below Normal.	125
Table 19. Forecast and verification of South Korea precipitation in Nov 2018. AN, NN, and BN indicate Above Normal, Near Normal, and Below Normal.	137
Table 20. Forecast and verification of South Korea precipitation in Dec 2018. AN, NN, and BN indicate Above Normal, Near Normal, and Below Normal.	147
Table 21. Comparison of observation and forecast for South Korea precipitation.	147

Table 22. Configuration of ECMWF seasonal-to-subseasonal prediction.	171
Table 23. Characteristics of seasonal forecast model from GPCs.	185
Table 24. Reanalysis data used for verification of real-time forecast.	187
Table 25. Reanalysis data used for verification of hindcast.	188
Table 26. Improvements of long-range forecast system from GPC Toulouse.	193
Table 27. Improvements of long-range forecast system from GPC Montreal.	194
Table 28. The list of participating RCOF in 2019.	201
Table 29. Characteristics of GPC data for WMOLC-LRFMME subseasonal prediction.	205
Table 30. Operational setup for subseasonal MME prediction system.	206
Table 31. Participating GPCs in subseasonal MME prediction each forecast.	207
Table 32. Used data list for subseasonal MME prediction system.	209

그림 차례

Figure	page
Figure 1. Daily Tmax variability averaged over 61 stations in Korea during July and August from 1979 to 2017.	4
Figure 2. The duration (bar graph) and the intensity (red line) of Korean heat wave cases obtained from Tmax averaged over 61 stations in Korea.	5
Figure 3. Composite anomalies of daily (a) 850hPa (shading) and 200hPa (contour) geopotential heights and (b) 2m air temperature for heat wave days.	7
Figure 4. (a) Scatter plot of normalized Z-wave index versus M-wave index and (b) the temporal distribution of Z-wave and M-wave.	8
Figure 5. Composite maps of 850hPa (shading) and 200hPa (contour) geopotential height anomalies and 2m air temperature (shading) and 850 hPa wind (vector) anomalies (a and b) for Z-wave and (c and d) for M-wave.	9
Figure 6. Composite maps of sea surface temperature (SST;shading) and outgoing longwave radiation (OLR;contour) anomalies (a) for Z-wave and (b) for M-wave.	10
Figure 7. The 5-day running averaged Tmax evolution over Korea during 10 days before and after relative to the start and end day of heat wave (a) for the Z-wave and (b) for the M-wave.	11
Figure 8. Composite maps of 850hPa geopotential height anomalies (shading) and wave activity fluxes (vector) from 15 days prior to onset up to 5 days after termination of Z-wave type heat wave.	13
Figure 9. Composite maps of outgoing longwave radiation (OLR) anomalies (shading), 850hPa geopotential height (contour), and wave activity flux (vector) 15 days prior to onset up to 5 days after termination of M-wave type heat wave.	14
Figure 10. Composite maps of 850hPa (shading) and 200hPa (contour) geopotential height anomalies and 2m temperature (shading) and 850hPa wind (vector) anomalies (a and b) based on CGT index and (c and d) for PJ index.	16
Figure 11. a) The correlation coefficients between precipitation anomalies averaged over 61 stations in Korea and WNPAC index from P32 to P49 during the period of 1979–2017 (black asterisks). b) Scatter plot of Korean precipitation anomalies and WNPAC index from P32 to P49 during 1979–2017.	19

Figure 12. Composite maps of (a and d) 850hPa geopotential height (contour) and precipitation (shading) anomalies, (b and e) vertically integrated (from surface to 300hPa) moisture transport (vector) and flux (shading) anomalies, (c and f) SST (shading) and 850hPa wind (vector) anomalies for (a-c) PosKP+PosWNP and (d-f) PosKP+NegWNP, respectively.21

Figure 13. Composite maps of seasonal (3-month) mean SST anomalies for a-c)PosKP+PosWNP and for d-f) PosKP+NegWNP from the preceding winter (DJF) to the following summer (JJA).22

Figure 14. Composite maps of 850hPa geopotential height (contour) and precipitation (shading) anomalies from 3-pentad prior to 2-pentad after the peak phase of PosKP+PosWNP. ...24

Figure 15. Same figure as in Figure 14 but for the PosKP+NegWNP case.25

Figure 16. Temporal evolution of Korean precipitation anomalies during 3-pentad before and 2-pentad after relative to the peak phase of PosKP+PosWNP (red bars) and that of PosKP+NegWNP (green bars).26

Figure 17. Same figure as in Figure 12 but for the NegKP+NegWNP and NegKP+PosWNP cases.27

Figure 18. Same figure as in Figure 13 but for the NegKP+NegWNP and NegKP+PosWNP cases.28

Figure 19. Same figure as in Figure 14 but for the NegKP+NegWNP case29

Figure 20. Same figure as in Figure 14 but for the NegKP+PosWNP case30

Figure 21. Same figure as in Figure 16 but for the NegKP+NegWNP and NegKP+PosWNP case.31

Figure 22. (Left) The number of days over 90 percentile of the daily maximum temperature in the month, (Right) the number of days under 10 percentile of the daily minimum temperature in the month.34

Figure 23. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Jun 2005, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Jun 2005 (dashed line indicates 90 percentile of temperature).36

Figure 24. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Jun 2005 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).37

Figure 25. (Left) Sea surface temperature (SST) anomalies, and (Right) outgoing longwave

radiation (OLR) anomalies in Jun 2005.	37
Figure 26. (Left) 850hPa geopotential height and wind, (Right) 850hPa temperature and wind in Jun 2005 (shading: anomaly, green contour: mean, vector: wind anomalies).	38
Figure 27. Time series of the area averaged 850hPa temperature anomalies (100–125E, 25–45N) and zonal wind anomalies (110–130E, 33–43N) over the eastern China for Jun.	38
Figure 28. Vertical distribution of the longitudinal averaged (105–120E) temperature anomalies (shading) and vertical wind anomalies (ω [Pa/s], black contour) in Jun 2005.	39
Figure 29. (Left) Snow cover anomalies for Mar–Apr 2005, and (Right) correlation between Mar snow cover and Jun temperature in South Korea.	40
Figure 30. Soil moisture anomalies in (Left) May and (Right) Jun 2005.	40
Figure 31. Linear regression of Jun 850hPa geopotential height with respect to the (Left) May and (Right) Jun soil moisture averaged over the eastern China (110–140E, 40–55N).	41
Figure 32. (Left) Composite map of Jun 850hPa geopotential height anomalies for the case of above than normal Jun temperature in South Korea. (Right) Linear regression of Jun 850hPa geopotential height with respect to the Jun temperature in South Korea.	41
Figure 33. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Jul and Aug 2018, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Jul–Aug 2018 (dashed line indicates 90 percentile of temperature).	42
Figure 34. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Jul–Aug 2018 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).	43
Figure 35. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Jul 2018.	44
Figure 36. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Aug 2018.	44
Figure 37. Linear regression of (Left) Jul and (Right) Aug 500hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the western Pacific (100–150E, 0–25N).	45
Figure 38. (Top) Composite maps of sea level pressure anomalies for the strongest monthly events of the PJ pattern (Fig.4(c) in Kosaka and Nakamura, 2006), (Bottom) sea level pressure anomalies in Jul 2018.	45
Figure 39. Vertical distribution of the longitudinal averaged (120–135E) vertical wind anomalies (ω [Pa/s], shading) in Jul 2018.	46
Figure 40. (Left) MJO phase during Jul–Sep 2018, and (Right) composite maps of precipitation	

anomalies for MJO phase in May-Sep.	46
Figure 41. Composite difference of geopotential height at 200hPa between positive and negative CGTI years for (Left) Jul and (Right) Aug.	47
Figure 42. Linear regression of (Left) Jul and (Right) Aug 200hPa geopotential height with respect to the CGTI.	47
Figure 43. Linear regression of (Left) Jul and (Right) Aug 200hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the northwestern area of India (70–85E, 20–30N).	48
Figure 44. Distributions of the North Atlantic sea surface temperature anomalies in Jul 2018. Box area is used for the north Atlantic tripole SST index.	49
Figure 45. Time series of (Left) the north Atlantic tripole SST index for Jul, and (Right) the index from Jan 2017 to Dec 2018.	49
Figure 46. (Left) North Atlantic Oscillation (NAO) index and (Right) Arctic Oscillation (AO) index from Jul 2016 to Feb 2019.	49
Figure 47. Linear regression of the Jul 200hPa geopotential height with respect to the north Atlantic tripole SST index.	50
Figure 48. 200hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Jul 2018.	50
Figure 49. Geopotential height lines of 5820gpm, 5880gpm (yellow), 12480gpm, 12520gpm (red) in Jul and Aug 2018.	51
Figure 50. Hovmoller diagram of latitudinal averaged (30–38N) 200hPa geopotential height for (Left) Jul and (Right) Aug.	51
Figure 51. Linear trend of Jul 200hPa geopotential height for (Left) 1979–1998 period and (Right) 1999–2018 period.	51
Figure 52. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Aug 2016, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Aug 2016 (dashed line indicates 90 percentile of temperature).	52
Figure 53. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Aug 2016 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).	53
Figure 54. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Aug 2016	54
Figure 55. Geopotential height lines of 5820gpm, 5880gpm (yellow), 12480gpm, 12520gpm (red) in Aug 2016.	54

Figure 56. Linear regression of the Aug (Left) 200hPa and (Right) 500hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the central-western subtropical Pacific (140–190E, 10–30N).55

Figure 57. Distributions of the North Pacific SST (contour) and OLR (shading) anomalies in Aug 2016.56

Figure 58. (Top) Time series of the normalized 500hPa geopotential height anomalies averaged over the Kamchatka peninsula (150–175E, 40–60N) and the mean temperature in South Korea for Aug. (Bottom) Aug mean temperature in South Korea for the strongest year of the top panel.57

Figure 59. (Left) 200hPa and (Right) 850hPa temperature and wind anomalies for 2016.8.5.–8.25 (shading: anomalies, green contour: mean, vector: wind)57

Figure 60. 200hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Aug 2016. 57

Figure 61. Vertical distribution of the longitudinal averaged (65–85E) temperature anomalies (shading) and vertical wind anomalies (ω [Pa/s], black contour) in Aug 2016.58

Figure 62. (Left) Snow cover anomalies for Mar–Apr 2016, (Right) soil moisture anomalies for May–Jun 2016.59

Figure 63. Linear trend of Aug 200hPa geopotential height for (Left) 1979–1998 period and (Right) 1999–2018 period.59

Figure 64. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Dec 2012, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Dec 2012 (dashed line indicates 10 percentile of temperature).60

Figure 65. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Dec 2012 (shading: anomaly, black contour: mean, green line: climatology).61

Figure 66. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Dec 2012.62

Figure 67. Linear regression of (Left) 2m temperature and (Right) sea level pressure with respect to the 500hPa geopotential height averaged over the Ural Mountains (40–90E, 55–80N) for Dec.62

Figure 68. (Top) Time series of the normalized 500hPa geopotential height anomalies averaged over the Ural Mountains (40–90E, 55–80N), mean temperature in South Korea, and AO index for Dec. (Bottom) Dec mean temperature and AO index for the strongest year of the

geopotential height anomalies in the top panel.	63
Figure 69. Time series of Arctic sea ice extent anomalies for (Top) Sep–Nov mean and (Bottom) Dec.	64
Figure 70. (Left) Arctic sea ice concentration anomalies and (Right) 2m temperature anomalies in Dec 2012.	64
Figure 71. Correlation maps for the (Left) surface air temperature, and regression maps for the (Middle) sea level pressure and (Right) 300hPa geopotential height on the ART1 index during Dec–Feb for the period 1979/1980–2013/2014.	65
Figure 72. 300hPa wave–activity flux (vector) and stream function (shading) in Dec 2012.	65
Figure 73. Linear regression of (Left) 850hPa and (Right) 200hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the eastern Indian ocean to the western Pacific (70–120E, 10S–15N) for Dec.	66
Figure 74. (Top) Time series of the normalized OLR anomalies averaged over the eastern Indian ocean to the western Pacific (70–120E, 15S–15N) and mean temperature in South Korea for Dec. (Bottom) Dec mean temperature and Nino3.4 index for the strongest year of convection in the top panel.	66
Figure 75. Oct snow advanced index for Eurasia and winter AO index.	67
Figure 76. Snow cover anomalies in Sep to Dec 2012.	67
Figure 77. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Jan 2011, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Jan 2011 (dashed line indicates 10 percentile of temperature).	68
Figure 78. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Jan 2011 (shading: anomaly, black contour: mean, green line: climatology).	69
Figure 79. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Jan 2011.	70
Figure 80. Time series of East Asian winter monsoon index for Jan.	71
Figure 81. Linear regression of 500hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the subtropical western Pacific (110–150E, 0–20N) for (Left) Dec and (Right) Jan.	72
Figure 82. Precipitation (shading) and 850hPa wind anomalies (vector) in Jan 2011.	72
Figure 83. Composite maps of Jan 850hPa geopotential height anomalies for (Left) the strong Indian ocean convection cases and (Right) the strong western Pacific convection cases.	72

Figure 84. (Top) Time series of the normalized OLR averaged over the Indian ocean (80–100, 5–15N) and western Pacific (110–140, 0–20N), and mean temperature in South Korea. (Bottom) Jan mean temperature and Nino3.4 index for the strongest year of the (Left) Indian ocean convection and (Right) western Pacific convection.73

Figure 85. Composite maps of 500hPa geopotential height anomalies (contour) and standardized anomalies of surface air temperature (shading) under different combinations of the AO and ENSO.74

Figure 86. Time series of AO index (bar), NAO index (orange line), and NPO index (green line) from Jan 2009 to Aug 2011.74

Figure 87. Time series of Arctic sea ice extent anomalies for (Top) Sep–Nov mean and (Bottom) Jan.75

Figure 88. Arctic sea ice concentration anomalies in (Left) Dec 2010 and (Middle) Jan 2011, and (Right) 2m temperature anomalies in Dec 2010–Jan 2011.75

Figure 89. Time series of sea surface temperature anomalies averaged over the northwestern Atlantic (65–45W, 45–70N) for Dec and Jan, and North Atlantic Oscillation (NAO) index for Jan.76

Figure 90. (Left) The 15-year moving correlations between the ENSO and four East Asian winter monsoon indices. (Right) The standardized PDO (solid) and AMO (dashed) indices. 76

Figure 91. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Feb 2012, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Feb 2012 (dashed line indicates 10 percentile of temperature).77

Figure 92. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Feb 2012 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).78

Figure 93. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Feb 2012.79

Figure 94. Linear regression of (Left) 2m temperature and (Right) sea level pressure with respect to the 500hPa geopotential height averaged over the Ural Mountains (40–90E, 55–80N) for Feb.79

Figure 95. Time series of daily mean temperature anomalies in South Korea and area averaged (100–120E, 40–50N) sea level pressure anomalies in Feb 2012.80

Figure 96. Time series of Arctic sea ice extent anomalies for (Top) Dec and (Bottom) Aug

2011-Mar 2012.	81
Figure 97. Arctic sea ice extent anomalies in (Left) Dec 2011 and (Middle) Feb 2012, (Right) 2m temperature anomalies in Feb 2012.	81
Figure 98. 300hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Feb 2012.	82
Figure 99. Linear regression of 500hPa geopotential height with respect to the 2m temperature averaged over the (Left) Barents-Kara sea (30-90E, 65-85N) and (Middle) Bering sea (150-210E, 65-85N) for Feb. (Right) 500hPa geopotential height anomalies in Feb 2012.	82
Figure 100. Time series of (Top) monthly AO index during Feb 2010-Sep 2012, and (Bottom) daily AO index (bar) and NAO index (green line) from Jan 2012 to Feb 2012.	83
Figure 101. MJO phase during Jan-Mar 2012.	84
Figure 102. Time series of the normalized OLR anomalies (bar) averaged over the Indian ocean (65-105E, 5S-15N) and western Pacific (105-140E, 0-15N), and mean temperature (line) in South Korea for Feb. (Bottom) Feb mean temperature and Nino3.4 index for the strongest year of the (Left) Indian ocean convection and (Right) western Pacific convection.	84
Figure 103. Composite maps of 850hPa geopotential height anomalies for the strongest year of the (Left) Indian ocean (65-105E, 5S-15N) convection and (Right) western Pacific (105-140E, 0-15N) convection.	85
Figure 104. ASOS 45 stations	92
Figure 105. Detection of Korea temperature change points using Prophet model	94
Figure 106. Cross correlation between Korean temperature and climate indexes	95
Figure 107. Comparison of anomaly temperature between Prophet model and MME(1-month Lead forecast)	98
Figure 108. Comparison of anomaly temperature between Prophet model and MME(3-month Lead forecast)	99
Figure 109. Result of temperature Prediction with trends and seasonality in south Korea ..	99
Figure 110. 50 climate indices affecting Korea December temperature in variable importance of random forest	100
Figure 111. Correlation between OBS and FCST in December prediction	102
Figure 112. 50 climate indices affecting Korea January temperature in variable importance of random forest	103

Figure 113. Correlation between OBS and FCST in January prediction	105
Figure 114. 50 climate indices affecting Korea February temperature in variable importance of random forest	106
Figure 115. Correlation between OBS and FCST in February prediction	108
Figure 116. APCC MME forecast table for Mar–May 2019. Issued in Feb 2019.	111
Figure 117. APCC MME forecast table for Apr–Jun 2019. An asterisk indicates significance at 90% level or above/below the climatological value.	114
Figure 118. 1-month lead APCC MME precipitation forecast for Apr 2019.	114
Figure 119. 1-month lead precipitation forecast skill table for Apr 2019.	115
Figure 120. Correlation maps for the (a) GPCPv.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 precipitation on the South Korea precipitation in Apr.	117
Figure 121. Correlation maps for the (a) NOAA OISST v.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 sea surface temperature on the South Korea precipitation in Apr.	119
Figure 122. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 850hPa wind (vector) and wind speed (shading) on the South Korea precipitation in Apr.	120
Figure 123. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 500hPa geopotential height (shading) and 200hPa wind (vector) on the South Korea precipitation in Apr.	121
Figure 124. Correlation maps for the (a) SST, (b) 850hPa wind (vector) and wind speed (shading), (c) 200hPa wind (vector) and 500hPa geopotential height (shading) in POAMA model on the South Korea precipitation in Apr.	122
Figure 125. TCC skill map of POAMA compared with GPCP v.2 in Apr.	123
Figure 126. Distributions of total precipitation and precipitation percentile in Apr 2019.	123
Figure 127. Distributions of (a) GPCP v.2 total (contour) and anomalous (shading) precipitation, (b) NOAA OISST v.2 total (contour) and anomalous (shading) SST, (c) NCEP R2 850hPa wind anomalies (vector) and wind speed anomalies (shading) in Apr 2019.	124
Figure 128. APCC MME forecast table for Nov–Jan 2018/2019.	126
Figure 129. 1-month lead APCC MME precipitation forecast for Nov 2018.	127
Figure 130. 1-month lead precipitation forecast skill table for Nov 2018.	127
Figure 131. Correlation maps for the (a) GPCPv.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 precipitation on the South Korea precipitation in Nov.	129
Figure 132. Correlation maps for the (a) NOAA OISST v.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 sea	

surface temperature on the South Korea precipitation in Nov.	130
Figure 133. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 850hPa wind (vector) and wind speed (shading) on the South Korea precipitation in Nov.	131
Figure 134. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 500hPa geopotential height (shading) and 200hPa wind (vector) on the South Korea precipitation in Nov.	132
Figure 135. Correlation maps for the (a) SST, (b) 850hPa wind (vector) and wind speed (shading), (c) 200hPa wind (vector) and 500hPa geopotential height (shading) in POAMA model on the South Korea precipitation in Nov.	134
Figure 136. TCC skill map of POAMA compared with GPCP v.2 in Nov.	135
Figure 137. Distributions of total precipitation and precipitation percentile in Nov 2018.	135
Figure 138. Distributions of (a) GPCP v.2 total (contour) and anomalous (shading) precipitation, (b) NOAA OISST v.2 total (contour) and anomalous (shading) SST, (c) NCEP R2 850hPa wind anomalies (vector) and wind speed anomalies (shading) in Nov 2018.	136
Figure 139. APCC MME forecast table for Dec-Feb 2018/2019.	138
Figure 140. 1-month lead APCC MME precipitation forecast for Dec 2018.	138
Figure 141. 1-month lead precipitation forecast skill table for Dec 2018.	139
Figure 142. Correlation maps for the (a) GPCPv.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 precipitation on the South Korea precipitation in Dec.	140
Figure 143. Correlation maps for the (a) NOAA OISST v.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 sea surface temperature on the South Korea precipitation in Dec.	141
Figure 144. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 850hPa wind (vector) and wind speed (shading) on the South Korea precipitation in Dec.	142
Figure 145. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 500hPa geopotential height (shading) and 200hPa wind (vector) on the South Korea precipitation in Dec.	143
Figure 146. Correlation maps for the (a) SST, (b) 850hPa wind (vector) and wind speed (shading), (c) 200hPa wind (vector) and 500hPa geopotential height (shading) in POAMA model on the South Korea precipitation in Dec.	144
Figure 147. TCC skill map of POAMA compared with GPCP v.2 in Dec.	145
Figure 148. Distributions of total precipitation and precipitation percentile in Dec 2018.	145
Figure 149. Distributions of (a) GPCP v.2 total (contour) and anomalous (shading) precipitation,	

(b) NOAA OISST v.2 total (contour) and anomalous (shading) SST, (c) NCEP R2 850hPa wind anomalies (vector) and wind speed anomalies (shading) in Dec 2018.	146
Figure 150. Newly added 1-month lead precipitation outlooks generated by ESPreSSO-KR for 2019. Upper panels in the outlook shows forecasted monthly precipitation distribution (error-bars) and the observed monthly precipitation averaged over 49 stations (lines). ..	150
Figure 151. Same as Figure 150, but for 1-3 month lead temperature outlook.	151
Figure 152. Observed and predicted monthly precipitation.	151
Figure 153. Observed monthly mean temperature and 1~3 month lead predictions from ESPreSSO-KR.	152
Figure 154. Temporal correlation skills of ESPreSSO. Note that the predictors are identified from the former MME configuration.	152
Figure 155. Correlation coefficient between ECMWF hindcast MSLP and ASOS temperature each MAM, JJA and SON.	155
Figure 156. Analysis domain for Hovmoller diagram (Red box).	156
Figure 157. (left) Time-longitude Hovmoller diagram of ECMWF forecast on 7 May 2018, (center) ECMWF T2M forecast over Korea area and (right) KMA ASOS temperature.	157
Figure 158. Sample of time-longitude Hovmoller diagram	158
Figure 159. Selected area for daily time series forecast	159
Figure 160. Sample of daily time series forecast	159
Figure 161. Sample of PMME and each models probabilistic forecast table	160
Figure 162. Sample of APCC 1 month forecast verification table	162
Figure 163. A schematic diagram for taking the role of AO and ENSO into consideration.	165
Figure 164. Composite maps at lead-0 of EP case during boreal winter (DJF) for the period of 1983-2018.	167
Figure 165. Same figure as in Figure 164 but for LN case.	167
Figure 166. Same figure as in Figure 164 but for PA case.	168
Figure 167. Same figure as in Figure 164 but for NA case.	168
Figure 168. Mean temperature anomalies averaged over 45 stations in Korea with standard errors (green lines) for each case.	169
Figure 169. Negative AO index with mean temperature anomalies averaged over 45 stations in Korea.	170
Figure 170. Atmospheric circulation composite maps at lead-0 during negative AO (NA). ..	171

Figure 171. Skill of ECMWF S2S at forecasting the AO index as a function of lead time during winter.	172
Figure 172. Skill of ECMWF at forecasting SST anomalies over Niño 3.4 region as a function of lead time during winter.	173
Figure 173. Skill of ECMWF at forecasting the geopotential height anomaly pattern at 500 hPa over 20~90° N, 40° E~120° W for EP case from lead-4 to lead-1.	174
Figure 174. Same figure as in Figure 173 but for LN case.	175
Figure 175. Same figure as in Figure 173 but for PA case.	176
Figure 176. Same figure as in Figure 173 but for NA case	177
Figure 177. Mean 2m temperature anomalies with standard errors from ASOS data and ECMWF Hindcast from lead-4 to lead-1 for (a) EP, (b) LN, (c) PA and (d) NA case.	178
Figure 178. Functions of WMO LC-LRFMME.	181
Figure 179. A parametric Gaussian fitting method for estimate of tercile-based categorical probabilities.	184
Figure 180. Forecast procedures at WMO LC-LRFMME.	186
Figure 181. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SON2019.	188
Figure 182. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of precipitation for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SON2019.	189
Figure 183. PCCs of 2m temperature over globe from each individual GPCs and SCM MME as a function of target season, target month and lead time for the hindcast periods (1993–2009).	190
Figure 184. PCCs of precipitation over globe from each individual GPCs and SCM MME as a function of target season, target month and lead time for the hindcast periods (1993–2009).	191
Figure 185. Improvements of operational system at WMO LC-LRFMME in 2019.	192
Figure 186. Example of probabilistic forecast based on tercile categories for GPC Toulouse provided from WMO LC-LRFMME website.	196
Figure 187. Main page of improved WMO LC-LRFMME website.	197
Figure 188. Example of seasonal outlook table.	199

Figure 189. Example of precipitation probability forecast based on WMO LC-LRFMME. ...	200
Figure 190. Example of temperature probability forecast based on WMO LC-LRFMME.	200
Figure 191. The number of monthly visitors of WMO LC-LRFMME website in 2019.	202
Figure 192. The variables and covering periods of graphical products for subseasonal prediction.	210
Figure 193. Anomaly correlation coefficient (ACC) of weekly mean real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe.	212
Figure 194. Anomaly correlation coefficient (ACC) of monthly averaged 1 week real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe.	213
Figure 195. Anomaly correlation coefficient (ACC) of monthly averaged 3 weeks real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to July 2019 over the globe.	214
Figure 196. Root mean square error (RMSE) of weekly mean real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe.	216
Figure 197. Root mean square error (RMSE) of monthly averaged 1 week real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe.	217
Figure 198. Root mean square error (RMSE) of monthly averaged 3 weeks real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to July 2019 over the globe.	218

1. 서론

우리나라의 현업 장기예보는 11일 이상에 대한 예보를 일컬으며 기상청 기후예측과에서 제공한다. 장기예보는 주별 기반의 1개월 전망과 월별 기반의 3개월 전망, 그리고 계절 기반의 기후 전망으로 구성되는데, 1개월 전망은 11일 이후부터 4주까지의 기온과 강수량을 주별로 나누어 매주 목요일에 발표하고, 3개월 전망은 다음 월부터 3개월 동안의 기온과 강수량을 월별로 나누어 매월 23일경 발표한다. 한편, 계절 기후전망은 6개월의 기온, 강수량, 엘니뇨/라니냐 전망을 연 4회 발표하며 연 기후전망은 다음해에 대한 기온, 강수, 엘니뇨/라니냐 전망을 1년에 한 번 발표한다. 이러한 기후예측 정보는 수자원 및 에너지 수급 계획, 각종 계절 질환에 대한 예방, 재해 방재, 농업 및 수문학 등 다양한 분야에 활용되어 국민의 일상생활에 큰 영향을 미친다. 뿐만 아니라 최근에는 에너지 산업 또는 계절상품에 대한 마케팅 등 일선 산업 현장에서도 장기예보를 활용한 효율성 제고를 도모하고 있다. 이에 따라 최근에는 공공 및 민간 부분을 막론하고 신뢰도 높은 기후예측 정보에 대한 요구가 높아지고 있다.

장기예보는 기상청의 현업 기후예측 모델인 GloSea5 및 다양한 국외 기관의 모델 예측 결과와 우리나라 기온 및 강수 변동성과 관련된 관측자료 기반의 예측 인자를 바탕으로 종합 분석을 수행하여 생산된다. 한편, APEC기후센터(APEC Climate Center; APCC)는 다중모델 앙상블(Multi-Model Ensemble; MME)을 기반으로 한 기후 예측 전문기관으로 여러 국외 기관의 계절 예측 모형에 대한 MME 결과를 매월 기상청 내부 예보토의에 참석하여 공유하고 토의함으로써 현업 장기예보 생산에 참여하여왔다. 또한 2009년 구성된 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO) 장기예보 선도센터의 전반적인 현업 운영을 MME 계절예측 전문 기관인 APCC에서 2011년부터 수행함으로써 기상청의 현업 장기예보 업무에 크게 기여하여왔다. 또한 다양한 연구 과제를 통해 우리나라 기온 및 강수와 관련된 전 지구 기후 인자에 대한 분석과 과거 극한 기온 및 강수 사례에 대한 상세 분석을 수행하였고 이러한 연구 결과는 장기예보 가이드스 및 극한 기후 사례 분석집 등으로 출판되어 현업 장기예보 업무에 활발히 활용되고 있다.

이와 같이 APCC에서는 현업 장기예보 정확도 향상에 기여하기 위해 다양한 업무들을 수행하여 왔는데 이러한 업무들을 보다 효과적이고 효율적으로 관리하기 위해 2017년부터 이를 “현업 장기예보 정확도 향상을 위한 APCC-기상청 협력시스템 구축” 과제로 발굴하여 수행하여 왔다. 이 과제는 크게 네 가지 주제로 구성되는데 관측 자료 기반 우리나라 기후 특성 분석, 역학 모델 기반 우리나라 예측성 분석, APCC-기상청 업무 소통 강화를 위한 회의 지원, 그리고 WMO 장기예보 선도센터의 운영으로 이루어진다. 그간의 연구 수행을 통해 관측 기반 기후 분석의 경우 인도양 해수면 온도의 영향, 열대 서태평양부터 동아시아까지 여름철 강수 구조 분석, 장마 기간 강수량 장기 변화 특성 및 원인 분석, 우리나라 여름철과 겨울철 기온 강수 극값 사례 분석 등을 수행하여 다양한 기후 요소가 우리나라에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 역학 모델 기반 우리나라 예측성 분석을 통해 APCC MME를 기반으로 한 계절 예보 분석표를 개발하여 보다 객관화된 장기예보 생산에 기여하였으며 역학 모델에서 나타나는 서태평양 지역 예측 특성을 적용하여 우리나라 월별 강수 예측 모형을 개발하였다.

이와 함께 연구 결과들의 실질적인 현업 적용을 위하여 기후예측과에서 진행하는 실제 현업 장기예보 생산 회의에 직접 참여하고 있다.

이와 같이 이 과제 수행을 통해 APCC의 현업 장기예보 관련 업무가 효율적이고 체계적으로 관리되고 있으며 연구 결과들이 실제 현업 장기예보에 적극적으로 활용되는 등의 긍정적인 성과를 얻었다. 따라서 2019년도에도 이 과제의 수행을 통해 APCC와 기상청의 장기예보 정확도 향상을 위한 협력 시스템을 더욱 안정화 시키고 실제 장기예보 정확도 향상에 기여하고자 한다. 2019년도 역시 과제의 구조는 동일하게 관측 기반 기후 분석 및 과거 사례 심층 분석, 역학 모델 분석 및 예측 기술 개발, WMO 장기예보 선도센터의 운영, 기상청 현업 장기예보 회의 지원으로 이루어진다.

2장에 기술한 관측 기반 기후 분석 및 과거 사례 심층 분석은 네 가지 주제로 이루어진다. 먼저 우리나라 폭염 사례를 대기 순환 구조를 바탕으로 두 가지 타입으로 분류하여 각각의 특징과 모니터링 인자를 발굴하였다. 둘째로 우리나라 여름철 강수 특성 이해를 위해 북서태평양 아열대 고기압과의 관련성을 살펴보고 관련 모니터링 인자에 대해 연구하였다. 다음으로 여름철과 겨울철 우리나라 기온 극값 사례를 선정해 폭염과 한파와 같은 극한 기온이 발생한 원인에 대한 분석을 수행하였다. 마지막으로 계절성과 트렌드를 반영할 수 있는 통계 기법을 적용하여 우리나라 기온 예측 통계 모형을 구축하였다.

3장에는 역학 모델 분석 및 예측 기술 개발에 관한 사항을 기술하였는데 이는 다음과 같은 네 가지 주제로 이루어진다. 먼저 월별 강수 전망을 위해 역학 모형의 서태평양 순환 모의 특성을 분석하여 우리나라 강수와 관련성이 큰 월에 강수 예측 모형을 개발하였다. 둘째로 상세화 기법을 응용하여 한반도 계절 예측 전문가 시스템을 개발하였는데 이는 APCC MME를 기반으로 우리나라 기온 및 강수에 대한 예측 인자를 선정하여 상세화 기법을 적용한 것이다. 셋째로 1개월 전망 지원을 위한 예측 콘텐츠를 추가로 개발하여 계절내 예측자료의 현업 활용도를 높이고자 하였다. 마지막으로, 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 위상에 따른 우리나라 겨울철 주별 기온 특성과 이에 대한 계절내 예측 모델에서의 예측성에 대해 연구하였다.

4장에는 WMO 장기예보 선도센터 운영에 대한 전반적인 사항과 한 해 동안 진행된 시스템 개선에 관한 사항을 서술하였다. 또한 WMO 지역기후전망 포럼 참가, GSCU 발간, 계절내 기후예측자료 제공 등 WMO 장기예보 선도센터의 국내·외 역할을 서술하였다.

마지막으로 앞서 서술한 것과 같이 기상청의 현업 장기예보 업무를 실질적으로 지원하기 위하여 다양한 현업 장기예보 회의에 직접적으로 참여하였는데, 구체적인 회의 지원 사항은 다음과 같다. 매월 APCC MME를 기반으로 한 3개월 전망 예보토의 지원, 매주 WMO 계절내 예측정보를 기반으로 한 1개월 전망 예보토의 지원, 매월 사후 분석에 해당하는 우리나라 기후 특성과 전지구 기후시스템과의 연관성에 대해 분석하는 월 기후 분석 토의 지원, 그리고 여름철 방재기간 동안 기후 이슈 사전 감시를 위한 폭염 및 기압계 모니터링 정보 제공을 수행하였다. 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 또한 부록으로 첨부하였다.

2. 관측기반 기후분석 및 과거 사례 심층 분석

가. 대기 순환 구조에 따른 우리나라 폭염 분류 및 특성 분석

(1) 연구 배경

최근 전 세계적으로 빈번하게 발생하는 이상 기후 현상과 관련하여, 극심한 폭염의 발생은 사회 경제적으로 매우 큰 영향을 미치고 있다. 특히, 우리나라의 경우 2018년 여름철 매우 강한 폭염 발생으로 온열 질환자 발생이 크게 늘어나는 등, 사회 경제적 피해가 크게 발생하여 우리나라 폭염에 대한 과학적 이해뿐만 아니라 폭염에 선제적으로 대응할 수 있도록 폭염 관련 기후 예측 인자를 발굴하고자 하는 연구의 수요가 늘어났다. 2018년 폭염 이외에도 우리나라의 가장 대표적인 폭염 현상으로는 1994년, 2013년, 2016년 폭염을 들 수 있다. 1994년 폭염을 제외하면 극심한 폭염이 최근에 많이 발생하고 있다는 부분은 주목할 만한 사항이다.

기후적으로 폭염 발생의 가장 중요한 요소는 지속적이고 강한 고기압성 순환 형성으로 인한 단파 복사의 유입과 단열 승온 현상을 들 수 있다. 따라서 우리나라 폭염에 대한 기후적 이해를 증진시키기 위해서는 고기압성 순환 형성의 메커니즘을 규명할 필요가 있다. Lee and Lee (2016)의 선행연구에서는 남중국해의 대류활동 강화로 인한 로스비 파동 전파가 우리나라 지역에 고기압성 순환을 형성하면서 폭염을 유도하는 주요 메커니즘임을 제시 한 바 있다. 한편, 최근 연구에서는 동중국 지역의 폭염 발생이 북대서양 진동 (North Atlantic Oscillation; NAO)으로부터 유도되는 로스비파동 전파가 유라시아 지역을 통과하면서 연속적인 고-저기압성 순환을 만들며 동아시아 지역으로 고기압성 편차가 형성되면서 폭염이 유도될 수 있음을 제시하였다(Gao et al., 2018).

위와 같은 선행 연구 결과들을 종합해 보면, 우리나라 폭염을 유도하는 고기압성 순환의 형성은 중위도 파동 전파에 의한 메커니즘과 아열대 서태평양 대류 활동 강화에 의한 메커니즘으로 분류할 수 있다. 여름철 중위도 파동 전파와 관련하여 대표적인 원격 상관 패턴으로 잘 알려진 현상은 Circumglobal teleconnection pattern (CGT) (Ding and Wang, 2005)을 들 수 있다. CGT 패턴의 발생 및 유지 메커니즘으로는 인도 여름 몬순 강화로 인한 열원 발생과, NAO 발생이 제시되었다(Ding and Wang, 2005, Lin et al., 2016). 한편, 아열대 서태평양 대류활동 강화로 인한 대표적인 원격 상관 패턴은 Nitta (1987)에 의해 제안된 Pacific-Japan (PJ) 패턴을 들 수 있다. CGT 패턴과 PJ 패턴의 발생 메커니즘과 그 구조는 서로 매우 다르지만, 우리나라 지역에 변동성의 중심이 나타난다는 점에서 우리나라 폭염 발생에 영향을 미칠 수 있을 것이다. 따라서 이 연구에서는 우리나라 폭염 사례를 추출하고, 대기 순환 구조를 바탕으로 중위도 파동 전파와 관련한 폭염 사례와, 아열대 서태평양 대류 강화와 관련한 폭염 사례를 분류하고 각각의 물리적 특징과 기후적 감시 요소를 발굴하고자 한다.

(2) 자료와 방법

우리나라 폭염 특성 분석을 위해 기상청에서 제공하는 중관기상관측시스템(Automated

Synoptic Observing System, ASOS)의 61개 지점을 평균한 1979년부터 2017년까지 일 최고기온 (T_{max}) 자료를 사용하였다. 이와 관련하여 대규모 순환장의 특징을 살펴보기 위해, National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy (NCEP/DOE) reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) 자료의 대기 순환자료를 이용하였으며, 일별 해수면 온도(Sea Surface Temperature; SST) 자료와 상향 장파복사(Outgoing Longwave Radiation; OLR) 자료는 각각 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Optimum Interpolation SST (Reynolds et al., 2002) 자료와, NOAA daily interpolated OLR (Liebmann and Smith, 1996) 자료를 사용하였다.

우리나라 폭염 사례 추출을 위해 기상청의 폭염 기준인 T_{max} 가 33°C 이상 2일 연속 지속된 사례를 선정하여 폭염으로 정의하였다. 또한, 이 연구의 주된 분석 방법으로는 폭염 사례에 대한 합성도 분석을 수행하여 그 특징을 살펴보았다. 이 때 통계적 유의성 검증은 Student t-test를 적용하였다.

(3) 우리나라 폭염의 일반적 특성

Figure 1은 우리나라 61개 station을 평균한 1979년부터 2017년까지 T_{max} 변동성을 나타낸다. 이 중 33°C 이상의 폭염 사례는 붉은 색으로 표시하였다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 T_{max} 변동성은 강한 경년 변동 뿐만 아니라 계절내 변동 성분을 나타낸다. 1994년 폭염을 제외하고는 대부분의 폭염 사례들이 7월 중순에서 8월 초순에 집중되어 나타나는 특징을 보이며, 1990년대 후반부터 2000년대 초반에는 폭염 발생이 비교적 적었던 반면, 2010년 이후 폭염 발생이 증가하는 특징을 보여준다.

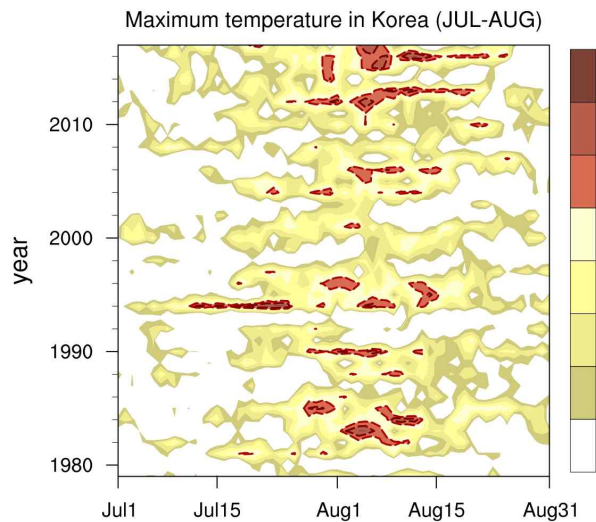


Figure 1. Daily T_{max} variability averaged over 61 stations in Korea during July and August from 1979 to 2017. The heat wave events when daily T_{max} exceeds 33°C at least two consecutive days are designated by red shadings.

우리나라 폭염 특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해서, 각 폭염 사례 별 지속 기간과 강도에 대하여 살펴보았다. Figure 2는 폭염 사례 별 시작 날짜를 x축에, 지속기간을 바 그래프로, 발생 기간 동안 T_{max} 값을 평균한 폭염 강도를 선 그래프로 나타낸 그림이다. 1979년부터 2017년까지 폭염 정의를 적용한 결과 총 156일의 폭염일이 추출되었고, 이는 29 사례의 폭염으로 이루어진다. Figure 2에서 확인할 수 있듯이 폭염 지속 기간은 2일에서 20일까지 매우 다양하게 나타난다. 가장 길게 지속된 폭염은 2016년 폭염으로 8월 5일부터 24일까지 지속되었다. 1994년 역시 폭염이 매우 길게 지속되었는데, 7월 12일부터 14일간, 그리고 8월 4일부터 6일간 지속되었다. 2012년과 2013년 역시 폭염 지속기간이 14일로 상당히 길게 나타났다. 폭염의 강도는 1994년 폭염이 가장 강하게 나타났는데, 이와 같이 1994년 폭염은 매우 강한 강도와 긴 지속기간을 보이면서, 대표적인 폭염 사례로 기록되고 있다. 그러나 상대적으로 폭염 지속 기간이 길었던, 2012년, 2013년, 2016년 폭염의 경우 중간 정도 강도를 나타낸 반면, 폭염 지속 기간이 중간 정도였던 1983년, 1983년, 2017년 폭염의 경우 각각 두 번째, 세 번째, 네 번째 로 강한 폭염 강도를 나타냈다. 실제로 폭염 지속 기간과 강도 사이의 상관계수는 0.43으로 항상 강한 강도의 폭염이 오래 지속되는 것은 아니고, 마찬가지로 오래 지속되는 폭염이 강한 강도로 나타나는 것은 아니다.

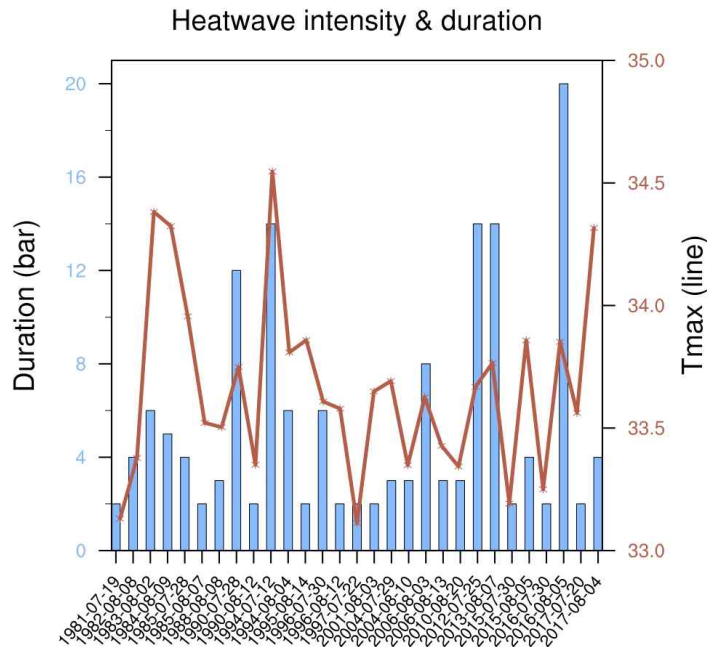


Figure 2. The duration (bar graph) and the intensity (red line) of Korean heat wave cases obtained from T_{max} averaged over 61 stations in Korea. The x axis indicates starting date of each heat wave case.

우리나라 폭염과 관련한 대규모 순환장의 특징을 살펴보기 위해 850hPa과 200hPa

지위고도 편차장, 2m 기온 편차장에 대하여 폭염 사례에 대한 합성도 분석을 수행하였고, 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. 연구 배경에서 언급한 바와 같이 폭염 발생과 관련하여 가장 중요한 요소는 폭염 발생 지역에 발달하는 고기압성 순환이다. 실제 Figure 3a에 나타난 바와 같이 우리나라 폭염과 관련하여 850hPa과 200hPa 지위고도장에서 우리나라 지역으로 뚜렷한 고기압성 편차를 확인할 수 있다.

우리나라 지역의 barotropic 구조의 고기압성 순환과 관련해서 주변 지역의 기압계 패턴의 특징을 좀 더 자세하게 살펴보면, 먼저 우리나라 고기압성 순환 남쪽 아열대 북서태평양 지역에서 저기압성 순환과 북쪽 오호츠크 지역에서 고기압성 순환이 나타나면서 남-북 방향 파동 구조를 이루고 있다. 이러한 구조는 아열대 서태평양 지역에서 대류 활동으로부터 기인한 동아시아로의 원격상관 패턴(Kosaka and Nakamura, 2006) 형성의 가능성을 암시하고 있다. 특히, 아열대 서태평양의 저기압성 순환은 850hPa 지위고도 편차에서만 나타나는 baroclinic한 구조로서, 이는 Kosaka and Nakamura (2006)가 제시한 PJ 패턴의 구조와 일치하는 결과이다. 한편, 남-북방향 원격 상관 패턴 이외에 또 한가지 주목할 만한 순환 구조는, 유라시아 대륙을 가로지르는 동-서방향 파동형태 대기 순환 구조와, 북대서양 지역의 양의 NAO-like 패턴을 들 수 있다. 상-하층 지위고도 편차장의 특징뿐만 아니라 2m 기온 편차장 역시 이와 유사한 구조를 나타내는데, 유라시아 대륙으로 고온-저온-고온 편차의 특징과, 우리나라와 일본, 중국 동부지역으로 강한 고온 편차, 즉 폭염 형태를 나타낸다.

종합하면, 우리나라 폭염과 관련한 대규모 순환장의 특징은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 유라시아 대륙을 가로지르는 동-서 방향 파동형태 순환과, 두 번째는 아열대 서태평양부터 동아시아까지 남-북 방향 파동형태 순환이다. 이러한 특성을 구분해서 살펴보기 위해서 850hPa 지위고도 편차장을 바탕으로 간단한 지수를 설계하였다. 즉, 동-서 방향 파동형태 폭염 지수(Zonal wave index; Z-wave index)를 우리나라-일본 지역(30-40° N, 120-150° E) 영역 평균한 850hPa 지위고도 편차값에서 중동 지역(45-55° N, 50-80° E)을 빼고, 유럽 지역(50-60° N, 10-40° E)을 더한 값으로 설정하였으며, 남-북 방향 파동형태 폭염 지수(Meridional wave index; M-wave index)는 우리나라-일본 지역(30-40° N, 120-150° E)에서 아열대 서태평양 지역(15-25° N, 120-150° E) 평균한 편차 값을 뺀 값으로 설정하였다. 각 지역은 Figure 3a에 A, B, C, D로 표기하였다.

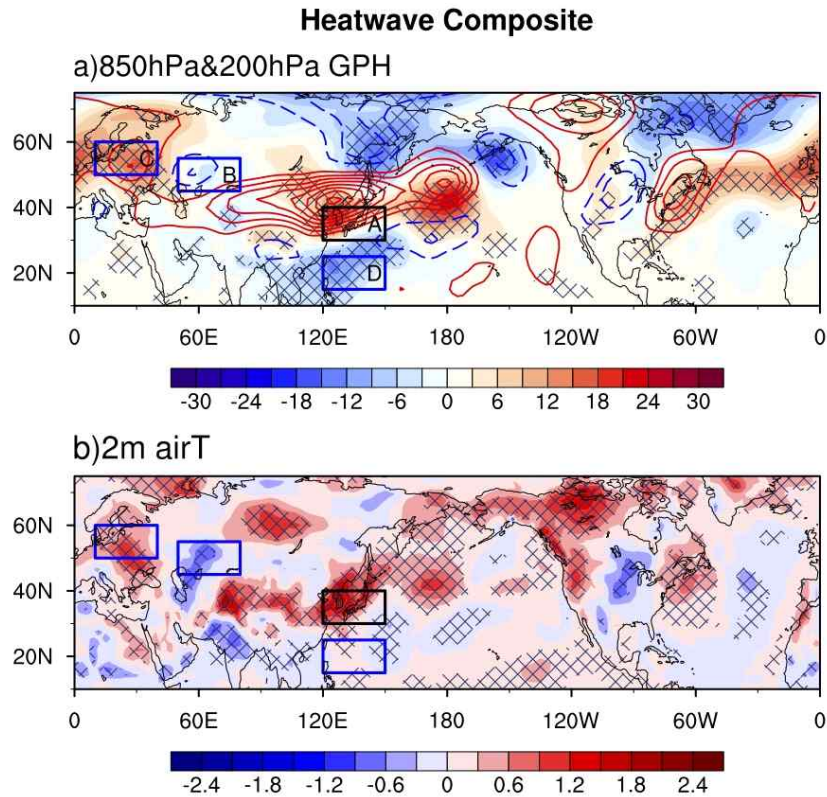


Figure 3. Composite anomalies of daily (a) 850hPa (shading) and 200hPa (contour) geopotential heights and (b) 2m air temperature for heat wave days. The statistically significant anomalies at 95% confidence level are indicated by diagonal lines. The boxes indicate regions used for defining indices.

(4) 대기 순환 구조에 따른 두 가지 타입의 폭염 특성

대기 순환 구조에 따라서 폭염을 분류하기 위해 위와 같이 Z-wave index와 M-wave index를 설정하였다. Figure 4a는 두 인덱스의 scatter plot을 나타낸다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, 대부분의 폭염 사례들이 Z-wave나 M-wave가 양의 위상인 1,2,4 사분면에 위치하는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 Z-wave 타입의 폭염과 M-wave 타입의 폭염을 분류하기 위해 각 인덱스가 0.5 표준편차이상이며, M-wave 인덱스 값보다 Z-wave 인덱스가 큰 경우는 Z-wave 타입의 폭염으로, 반대로 M-wave 인덱스 값이 Z-wave 인덱스 값보다 큰 경우는 M-wave 타입의 폭염으로 분류하였다. 그 결과 총 156일의 폭염 사례 중 39일이 Z-wave 타입으로, 69일이 M-wave 타입으로 분류되었다. 각 타입의 시간 분포를 Figure 4b에 나타내었는데, 최근들어 푸른색으로 표시한 M-wave type의 폭염 발생이 증가하는 특징을 보여준다.

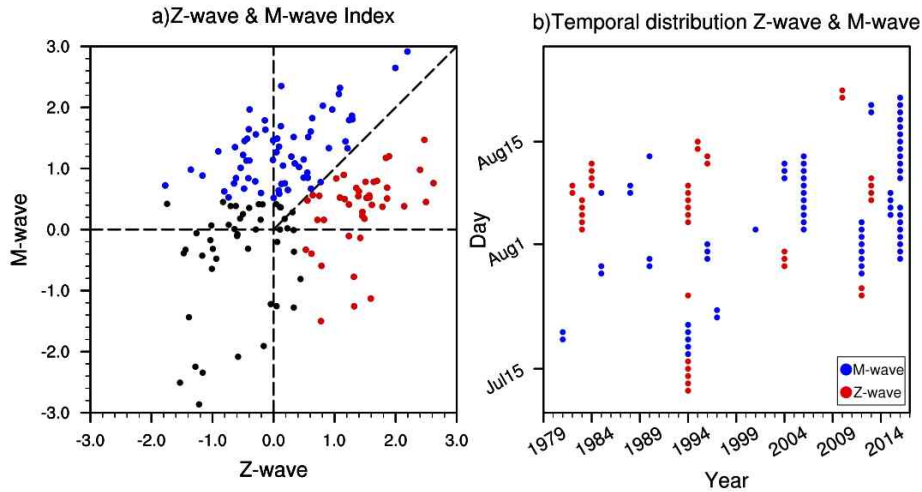


Figure 4. (a) Scatter plot of normalized Z-wave index versus M-wave index and (b) the temporal distribution of Z-wave and M-wave. The Z-wave (M-wave) type heat waves are designated by red (blue) dots and unclassified heat waves are plotted as black dots.

Z-wave와 M-wave 사례의 850, 200hPa 지위고도 편차와 2m 기온과 850hPa 바람 편차 합성도를 각각 Figure 5a~5d에 나타내었다. Figure 5a에 나타낸 Z-wave의 지위고도 편차장을 살펴보면, 그 정의에 따라 유라시아 대륙으로 고-저-고 기압의 뚜렷한 파동 형태의 순환 구조를 확인 할 수 있다. 특징적인 점은 대서양에 양의 NAO 신호가 나타나는 점인데, 이는 M-wave 합성장에서는 나타나지 않는 특징이다. 이 결과는 Z-wave에서 나타나는 유라시아 대륙의 파동형태 대기 순환장이 북대서양의 대기 변동성과 높은 관련성을 가진다는 것을 의미한다. Z-wave의 대부분의 고, 저기압 중심은 하층부터 상층까지 barotropic한 구조를 나타내는데, 중앙 아시아 지역의 하층 저기압은 상층 고기압과 연결된 baroclinic한 구조를 나타낸다. Z-wave의 2m 기온 편차장을 살펴보면 고기압성 편차 중심에서 고온 편차, 저기압성 편차 중심에서 저온 편차가 나타나는 등의 대기 순환장과 물리적인 일치성을 잘 나타낸다. Figure 5c에 나타낸 M-wave의 대기 순환 특징은 아열대 서태평양 지역에서 저기압성 순환, 우리나라지역에서 고기압성 순환이 나타난다. 이때 우리나라 주변의 고기압성 순환은 북태평양 지역까지 확장된 barotropic한 구조를 보이는 반면, 아열대 서태평양 지역에서는 상층 대기장에 뚜렷한 특징이 나타나지 않는다. 이는 이 지역의 하층 대기 순환장이 열적 대류활동으로부터 유도되었다는 것을 의미한다.

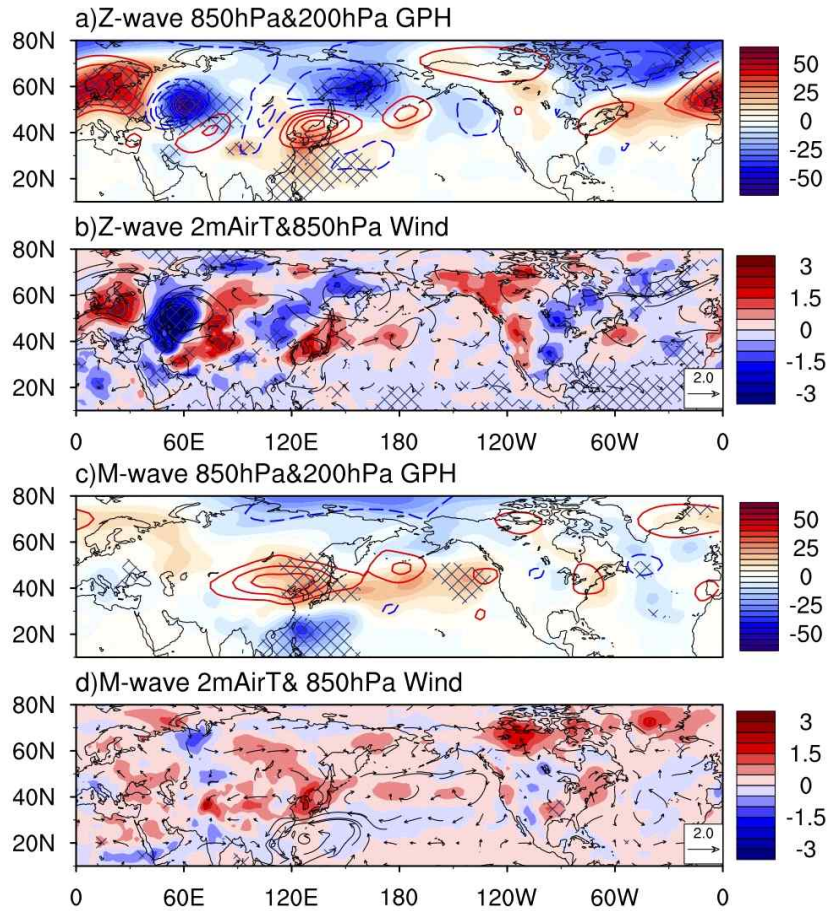


Figure 5. Composite maps of 850hPa (shading) and 200hPa (contour) geopotential height anomalies and 2m air temperature (shading) and 850 hPa wind (vector) anomalies (a and b) for Z-wave and (c and d) for M-wave. The statistically significant anomalies of 850 hPa geopotential height and 2m air temperature at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

Z-wave와 M-wave의 물리적인 특징을 보다 자세하게 살펴보기 위해 해수면 온도와 상향장파복사 편차장의 합성도를 Figure 6에 나타내었다. Z-wave와 M-wave 모두 우리나라 지역에 대류활동 억제 신호가 뚜렷하게 나타나고 이는 단파복사의 유입을 통한 기온 상승을 유도한다. 뿐만 아니라 두 가지 사례 모두 열대 동태평양에 약한 음의 해수면 온도 편차를 보이는데, 이는 강도는 약하지만 라니냐와 유사한 구조이다. 다수의 선행 연구에서 라니냐 일 때 여름철 동아시아 기온이 상승한다는 결과가 보고되었는데 이는 라니냐로 인한 열대 서태평양 대류활동 강화가 그 북쪽인 동아시아 지역의 대류활동 억제 및 고기압성 순환을 유도하는 것으로 그 메커니즘이 알려져 있다(Ueda et al., 1995; Wang et al., 2000; Wu et al., 2010; Yeo et al., 2017). 한편, 두 사례의 북대서양 해수면 온도 편차는 구별되는 특징을 보이는데, Z-wave에서는 아열대 지역과 그린란드 지역에서 음의 편차, 북미 서안에는 양의 편차인 Tripole 해수면 온도 패턴을 보이는데 이는 NAO 대기 순환 패턴과 관련하여 나타나는

해수면 온도 구조이다.

두 사례의 상향장파복사장의 특징을 살펴보면, Z-wave의 경우 대류활동 강화 신호가 벵갈만, 남아시아, 북인도 및 파키스탄지역에 나타난다. 이러한 특징은 선행연구에서 알려진 CGT 패턴과 매우 유사한데, 선행 연구에서는 인도-파키스탄 지역의 대류활동 강화가 CGT 패턴을 유도하는 wave source로 제시되었다(Ding and Wang 2005). 이는 중앙아시아 지역의 baroclinic한 대기 순환 구조와도 관련된 특징으로 인도 지역의 대류활동 강화가 wave source로 작용하였음을 뒷받침해주는 결과이다. 한편, M-wave의 상향장파복사장의 특징은 아열대 서태평양지역의 저기압성 순환 중심 지역에 대류활동 강화 신호가 나타나는 것인데, 이는 저기압성 순환과 관련된 하층대기 수렴현상이 대류활동 강화를 유도하고 이것이 다시 저기압성 순환을 유도하는 양의 되먹임 작용을 보여준다. 대류활동 강화 지역 북쪽인 우리나라-일본 지역으로 대류활동 억제 신호가 나타나면서 PJ 패턴과 유사한 남북방향 파동형태 순환구조를 보여준다.

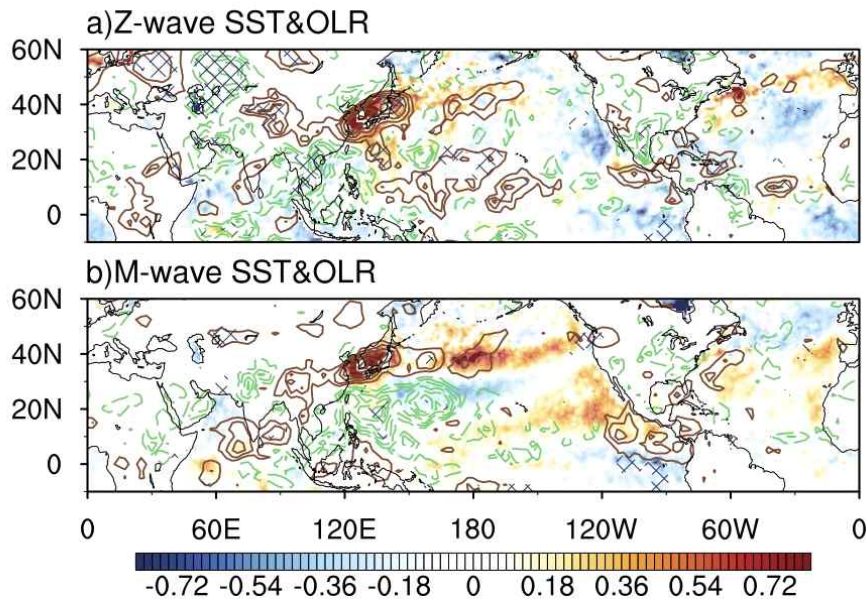


Figure 6. Composite maps of sea surface temperature (SST; shading) and outgoing longwave radiation (OLR; contour) anomalies (a) for Z-wave and (b) for M-wave. The statistically significant anomalies of OLR at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

(5) 두 가지 타입 폭염의 변동 과정

다음은 Z-wave와 M-wave의 발달 과정과 폭염 변동 특징을 살펴보았다. 이를 위해 각 폭염 발생 10일 전부터 10일 후까지 우리나라 최고기온의 변동성을 Figure 7에 나타내었다. 각 사례별 진화과정을 점선으로 나타내었고, 이들의 합성 결과를 실선으로 나타내었다. 이때 합성

결과는 발생 시점에 대한 평균을 함께 수행하여 표시하였고 또한 5일 이동 평균 결과를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 Z-wave 폭염의 경우 대체로 7월말에서 8월초에 발생하는 경향이 있는 반면 M-wave 폭염은 7월 중순부터 8월 중순까지 보다 넓은 범위의 발생 시점을 보여준다. 또한 Z-wave 폭염은 발생 10일 전부터 10일 후까지 검정 실선으로 표시한 기후값 보다 계속해서 높은 기온을 유지하는 반면 M-wave의 경우 폭염 최성기 전과 후에는 기온이 기후값 보다 내려가는 등 보다 큰 변동성을 나타낸다. 이는 Z-wave 폭염이 M-wave 폭염 보다 고온 현상이 더욱 길게 지속됨을 의미한다. Figure 7c에 나타난 두 타입 폭염의 합성 분석 결과를 살펴보면, Z-wave의 경우 폭염 최성기의 강도가 M-wave 보다 강하지만, 폭염 발생 전을 살펴보면 M-wave의 강도가 Z-wave보다 강한 특징을 보여준다.

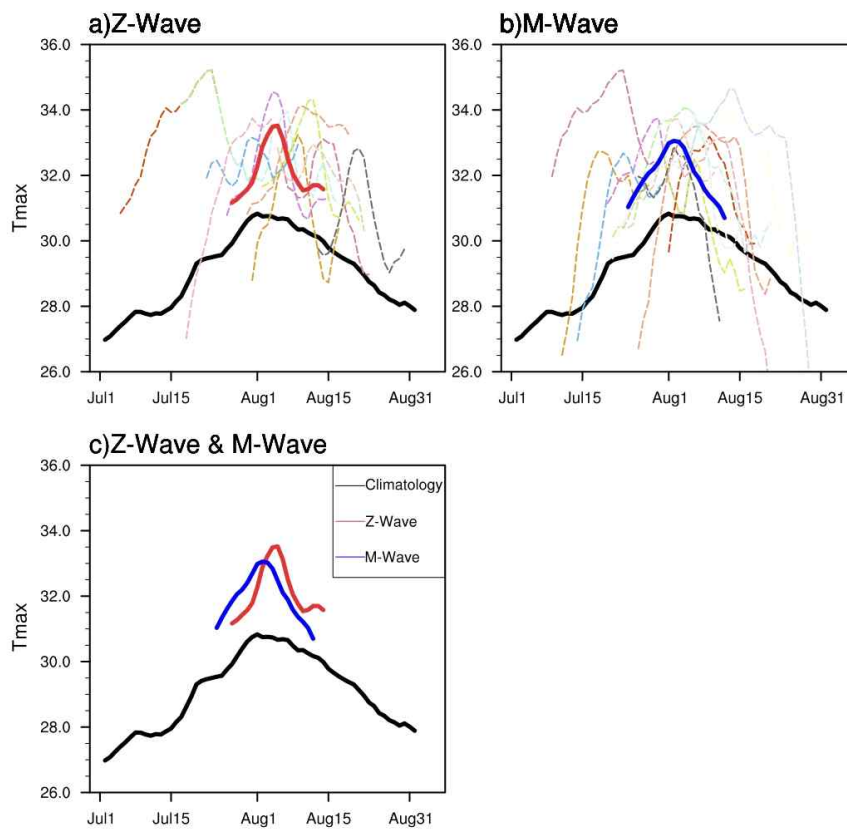


Figure 7. The 5-day running averaged T_{max} evolution over Korea during 10 days before and after relative to the start and end day of heat wave (a) for the Z-wave and (b) for the M-wave. The colored dotted lines denote the individual heat wave case that comprise the composites, and corresponding composite results are indicated by thick red line and blue line for Z-wave and M-wave, respectively. The climatology of T_{max} is also presented as black solid line. Composite of Z-wave and M-wave are plotted together with climatology in (c).

다음은 Z-wave와 M-wave 발생 전과 후의 대규모 대기 순환장의 진화 과정을 살펴보았다. 특히, 파동 전과 과정을 살펴보기 위해 horizontal wave activity flux를 Takaya and Nakamura (2001)의 선행 연구에서 제시된 방식을 적용하여 구하였다. Figure 8에 Z-wave 발생 전 15일부터 발생 후 5일 까지 850hPa 지위고도 편차장과 500hPa wave activity flux 편차장을 나타내었다. Z-wave 발생 15일 전부터 그린란드와 북대서양에서 뚜렷한 저기압성 순환이 나타난다. 이와 함께 나타난 wave activity flux를 살펴보면 이 저기압성 순환은 유럽의 고기압성 순환과 러시아의 저기압성 순환으로 이어지는 대기 파동의 한 부분이라는 것을 추측할 수 있다. 폭염 발생 10일 전 패턴을 살펴보면 이러한 파동 구조는 보다 조직화된 wave activity flux와 함께 더욱 강화된 구조를 보이는 것을 알 수 있다. 폭염 발생 5일 전에는 파동 구조가 보다 동진하면서 우리나라 지역으로 고기압성 순환이 발달하게 된다. 폭염 최성기에는 wave activity flux가 북대서양부터 동아시아까지 전파되는 동-서 방향 파동형태 구조가 매우 뚜렷하게 나타난다. 그러나 이러한 구조는 폭염 종료 5일 후 패턴에서는 더 이상 강하게 유지되지 않는다. 이 결과를 종합하면 Z-wave 폭염을 모니터링하기 위해서는 발생 15일 전부터 북대서양-유럽지역에서의 wave activity flux를 살펴 볼 필요가 있다는 것을 의미한다. 또한, Z-wave 폭염의 메커니즘이 선행연구에서 제시된 CGT 패턴의 메커니즘과 유사하다는 것을 고려했을 때 인도 북부 지역의 몬순 강화 현상 역시 모니터링 요소로 고려 할 필요가 있다. 최근 연구에서는 CGT 패턴과 관련하여 북대서양에서 기원하는 파동 구조가 동아시아까지 영향을 미치기 위해서는 인도 몬순 강화와 같은 열원이 작용을 하여야 함을 제시하는 등, 유라시아 지역 여름철 파동 형태 구조 형성에 북대서양과 인도 몬순의 복합 영향이 중요하게 작용함을 밝힌 바 있다(Lin et al., 2016; Monerie et al., 2018; Wu et al., 2016).

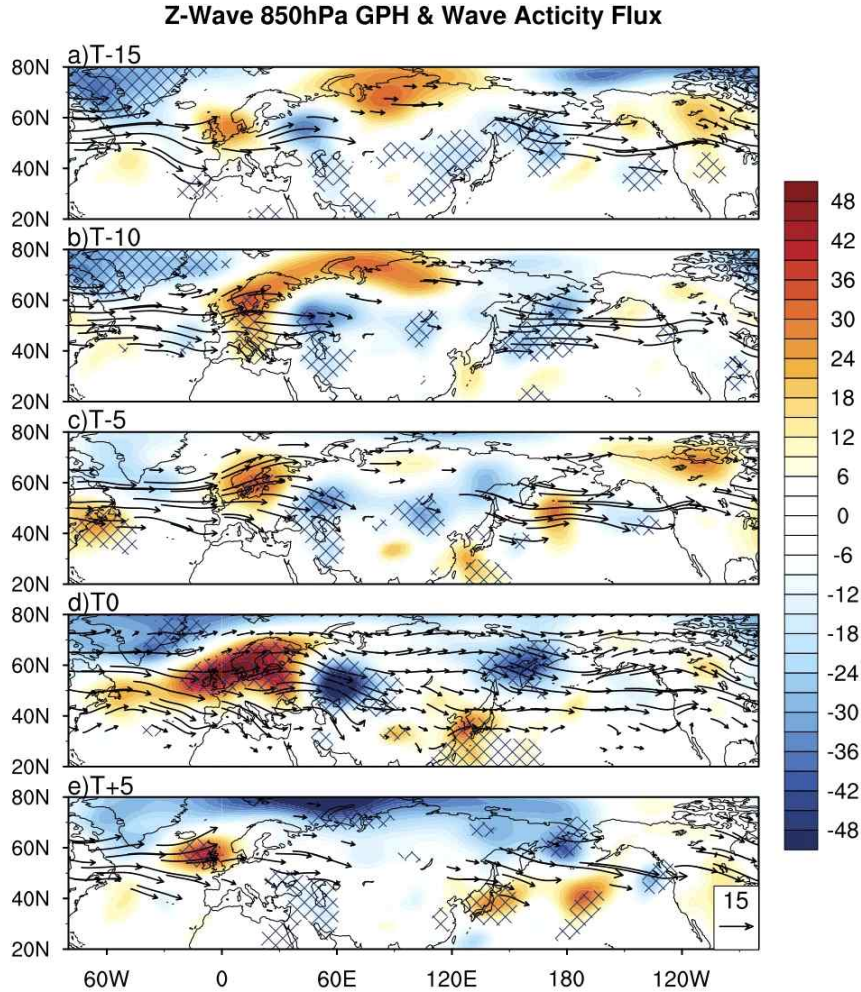


Figure 8. Composite maps of 850hPa geopotential height anomalies (shading) and wave activity fluxes (vector) from 15 days prior to onset up to 5 days after termination of Z-wave type heat wave. The statistically significant anomalies of 850hPa geopotential height at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

M-wave의 850hPa 지위고도장과 wave activity flux, 그리고 상향장과 복사 편차장의 발생 15일 전부터 종료 5일 후까지의 진화과정을 Figure 9에 나타내었다. 발생 15일 전에는 열대 서태평양 지역 Maritime Continent에서 대류활동 강화 신호가 나타나고 그 북쪽 아열대 서태평양 지역에서 억제 신호가 나타난다. 이러한 남-북 방향 대류활동 구조는 발생 10일 전이 되면서 더욱 강화되면서 북상하여 아열대 서태평양 지역에서 대류활동 강화가 나타나고 우리나라-일본지역에서 대류활동 억제 신호가 나타난다. 이와 같은 대류활동 구조에 따라 아열대 서태평양 지역에서는 저기압성 순환이, 우리나라-일본 지역으로는 고기압성 순환이 형성된다. 또한 발생 5일 전 패턴에서 아열대 서태평양에서 우리나라 지역으로 전파되는 wave activity flux를 확인 할 수 있다. 폭염 종료 후 5일 뒤에는 대기 순환 구조가 더욱 북상하면서 우리나라는 저기압성 순환의 영향을 받게 되면서 폭염이 종료되는 특징을 보인다. 결과를

종합하면, M-wave 폭염을 모니터링하기 위해서는 발생 15일 전부터 열대 서태평양 지역의 대류활동 강화 여부와 이의 복상을 확인할 필요가 있다.

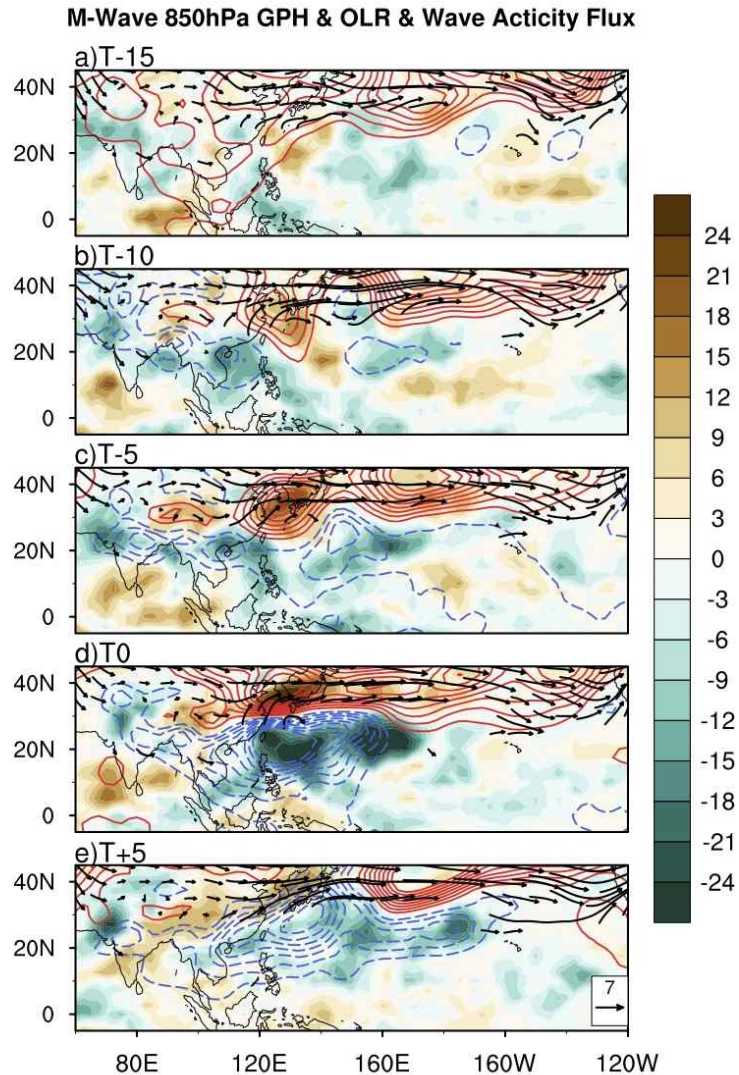


Figure 9. Composite maps of outgoing longwave radiation (OLR) anomalies (shading), 850hPa geopotential height (contour), and wave activity flux (vector) 15 days prior to onset up to 5 days after termination of M-wave type heat wave.

(6) 요약 및 결론

이 연구에서는 우리나라 폭염과 관련한 대규모 순환장의 특징을 바탕으로 폭염을 두 가지 타입으로 분류하고 그에 대한 물리적 특징과 기후적 모니터링 요소에 대해 살펴보았다. 먼저 Z-wave 폭염의 경우 유라시아 대륙을 가로지르는 파동형태의 대기 순환장이 특징적으로

나타나는데, 이는 선행연구에서 제시된 CGT 패턴의 메커니즘과 상당부분 유사하다. 예를 들면, 인도 몬순의 강화와 중앙아시아 지역의 baroclinic한 대기 구조 및 북대서양의 NAO-like 대기 순환 구조가 CGT 패턴과 Z-wave 폭염 특징의 유사점이다. M-wave 폭염은 아열대 서태평양부터 동아시아까지 남북방향의 파동 형태 대기 순환 구조를 보이는데, 이는 선행 연구에서 알려진 PJ 패턴의 메커니즘과 유사하다. 즉, 아열대 서태평양의 대류 활동 강화로 인해 유도된 열적 forcing이 Rossby 파동을 유도하여 동아시아 지역으로 고기압성 순환이 형성된다.

두 가지 타입의 폭염 발생 전과 후의 대기 순환 구조를 살펴봄으로써 모니터링 요소를 살펴보았다. Z-wave의 경우 발생 15일 전부터 북대서양의 NAO-like 대기 순환 구조와 관련 wave activity flux, 그리고 인도 몬순의 강화 여부 모니터링을 통해 폭염 발생 가능성을 확인할 수 있고, M-wave의 경우 열대 서태평양에서의 대류 활동 강화 신호가 북상하면서 아열대 지역으로 이동하는 특징을 모니터링 함으로써 우리나라 폭염 발생 가능성을 확인할 수 있다.

이 연구에서는 두 가지 타입의 폭염을 분류하기 위해 850hPa 지위고도 편차장을 영역 평균한 지수를 사용하였다. 이 때 영역의 선정이 주관적일 수 있어 폭염의 분류가 객관적이지 못하다는 우려가 있을 수 있다. 따라서 연구 결과의 객관성을 보다 공고히하기 위해서 선행 연구에서 사용된 CGT index와 PJ index를 활용하여 연구 결과를 다시 한 번 확인하였다. Figure 10에 나타난 결과를 살펴보면 Figure 5의 결과와 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있고, 이는 이 결과가 사용된 지수에 민감하지 않은 결과임을 제시한다. 이 연구에서는 주로 관측 자료를 기반으로 한 합성도 분석을 통해 우리나라 폭염의 특성을 분석하였다. 폭염의 물리적인 특징을 보다 자세하게 이해하고 기후예측에 활용도를 높이기 위해서는 역학 모델을 통한 메커니즘 규명 및 기후예측 모형에서의 두 가지 타입의 폭염 모의 성능 및 모니터링 요소에 대한 모의 능력을 추후 연구할 필요가 있다.

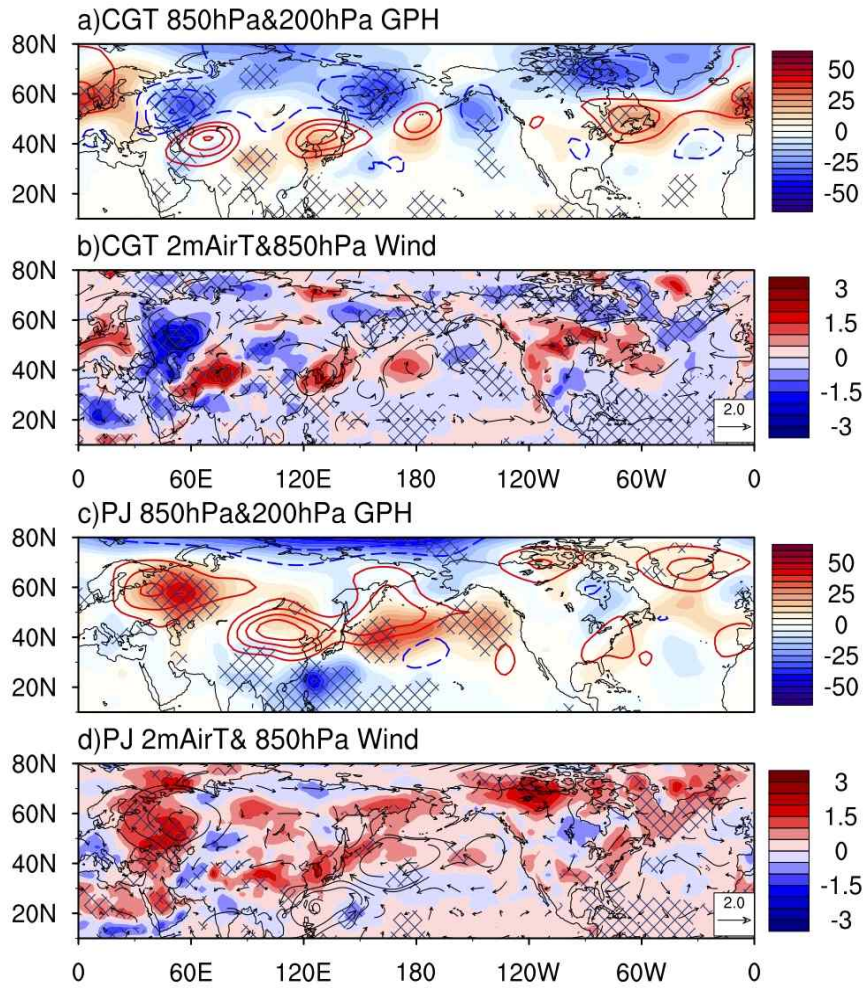


Figure 10. Composite maps of 850hPa (shading) and 200hPa (contour) geopotential height anomalies and 2m temperature (shading) and 850hPa wind (vector) anomalies (a and b) based on CGT index and (c and d) for PJ index. The statistically significant anomalies of 850hPa geopotential height and 2m air temperature at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

나. 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 비선형적 관련성

(1) 연구 배경

우리나라는 연 강수량의 반 이상이 여름철에 집중되어 나타나 사회 경제적으로 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 여름철 강수 변동성의 물리적 기작을 이해하고 장기 예측 성능을 향상시키기 위하여 많은 노력들이 있어왔다. 특히 선행 연구들에서는 우리나라 여름철 강수를 동아시아 여름 몬순 시스템의 일부로 이해하고 연구하여 왔다(Kang et al., 1999; Park et al., 2015). 많은 선행연구들에서 동아시아 여름몬순 변동성이 열대 지역 해수면 온도 변동성인 엘니뇨-남방진동(Nigam, 1994; Wang et al., 2000; Wu et al., 2003) 또는 인도양 해수면 온도 변동성(Guan and Yamagata, 2003; Li et al., 2008; Xie et al., 2009)과의 관련이 있음을 제시하였다. 특히, Wang et al. (2000)의 연구에서 엘니뇨-남방진동, 인도양 그리고 동아시아 여름몬순 관련성의 주요 메커니즘을 밝힌 바 있는데, 이들을 물리적으로 연결 시켜주는 핵심 요소는 북서태평양 지역의 아열대 고기압임을 제시하였다. 북서태평양 아열대 고기압은 엘니뇨 최성기 겨울철부터 나타나기 시작하여 봄철에 wind-evaporation-SST 되먹임 작용을 통해 최고로 발달한다. 이 때, 인도양 해수면 온도 상승으로부터 나타나는 에크만 발산과정에 의한 Kelvin 파동 전파가 나타나면 북서태평양 아열대 고기압이 여름철까지 지속되게 된다(Yang et al., 2007; Xie et al., 2009) 이와 함께 여름철 북서태평양 지경의 대류활동 강화 여부가 북서태평양 아열대 고기압의 발달 및 강도에 큰 영향을 미치게 되는데, 대부분의 경우 북서태평양부터 동아시아까지 남-북방향의 파동형태 대기 순환장으로 나타나게 된다. 이는 선행연구에서 밝힌 Pacific-Japan (PJ) pattern과 유사한 메커니즘이다(Nitta, 1987).

여름철에 북서태평양 아열대 고기압이 발달하면 그 가장자리의 남서기류를 따라 열대 지역에서 동아시아 지역으로 수증기가 공급되게 된다. 따라서 일반적으로 북서태평양 아열대 고기압이 발달하면 동아시아 여름 몬순이 강화되는 관계를 가진다. 이러한 관련성을 바탕으로 선행 연구에서는 북서태평양 아열대 고기압의 모니터링을 통한 동아시아 여름 몬순의 계절 예측 모형을 개발하는 등의 활발한 연구가 진행되었다(Chowdary et al., 2011; Wang et al., 2013; 2015). 이와 같이 북서태평양 아열대 고기압과 동아시아 여름몬순 관련성에 대한 연구가 광범위하게 진행되었으나, 우리나라 여름철 강수와와의 관련성에 대한 연구는 많이 찾을 수 없었다. 우리나라 여름철 강수는 크게 보아 동아시아 여름 몬순의 일부이지만, 동아시아 여름 몬순의 특징과 뚜렷하게 구분되는 지역적인 특성이 크게 나타난다. 실제로 우리나라 여름철 강수와 북서태평양 아열대 고기압 지수 사이의 단순 상관계수를 구해 본 결과 통계적으로 유의한 값이 나타나지 않았다. 이 결과는 동아시아 여름몬순과 구분되는 우리나라 여름철 강수와 북서태평양 아열대 고기압 사이의 특징적인 관련성이 있음을 제시한다. 따라서 이 연구에서는 우리나라 여름철 강수와 북서태평양 아열대 고기압의 관련성을 조사하였고 특히 선형적인 관련성이 잘 나타나지 않기 때문에 비선형적인 관련성에서 어떠한 특징이 나타나는지 살펴보았다.

(2) 자료와 방법

우리나라 여름철 강수 자료는 기상청에서 제공하는 ASOS의 61개 지점을 평균한 1979년부터 2017년까지 일 평균 강수량을 사용하였다. 이 연구에서는 주로 계절내 변동성을 살펴보기 위하여 일 평균 강수를 5일 평균(pentad) 강수로 변환하여 분석하였다. 대규모 순환장의 특징을 살펴보기 위해 Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation (CMAP; Xie and Arkin, 1997)의 강수 자료와 NCEP/DOE reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) 자료의 대기 순환자료를 이용하였다. 또한 일별 해수면 온 자료와 상향 장파복사 자료는 각각 NOAA Optimum Interpolation SST (Reynolds et al., 2002) 자료와, NOAA daily interpolated OLR (Liebmann and Smith, 1996) 자료를 사용하였다. 이들 자료는 모두 5일 평균 pentad 자료로 변환하여 사용하였다. 자료 분석은 주로 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 관련성을 바탕으로 한 합성도 분석을 통해 수행하였다.

(3) 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 관련성

먼저 북서태평양 아열대 고기압의 변동성을 살펴보기 위해서 하층 대기 순환장을 바탕으로한 지수를 설정하였다. 대부분의 선행 연구들에서 북서태평양 하층 대기 변동성이 가장 큰 지역을 영역 평균한 값으로 북서태평양 아열대 고기압 변동성을 연구하였는데 이 연구에서도 이를 따라 110-140° E, 10-30° N 지역의 850 hPa 지위고도 편차를 평균한 값을 북서태평양 아열대 고기압 지수로 정의하였다(Lu and Dong, 2001; Sui et al., 2007; Yeo et al., 2012). 이 북서태평양 아열대 고기압 지수와 우리나라 여름철 강수와의 1979년부터 2017년까지 관련성을 6월 5일~9일에 해당하는 pentad 32부터 8월 29일~9월 2일에 해당하는 pentad 49까지 살펴보았다. 그 결과를 Figure 11에 나타내었는데 그림에서 확인할 수 있듯이 대부분의 기간에 상관계수가 통계적으로 95% 유의한 수준을 넘지 못한다. Pentad 자료뿐만 아니라 6,7,8월 월별 강수와 6-8월 평균 강수와 북서태평양 아열대 고기압 지수의 상관계수 또한 살펴보았는데 8월의 0.37을 제외하고 6월과 7월에 각각 0.12, 0.05등 유의하지 않은 결과를 나타냈다. 여름철 평균 우리나라 강수와의 관련성에서도 0.04의 상관계수가 나타났는데, 이는 동아시아 여름몬순 지수를 105-145° E, 30-45° N 지역을 영역 평균한 값으로 설정하고(Lee et al., 2005) 북서태평양 아열대 고기압과의 관련성을 살펴본 결과 0.51의 유의한 관련성과는 상반되는 결과이다. 이 결과는 동아시아 여름몬순과 북서태평양 아열대 고기압과는 구분되는 우리나라 여름철 강수와 북서태평양 아열대 고기압의 관련성이 있을 수 있음을 암시하는 결과이다.

따라서 우리나라 여름철 강수와 북서태평양 아열대 고기압과의 관련성을 보다 자세히 살펴보기 위해 Figure 11b에 scatter diagram을 나타내었다. Figure 11a에서 확인할 수 있듯이 둘 사이에는 뚜렷한 선형 관계가 없기 때문에 scatter diagram에서도 모든 사분면에 흩뿌려진 특징이 나타난다. 비록 선형적인 관련성은 나타나지 않지만 비선형적인 관련성에서 특별한 물리적인 특징이 나타나는지 확인하기 위하여 각 사분면에서의 관련성을 살펴보았다. 즉, 우리나라 강수가 평년보다 많고 북서태평양 아열대 고기압의 양의 위상일 때, 우리나라 강수가 평년보다 많고 북서태평양 아열대 고기압이 음의 위상일 때, 우리나라 강수가 평년보다 적고 북서태평양 아열대 고기압이 양의 위상일 때, 우리나라 강수가 평년보다 적고 북서태평양 아열대 고기압이 음의 위상일 때의 4가지 조합에 대하여 합성도 분석을 통해 물리적인 특징을 살펴보고자 한다. 편의상 위의 4가지 조합을 각각 PosKP+PosWNP, PosKP+NegWNP, NegKP+PosWNP, NegKP+NegWNP로 기술하고자 한다. 우리나라 강수의 경우 각 pentad 별로

1979-2017 기간동안 기후값의 80퍼센타일 이상인 사례를 PosKP로 20퍼센타일 이하인 사례를 NegKP로 정의하였으며, 북서태평양 아열대 고기압 지수는 ± 0.5 표준편차를 기준으로 그 이상과 이하인 경우 PosWNP, NegWNP로 정의하였다. 이에 따라 PosKP+PosWNP는 총 48 pentad, PosKP+NegWNP는 총 32pentad, NegKP+NegWNP는 총 56pentad, NegKP+PosWNP는 총 25 pentad가 선택되었고, 각각은 Figure 11b에 붉은색, 초록색, 푸른색, 핑크색으로 나타내었다.

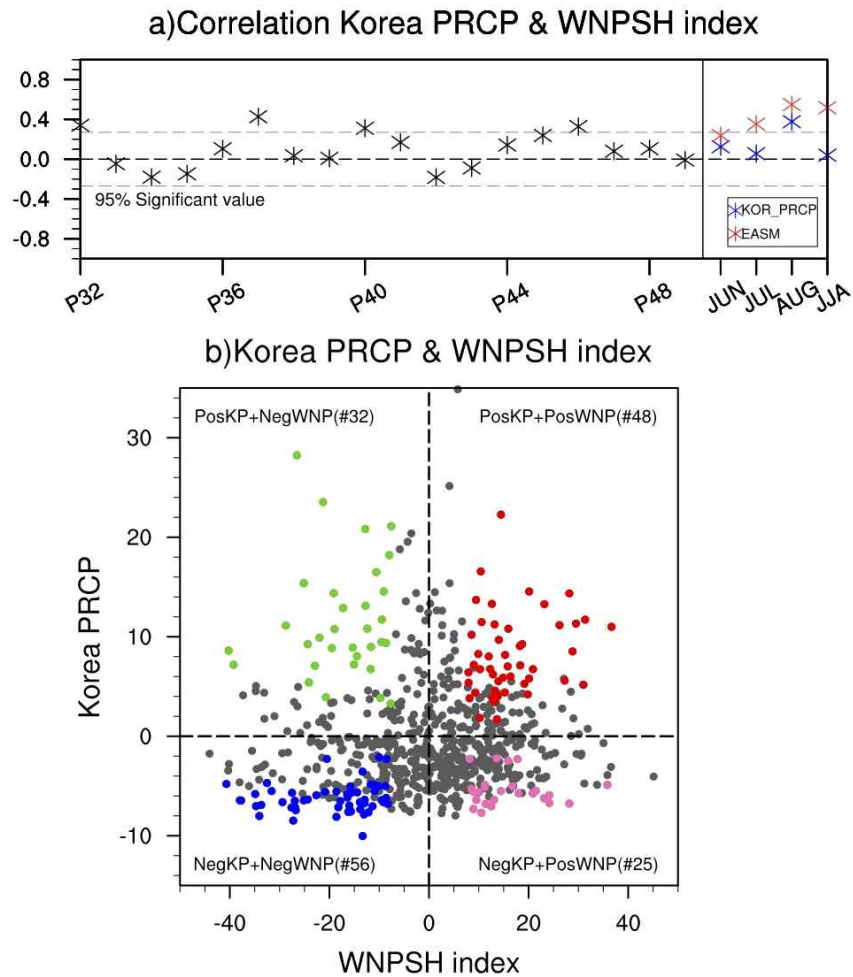


Figure 11. a)The correlation coefficients between precipitation anomalies averaged over 61 stations in Korea and WNPAC index from P32 to P49 during the period of 1979-2017 (black asterisks). The monthly mean values from June to August and seasonal mean (June-July-August) value are designated by blue asterisks while correlation coefficients between EASM and WNPAC indices are overlapped with red asterisks. b) Scatter plot of Korean precipitation anomalies and WNPAC index from P32 to P49 during 1979-2017. The cases belong to four categories based on phase of Korean precipitation and WNPAC are designated by color dots as red, green, blue and pink for PosKP+PosWNP, PosKP+NegWNP, NegKP+NegWNP, and NegKP+PosWNP, respectively.

(4) 우리나라 여름철 강수가 많을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 특징

Figure 12는 우리나라 여름철 강수가 많을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 850hPa 지위고도, 강수, 연직 적분한 수증기 수송과 flux, 그리고 해수면 온도 편차와 850hPa 바람편차의 합성도를 나타낸 그림이다. 먼저 PosKP+PosWNP 카테고리의 경우 강한 고기압성 순환이 북서태평양 뿐만 아니라 북태평양까지 넓게 나타나며 이 고기압성 순환의 남서기류를 따라 중국-우리나라-일본으로 강수가 증가하는 특징을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 수증기 수송을 통해서도 확인할 수 있으며 이는 선행연구에서 제시한 북서태평양 아열대 고기압과 동아시아 여름몬순의 일반적인 관련성과도 잘 일치하는 결과이다(Lu and Dong, 2001; Wang and Zhang, 2002). Figure 12c에 나타낸 해수면 온도 편차장을 살펴보면 북서태평양 아열대 고기압이 위치한 곳에서 하강 단파복사의 증가로 인한 고온 편차가 나타나고 그 북쪽으로는 대류활동 강화와 관련된 저온 편차가 나타나는데, 이는 대기 변동성이 해수면 온도 변동성을 유도함을 나타내는 결과이다. 한편, 북인도양 지역에서 양의 해수면 온도 편차, 열대 중태평양에서 음의 해수면 온도 편차가 나타나는데, 이는 엘니뇨가 쇠퇴하는 시기 여름철 해수면 온도의 일반적인 특징과 유사하다. 이 결과는 엘니뇨 쇠퇴기 여름에 인도양 온난화 신호가 동반되는 경우 북서태평양 아열대 고기압이 발달한다는 선행연구 결과와 잘 일치한다(Wang et al., 2000; Xie et al., 2009).

PosKP+PosWNP 사례의 해수면 온도 변동 과정을 보다 자세하게 살펴보기 위하여 이 사례가 3 pentad 이상 나타난 해에 대하여 3개월 계절 평균한 해수면 온도 편차장의 특징을 Figure 13에 나타내었다. 3 pentad 이상 나타난 해를 선택한 것은 연도별 발생빈도가 6.5%이상인 해를 의미하며 선택된 해는 각각 1987, 1998, 2003, 2010년이다. Figure 13a-c에서 확인할 수 있듯이 PosKP+PosWNP가 많이 나타난 경우 겨울철에 엘니뇨가 최성기로 발달하고 봄철에 급격히 쇠퇴함과 함께 인도양에서 온난화 신호가 나타나는 특징을 보여준다. 이후 여름철에는 열대 태평양에 엘니뇨 신호가 거의 사라지고 인도양의 온난화 신호가 매우 뚜렷하게 나타난다. 이러한 PosKP+PosWNP 사례의 해수면 온도 계절 변동성의 결과는 북서태평양 아열대 고기압의 발달이 엘니뇨 쇠퇴기에 인도양 온난화 신호와 함께 나타난다는 결과를 뒷받침해준다.

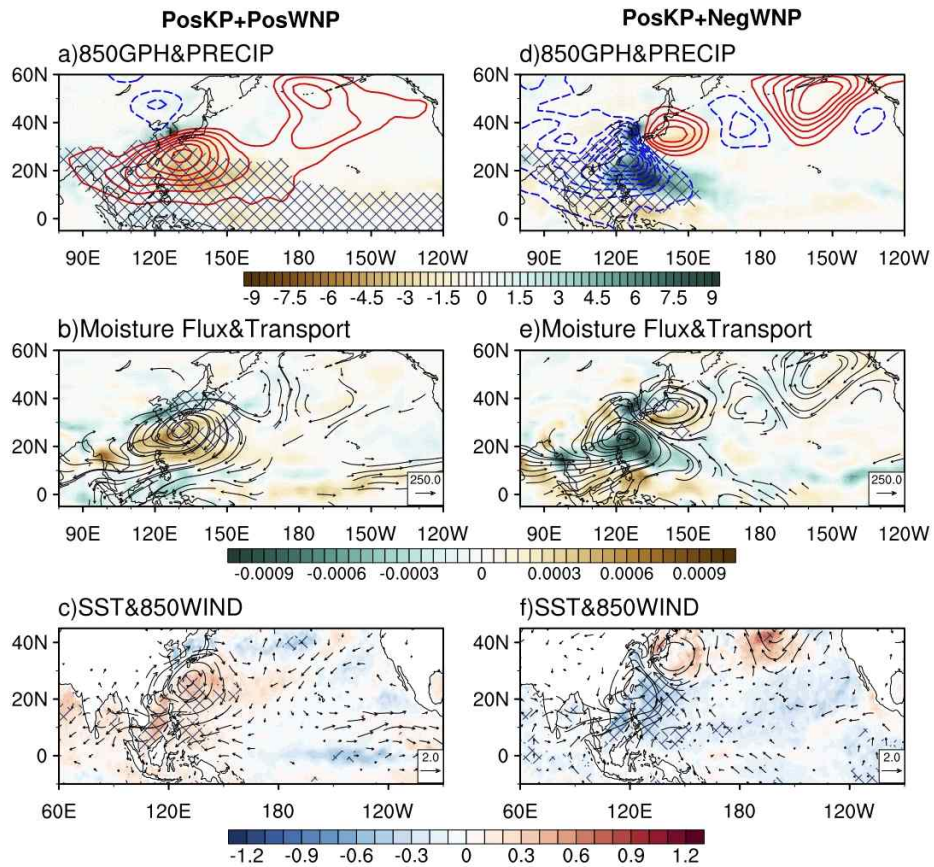


Figure 12. Composite maps of (a and d) 850hPa geopotential height (contour) and precipitation (shading) anomalies, (b and e) vertically integrated (from surface to 300hPa) moisture transport (vector) and flux (shading) anomalies, (c and f) SST (shading) and 850hPa wind (vector) anomalies for (a-c) PosKP+PosWNP and (d-f) PosKP+NegWNP, respectively. The statistically significant anomalies of 850hPa geopotential height, moisture transport, and SST at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

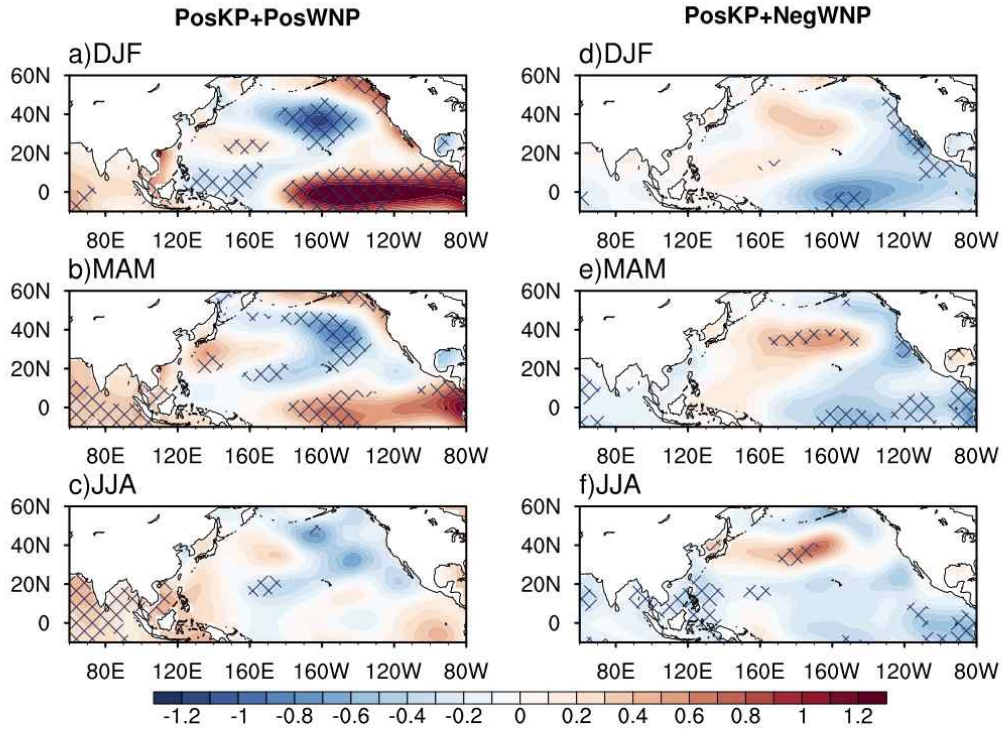


Figure 13. Composite maps of seasonal (3-month) mean SST anomalies for a-c) PosKP+PosWNP and for d-f) PosKP+NegWNP from the preceding winter (DJF) to the following summer (JJA). The years that comprise composite is when the occurrence of PosKP+PosWNP(PosKP+NegWNP) is more than 3(2) pentads. The statistically significant values at 90% confidence level are indicate by diagonal lines.

다음으로 PosKP+NegWNP 사례, 즉 북서태평양 지역에 저기압성 순환 발달과 함께 우리나라 여름철 강수가 증가한 사례에 대하여 살펴보았다. Figure 12d 에 나타난 850hPa 지위고도 편차장을 살펴보면, 북서태평양 지역의 저기압성 순환은 북태평양을 가로지르는 파동형태 대기 순환장을 구성하고 있다. 이러한 파동 구조는 선행 연구에서 알려진 PJ 패턴 또는 East Asia-Pacific teleconnection 패턴과 유사한데, 이 연구들에서는 파동 형성의 에너지원으로 북서태평양 지역 대류활동 강화를 제시하였다(Nitta, 1987). 실제 Figure 12d에서도 북서태평양 지역의 대류활동 강화 신호를 확인 할 수 있다. 이에 대한 파동구조의 일환으로 우리나라 동쪽으로 고기압성 순환이 나타나는데, 이 고기압성 순환의 가장자리를 따르는 남동기류로 인해 우리나라 지역으로 수증기가 공급되는 특징을 보여준다. PosKP+NegWNP 사례의 해수면 온도와 바람 편차장을 살펴보면, 저기압성 순환 중심에 저온 해수면 온도 편차, 고기압성 순환 중심에 고온 해수면 온도 편차가 나타나며 역시 대기 변동성이 해수면 온도 변동을 유도하는 특징을 보여준다 (Figure 12f). 한편, 열대태평양 해수면 온도는 중립상태를 나타내는데, 이에 대한 계절 변화의 특징을 살펴보기 위해 PosKP+NegWNP 사례가 2 pentad 이상 발생한 연도를 선택하여 Figure 13d-f에 나타내었다. 이때 선택된 해들은 1985, 1990, 1999, 2004, 2011로 겨울부터 여름까지 해수면 온도의 특징을

살펴보면 겨울철 라니냐 최성기에서 쇠퇴하는 특징을 나타낸다. 이는 PosKP+PosWNP 사례에서 엘니뇨 쇠퇴의 특징이 나타난 것과 반대의 특성인데, 이를 다시 말하면, 엘니뇨 쇠퇴기와 라니냐 쇠퇴기 모두 우리나라 여름철 강수가 증가하는 특징을 보이는 비선형적인 관련성을 나타내고 이는 북서태평양 아열대 고기압으로부터 매개되는 특징을 보인다.

한편, 우리나라 여름철 강수를 조절하는 주요 요소 중의 하나로 태풍 영향에 의한 강수를 고려하여야 하는데, PosKP+PosWNP와 PosKP+NegWNP 사례에서 태풍의 영향을 살펴보았다. PosKP+NegWNP 사례에서 나타나는 북서태평양 지역 대류활동 강화 신호를 바탕으로 이 사례에 태풍의 영향에 의한 강수가 많이 발생하였음을 추측할 수 있다. 실제로 총 사례 중 17개의 강수 사례가 태풍의 영향에 의한 강수임을 확인 하였고 이는 전체 사례의 50%에 해당하는 것이다. 그러나 PosKP+PosWNP 사례에서는 총 6개의 사례가 태풍의 영향에 의한 강수였으며 이는 총 사례의 12%에 해당하는 값이다. 태풍 영향에 의한 강수는 기상청에서 발간한 태풍백서 (KMA, 2011)를 바탕으로 구분하였고 각 사례에 영향을 준 태풍 리스트를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. List of typhoon name for typhoon-related precipitation events in PosKP+PosWNP and PosKP+NegWNP categories

Category	Precipitation event (year, pentad)	Name of typhoon
PosKP+PosWNP	1979, P48	JUDY
	1987, P42	ALEX
	1991, P43	CAITLIN
	1993, P43	PERCY
	2010, P45	DIANMU
	2017, P37	NANMADOL
PosKP+NegWNP	1981, P49	AGNES
	1984, P49	JUNE
	1985, P45	KIT
	1985, P46	LEE
	1989, P42	JUDY
	1990, P35	OFELIA
	1990, P36	OFELIA
	1991, P47	GLADYS
	1993, P42	PERCY
	1999, P42	NEIL
	1999, P43	OLGA
	2002, P38	RAMMASUN
	2004, P46	MEGI
	2006, P39	EWINIAR
2008, P41	ALMAEGI	
2011, P44	MUIFA	
2012, P48	BOLAVEN	

(5) 우리나라 여름철 강수가 많을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 진화 과정

PosKP+PosWNP와 PosKP+NegWNP 사례의 발달 메커니즘과 예측 모니터링 인자 발굴을 위하여 발생 각 사례의 3 pentad 전부터 2 pentad 후 까지 진화 과정을 살펴보았다. Figure 14는 PosKP+PosWNP 사례의 850hPa 지위고도 편차와 강수 편차장의 진화 과정을 나타낸다. 발생 3 pentad 전의 패턴을 살펴보면, Maritime continent를 기준으로 서쪽에는 대류활동 강화신호가, 동쪽에는 대류활동 억제 신호가 나타난다. 그러나 이때에는 중위도 지역에 대기 반응이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그 다음 pentad에 열대 지역의 대류활동 구조는 더욱 강화되면서 대류활동 억제 구역이 보다 북상하여 북서태평양 지역에 위치하고 이에 따라 이 지역에 약한 고기압성 순환이 나타난다. 그 다음 pentad에 이러한 특징이 더욱 강화되면서 북서태평양 아열대 고기압이 발달하고 그와 함께 Maritime continent 서쪽에 위치하였던 대류활동 강화 신호는 매우 약해지는 특징을 보인다. PosKP+PosWNP의 최성기에 북서태평양 아열대 고기압 가장자리를 따라 우리나라로 수증기가 공급되는 특징이 나타나고 이러한 구조는 다음 pentad까지 지속된다. 그러나 북서태평양 아열대 고기압은 이후 보다 북상하면서 우리나라 지역까지 위치하여 강수 증가의 특징은 나타나지 않는다.

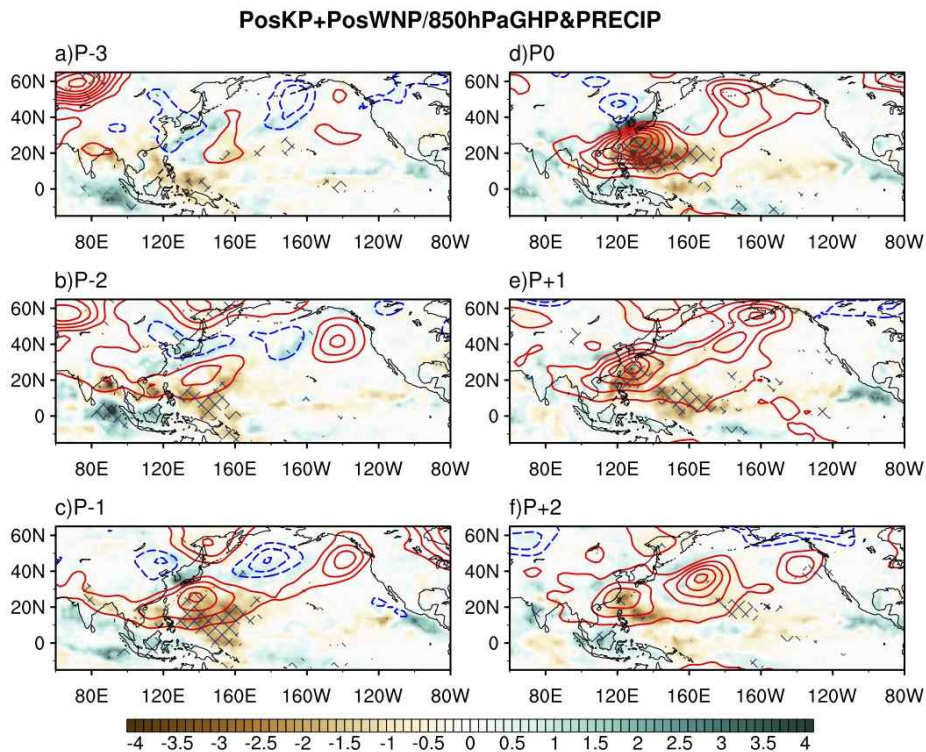


Figure 14. Composite maps of 850hPa geopotential height (contour) and precipitation (shading) anomalies from 3-pentad prior to 2-pentad after the peak phase of PosKP+PosWNP. The statistically significant anomalies of precipitation at 90% confidence level are indicated by diagonal lines.

PosKP+NegWNP 사례의 진화 과정은 Figure 15에 나타내었다. 최성기 3 pentad 전부터 2 pentad 전까지 동인도양 지역에서 대류 활동 억제 신호가, 열대 서태평양에서 대류 활동 강화 신호가 나타난다. 이 기간 동안 약한 저기압성 순환이 대류 활동 강화 지역에서 나타나지만 전체적인 대기 순환 패턴에는 뚜렷한 파동 형태 구조가 나타나지 않는다. 1 pentad 전의 패턴을 살펴보면 동인도양의 대류 억제 신호가 Maritime continent로 동진하고, 열대 서태평양의 대류 활동 강화 신호가 아열대 서태평양으로 북상하면서 북서태평양부터 북미 서안까지 파동형태의 대기 순환 구조가 발달한다. 그러나 이때 고기압성 순환이 우리나라에 걸쳐서 나타나면서 우리나라에는 뚜렷한 강수 증가 신호는 나타나지 않는다. 최성기가 되면서 북서태평양 대류 강화 신호와 저기압성 순환이 보다 북상하고 우리나라 동쪽으로 고기압성 순환이 위치하면서 우리나라 강수 증가 신호가 뚜렷하게 나타난다. 그러나 이러한 파동 형태의 대기 순환구조는 길게 유지되지 못하면서 1 pentad 후부터 급격히 약화되어 2 pentad 후에는 파동 구조가 모두 사라지게 된다.

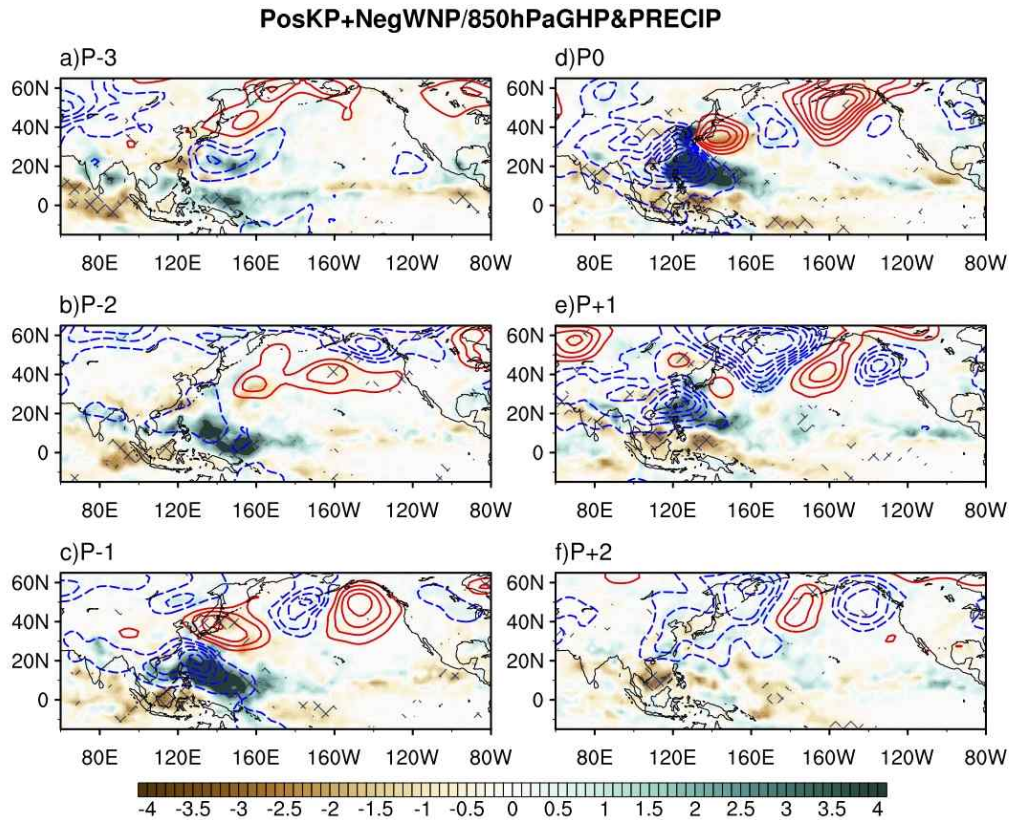


Figure 15. Same figure as in Figure 14 but for the PosKP+NegWNP case.

다음은 PosKP+PosWNP 그리고 PosKP+NegWNP 사례의 우리나라 강수의 진화 과정을 살펴보았다. Figure 16은 우리나라 61개 지점 평균 강수의 3 pentad 전부터 3 pentad 후까지 변동을 나타낸다. 붉은 막대 그래프는 PosKP+PosWNP 사례를, 녹색 막대 그래프는 PosKP+NegWNP 사례를 각각 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 최성기의 강수는

PosKP+NegWNP에서 더욱 강하게 나타난다. 그러나 PosKP+PosWNP 사례에서 2 pentad 전부터 1 pentad 후까지 양의 강수 편차가 지속적으로 나타나 PosKP+NegWNP 보다 지속적인 강수 현상을 보여준다. 종합하면 PosKP+PosWNP의 경우 중간 정도 강도의 강수가 지속적으로 나타나는 특징이 있는 반면 PosKP+NegWNP의 경우 강한 강도의 강수가 최성기에만 짧게 나타나는 특징이 있다.

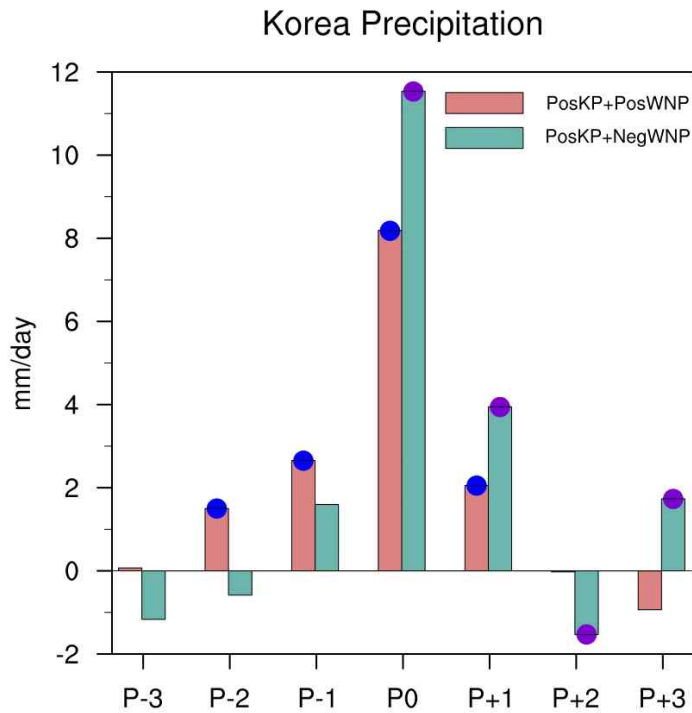


Figure 16. Temporal evolution of Korean precipitation anomalies during 3-pentad before and 2-pentad after relative to the peak phase of PosKP+PosWNP (red bars) and that of PosKP+NegWNP (green bars). Blue and purple dots indicate statistically significant value at 80% confidence level.

(6) 우리나라 여름철 강수가 적을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 특징

다음으로 우리나라 여름철 강수가 적을 때 북서태평양 아열대 고기압의 두 가지 위상에 따른 특성을 살펴보았다. Figure 17은 NegKP+NegWNP와 NegKP+PosWNP 사례에 대한 대기 순환 특징을 나타낸 그림이다. 먼저 NegKP+NegWNP의 특징은 PosKP+PosWNP와 비교했을 때 서로 부호만 반대이고 유사한 특징이 나타나는데, 동서방향으로 넓게 발달한 저기압성 순환과 가장자리를 따르는 동풍기류로 인해 우리나라 지역의 강수가 억제 되는 특징이 나타난다. 그러나 PosKP+PosWNP와 비교했을 때, NegKP+NegWNP 패턴에서는 파동형태의 순환장이 나타나는데 이는 PosKP+PosWNP와는 구별되는 특징이고 오히려 PosKP+NegWNP와 유사한

구조라 할 수 있다. NegKP+NegWNP의 해수면 온도 구조를 살펴보면 저기압성 순환 중심으로 저온 편차가 나타나고 열대 중태평양에서 약한 양의 편차와 북태평양 지역으로 양의 편차가 나타난다. 이 사례가 많이 발생한 연도의 해수면 온도 계절 변화의 특징을 Figure 18에 나타내었다. 이는 NegKP+NegWNP가 3 pentad 이상 발생한 연도인 1982, 1985, 1991, 1992, 1994, 2000, 2001, 2012, 2016년의 해수면 온도 편차를 합성한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 이 사례의 경우 뚜렷한 엘니뇨 또는 라니냐의 특징이 나타나지 않는다. 따라서 NegKP+NegWNP 사례의 경우 북서태평양 지역의 대류활동 강화 여부에 영향을 받으며 이는 엘니뇨 또는 라니냐와 밀접한 관련성을 가지지 않는 것으로 보여진다. 한편 PosKP+NegWNP 사례에서도 유사하게 북서태평양 지역에서 대류활동 강화 신호가 나타나는데 이는 라니냐의 쇠퇴 신호와 관련되어 있음을 확인 하였다. PosKP+NegWNP와 NegKP+NegWNP의 이러한 차이는 아마도 북서태평양 지역에서 대류활동 위치의 차이 또는 강도가 기여하였을 것으로 추측된다. 이는 북서태평양 지역에서의 대류활동 위치의 약간의 차이가 서로 다른 대기 반응을 유도할 수 있다는 선행연구 결과로서 뒷받침된다(Lu, 2004; Kim et al., 2009; Lu and Lin, 2009).

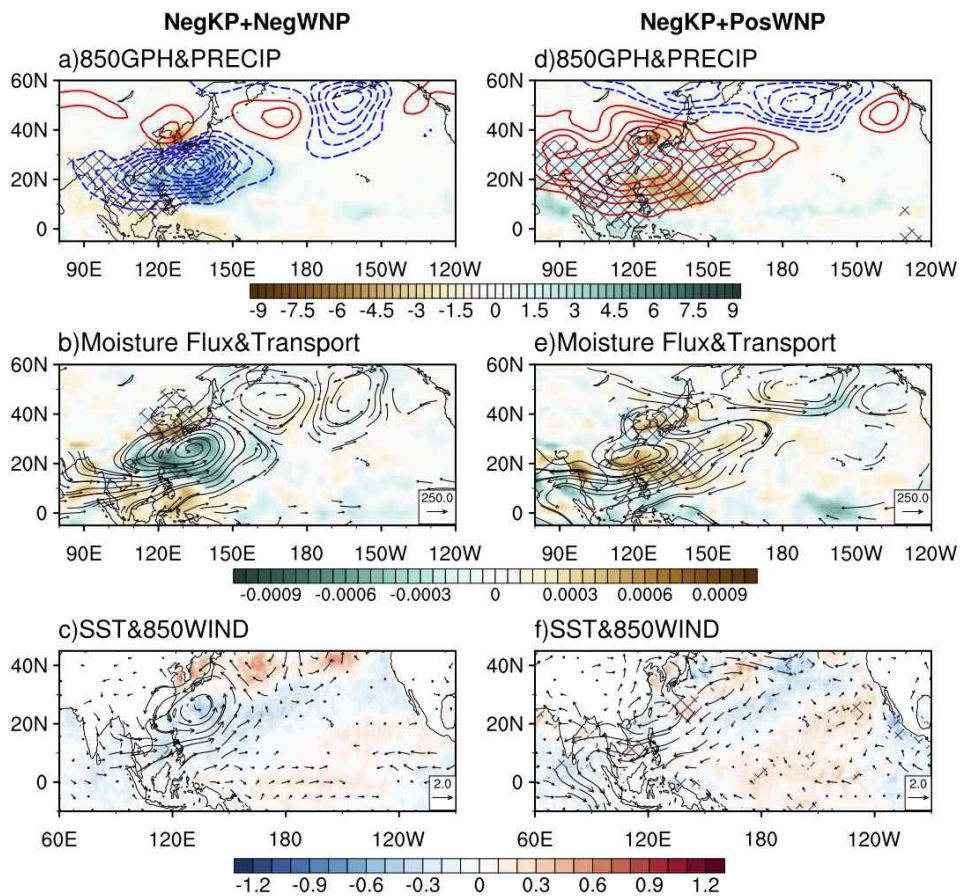


Figure 17. Same figure as in Figure 12 but for the NegKP+NegWNP and NegKP+PosWNP cases.

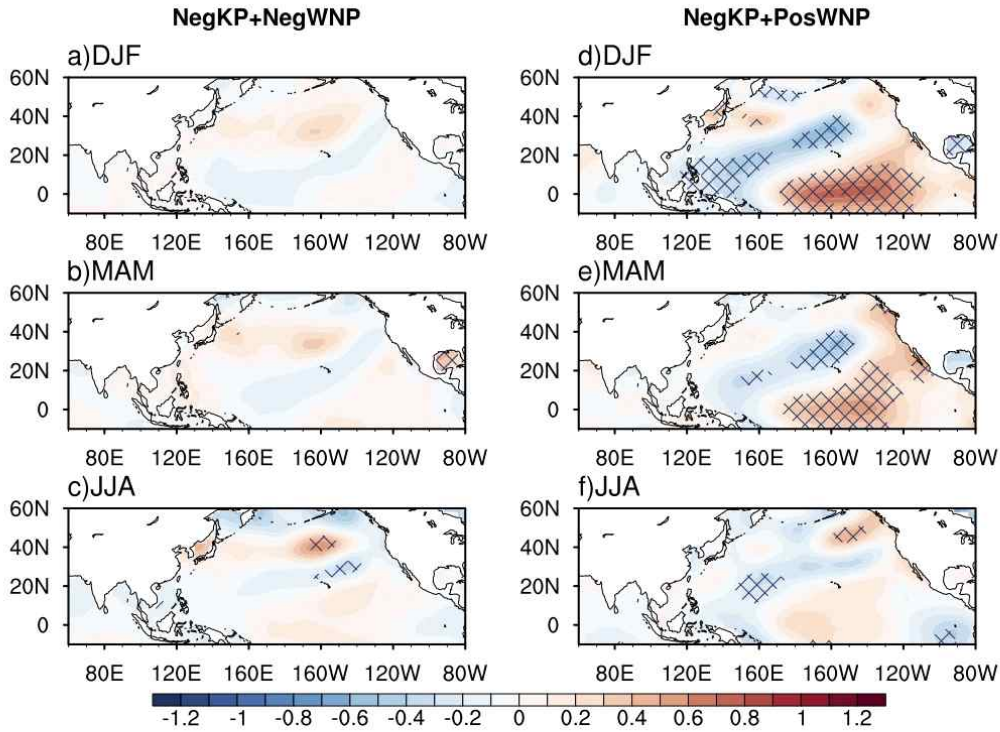


Figure 18. Same figure as in Figure 13 but for the NegKP+NegWNP and NegKP+PosWNP cases. The years that comprise composite is when the occurrence of NegKP+NegWNP (NegKP+PosWNP) is more than 3 (2) pentads.

한편, NegKP+PosWNP 사례의 경우 4 가지 카테고리 중 가장 사례수가 적게 나타난다. 실제 NegKP+PosWNP 사례의 대기 순환 특징은 나머지 3 가지 카테고리와는 구별되는 특징을 보여주는데 북서태평양 지역에 발달한 고기압성 순환이 우리나라 지역까지 북상하여 위치하면서 우리나라 강수가 억제되는 특징을 나타낸다(Figure 17d-e). 또한, 이 사례의 해수면 온도 편차장을 살펴보면 북동태평양 지역과 열대 중태평양 지역으로 양의 편차가 나타나는 특징을 보여준다 (Figure 17f). 이 사례의 해수면 온도의 계절 변동 특징은 Figure 18d-f에 나타내었는데 이는 이 사례가 2 pentad 이상 나타난 해들인 1980, 1992, 1993, 1994, 2004, 2010에 대한 합성도이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 NegKP+PosWNP 사례는 중태평양 엘니뇨의 쇠퇴와 밀접한 관련이 있다. 이는 PosKP+PosWNP 사례가 동태평양 엘니뇨의 쇠퇴 및 인도양 온난화 신호와 관련이 있는 것과 구별되는 특징이다. 엘니뇨의 공간 구조 차이 및 인도양 해수면 온도의 영향 여부가 북서태평양 아열대 고기압 특징에 차이를 유도하는 것으로 보여진다.

(7) 우리나라 여름철 강수가 적을 때 북서태평양 아열대 고기압의 위상에 따른 진화 과정

다음으로 NegKP+NegWNP 사례와 NegKP+PosWNP 사례의 진화과정을 살펴보기 위해 Figure 19에 3 pentad 전부터 2 pentad 후까지 850hPa 지위고도 편차와 강수 편차장의 진화과정을 나타내었다. 먼저 NegKP+NegWNP 사례의 발생 2 pentad 전부터 북서태평양 대류

활동 강화 신호가 나타나고 이와 함께 북미 서안까지 파동 형태 대기 순환구조가 나타난다. 이후 최성기까지 북서태평양 지역 대류활동이 보다 강화되면서 파동 구조가 더욱 뚜렷하게 나타나지만 1 pentad 이후 대류활동 약화 신호와 함께 파동 구조가 사라진다. 북서태평양 지역의 대류활동 강화를 공통적으로 나타내는 PosKP+NegWNP 사례와의 차이점은 PosKP+NegWNP의 경우 동인도양 지역에서 나타난 대류활동 억제 신호가 시간이 지나면서 점차 동진하여 Maritime continent에 위치하는 특징이 있는 반면 NegKP+NegWNP의 경우 대류활동 억제신호가 Maritime continent 지역에서 지속적으로 나타나는 차이가 있다. 이러한 대류활동 진화의 차이가 중위도 대기 반응의 차이 및 우리나라 강수 반응의 차이를 유도하는 것으로 보인다.

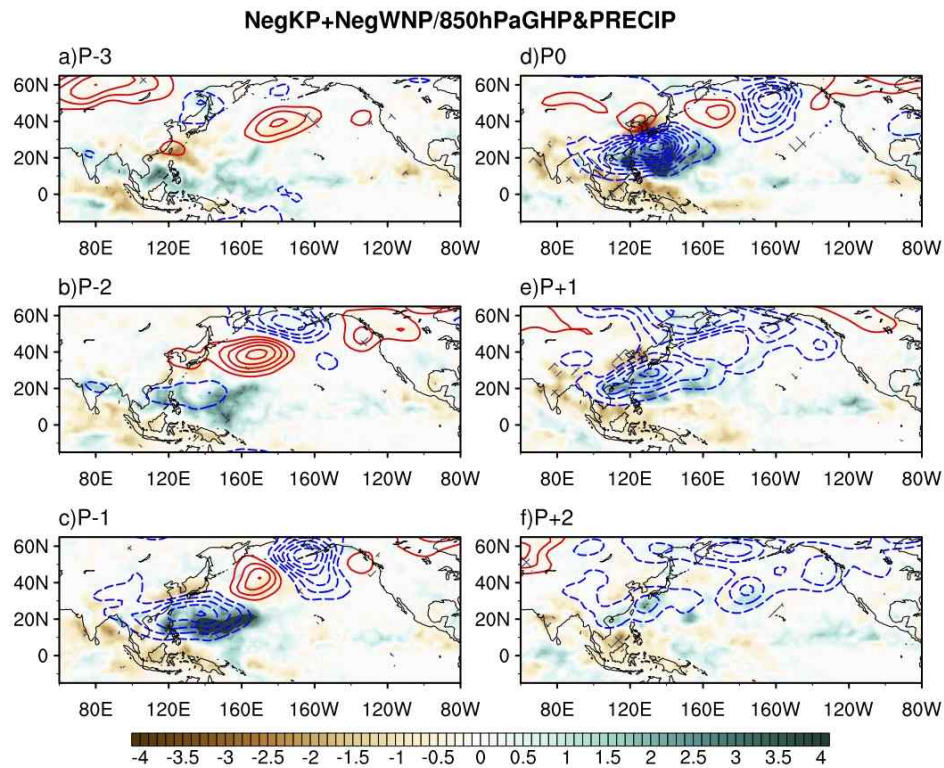


Figure 19. Same figure as in Figure 14 but for the NegKP+NegWNP case

한편, NegKP+PosWNP 사례의 진화과정 특징은 Figure 20에 나타난 것과 같이 Maritime continent를 기준으로 동쪽과 서쪽에 대류 활동 약화와 강화 신호가 나타나는 동서방향 구조가 2 pentad 전부터 나타난다. 이후 이 대류활동 구조는 더욱 강화되고 대류활동 억제 신호가 북서태평양 지역으로 북상하면서 이 지역에 고기압성 순환이 형성된다. NegKP+PosWNP의 최성기에 대류활동 구조가 더욱 북상하면서 북서태평양 아열대 고기압이 동아시아 지역으로 북상하고 이에 따라 우리나라 강수가 억제되는 특징이 나타난다. 최성기 이후에는 대류활동 강도의 약화와 함께 순환장 역시 약화된 형태로 나타난다. 북서태평양 지역 대류활동 억제를 공통의 특징으로하는 PosKP+PosWNP 사례와의 가장 큰 차이는 Maritime continent 서쪽의

대류활동 강화 신호가 PosKP+PosWNP 사례에는 나타나지 않는다는 것이다. 이러한 차이가 아마도 서로 다른 대기 반응을 유도할 수 있을 것으로 생각된다.

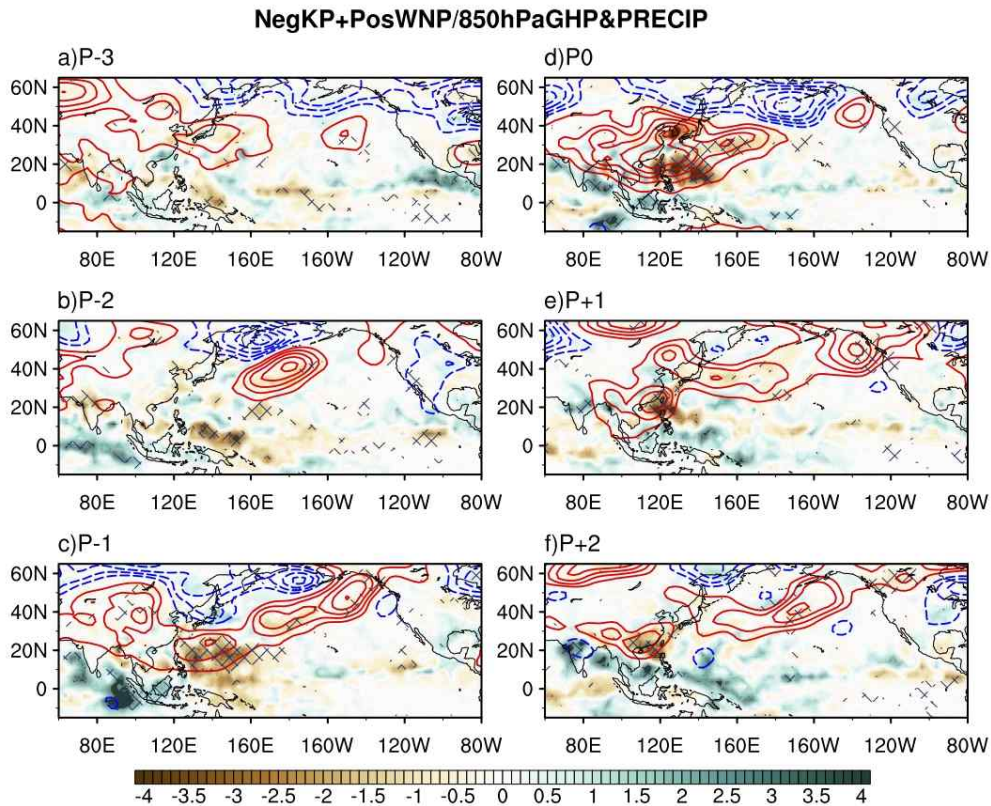


Figure 20. Same figure as in Figure 14 but for the NegKP+PosWNP case

NegKP+NegWNP 사례와 NegKP+PosWNP 사례의 우리나라 강수 진화 과정을 Figure 21에 나타내었다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, NegKP+NegWNP 사례에서 음의 강수 편차의 강도가 NegKP+PosWNP 사례보다 더욱 강하게 나타난다. 뿐만 아니라 NegKP+NegWNP 사례에서 보다 강수 진화 과정이 조직적으로 나타나는데 1 pentad 전부터 2 pentad 후까지 강수 감소 신호가 지속적으로 나타난다. 그러나 NegKP+PosWNP의 경우 사례수가 적은 탓이 최성기의 강수 감소 신호 이외에는 특징적인 면이 나타나지 않는다. 이 결과는 우리나라 강수가 적을 때 주로 음의 북서태평양 아열대 고기압 현상과 관련이 있다는 것을 제시한다.

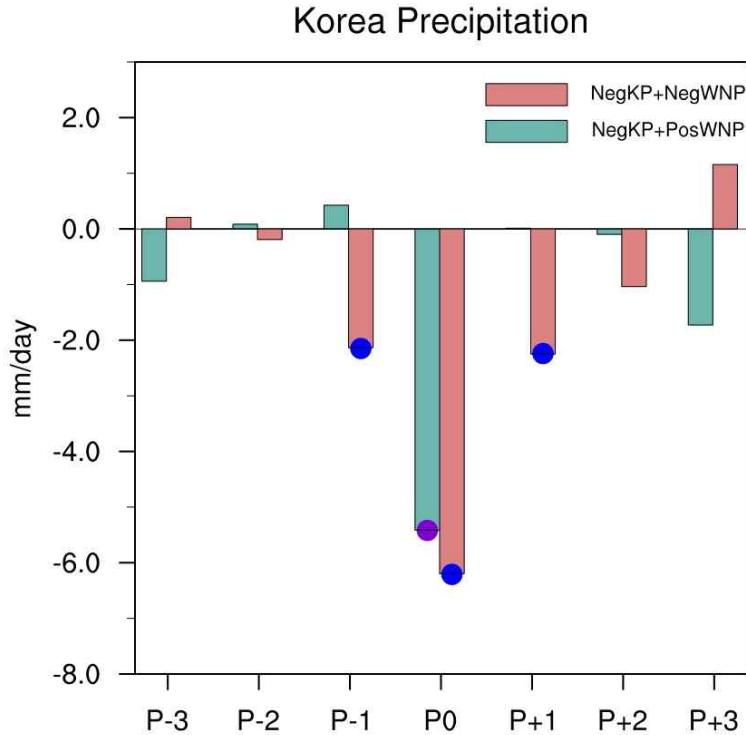


Figure 21. Same figure as in Figure 16 but for the NegKP+NegWNP and NegKP+PosWNP case.

(8) 요약 및 결론

이 연구에서는 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 관련성을 살펴보았다. 둘 사이의 선형적인 관련성은 나타나지 않았지만 둘의 위상을 바탕으로 네 가지 카테고리 별 특징을 살펴본 결과 물리적으로 의미 있는 결과들을 확인 할 수 있었다. 먼저, 북서태평양 아열대 고기압 발달과 함께 우리나라 여름철 강수가 많은 경우 북서태평양 아열대 고기압이 동서방향으로 길게 발달하여 그 가장자리의 남서기류를 따라 동아시아 지역으로 수분이 공급되는 특징이 있다. 이 경우 이전 겨울철의 엘니뇨의 쇠퇴와 함께 나타나는 봄철의 인도양 온난화 신호가 이러한 구조를 형성하는데 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 한편, 발생 빈도는 적지만 북서태평양 아열대 고기압이 발달함에도 불구하고 우리나라 여름철 강수가 억제되는 경우가 있는데 이는 북서태평양 아열대 고기압이 보다 북상하면서 우리나라 지역을 덮는 경우이다. 이러한 구조의 형성은 이전 겨울철 중태평양 엘니뇨의 쇠퇴가 관련이 있으며 이때 인도양 온난화의 영향은 나타나지 않았다. 이와 같이 북서태평양 지역의 대류활동 위치 및 강도의 차이 그리고 인도양 영향의 차이 등이 서로 다른 중위도 대기 반응을 유도하고 그에 따라 우리나라 강수 변동성에도 차이가 생기게 된다.

한편, 북서태평양 지역 대류활동 강화와 함께 이 지역에 저기압성 순환이 발달하게 되면 대체로 북태평양을 가로지르는 파동형태의 대기 순환 구조가 형성되게 된다. 이때 우리나라 동쪽으로 고기압성 순환이 발달하게 되면 그 가장자리를 따라 우리나라로 남동기류가

유입되면서 강수가 증가하게 된다. 이는 라니냐의 쇠퇴과정과 관련이 있는 것으로 분석되었으며 또한 태풍 영향에 의한 강수가 많이 발생 한 것을 확인하였다. 북서태평양 지역 저기압성 순환이 동서 방향으로 길게 발달하고 그에 따라 우리나라 지역은 동풍기류의 영향을 받을 때 강수가 적은 특징이 나타난다. 이때에는 특정 엘니뇨 및 라니냐의 진화 과정과 관련이 없고 북서태평양 지역의 대류활동 강화와 밀접한 관련이 있다는 것을 확인하였다. 이와 같이 네 가지 카테고리별 북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수의 관련성을 살펴보았으며 특히 엘니뇨 및 라니냐의 영향을 살펴봄으로써 우리나라 여름철 강수 계절 예측 업무에 활용 가능성을 높였다.

다. 우리나라 여름철과 겨울철 극한 기온 사례 분석

(1) 연구 배경과 극한 기온 사례 선정 방법

기후변화와 더불어 폭염이나 한파와 같은 극한 기온 현상은 빈번하게 발생하고 있으며 최근 들어 전 세계적으로 이에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 우리나라를 비롯한 동아시아는 2018년과 2016년 여름 매우 극심한 폭염을 겪었고 2011년과 2012년 겨울에는 한파로 인해 사회 경제적으로도 큰 피해를 입었다. 폭염이나 한파와 같은 극한 기온 현상에 대한 예측과 대비는 중요하며 최근에 발생한 극한 기온 현상은 특징과 발생 원인이 과거와는 차이를 보이고 있어 최근에 발생했던 사례에 대한 심층 분석이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 우리나라에서 발생했던 극한 기온 사례를 최근 사례를 중심으로 선정하고 사례에 대한 심층적인 분석을 통해 특징과 발생 원인을 살펴보았다. 분석 내용은 기상청에서 “우리나라 기온의 과거 극값사례 심층분석집”으로 발간되었으며 장기예보관들의 우리나라 극한 기온 특징에 대한 기후학적 측면에서의 이해도를 향상시키고 사후분석과 언론대응에도 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

극한 기온 사례는 여름철 기온이 높았던 폭염 사례와 겨울철 기온이 낮았던 한파 사례를 선정해 분석하였다. 사례를 선정한 기준은 여름철은 6월, 7월, 8월에 대해 월별로 일 최고기온이 90퍼센타일(Percentile, 백분위)을 초과한 날 수가 가장 많은 해를, 겨울철은 일 최저기온이 10퍼센타일 미만인 날 수가 가장 많은 해를 사례 해로 선정했으며, 최근 사례를 중심으로 보기 위해 2000년 이후 기간에서 사례를 선정하였다. 단순히 월평균 기온이 가장 높거나 낮은 달을 사례로 선정하지 않고 일 퍼센타일을 기준 값으로 사용해 사례를 선정하는 이유는, 기온의 변동이 큰 폭으로 있었던 달의 경우 월 전체 평균을 하게 되면 서로 다른 방향의 기온 변동은 상쇄되어 실제로 우리가 매우 덥거나 추웠다고 느꼈던 것과는 차이가 있을 수 있기 때문에 월 전체를 평균한 기온보다는 한 달 동안 기온이 매우 높거나 낮았던 날이 가장 많았던 해를 사례로 선정하고자 했다. 또한 이 방법으로 사례를 선정하게 되면 월별 기온의 1순위 외에 다양한 사례를 확보할 수 있어 더 많은 분석정보를 제공할 수 있다.

사례를 선정하는 기준으로 사용한 퍼센타일은 어떤 자료의 값을 순서대로 나열했을 때 백분율로 나타낸 특정 위치의 값을 의미한다. 크기가 작은 것부터 큰 순서로 나열해 가장 작은 것을 1, 가장 큰 값을 100으로 했을 때 10퍼센타일은 10번째에 해당하는 값을, 90퍼센타일은 90번째에 해당하는 값을 의미한다. 기온의 퍼센타일 계산은 1981년-2010년의 30년 기간에 대해 각각의 날짜 별로 1위부터 30위까지 오름차순으로 정렬시킨 다음 90번째, 10번째에 해당하는 값을 계산해 사용했다.

Figure 22는 연도별로 6월, 7월, 8월에 일 최고기온이 90퍼센타일을 초과해 기온이 높았던 날 수와 12월, 1월, 2월에 일 최저기온이 10퍼센타일 미만으로 기온이 낮았던 날 수를 나타낸다. 2000년 이후에서 값이 가장 많은 해는, 6월은 2005년, 7월은 2018년, 8월은 2016년, 12월은 2012년, 1월은 2011년, 2월은 2012년으로 이들 6개를 사례로 선정했다. 6월의 경우 90퍼센타일을 초과한 날 수가 가장 많은 해가 여러 개였는데 이 중에서 일 평균기온의 퍼센타일을 기준으로 90퍼센타일 초과한 날 수가 가장 많은 2005년을 사례를 선정하였다.

선정된 사례는 Table 2에 정리되었으며 사례의 월 평균기온과 최대/최고 기온, 1973년-2018년 기간의 순위를 함께 표시했다.

분석에 사용한 우리나라 기온과 강수 자료는 기상청에서 제공하는 종관기상관측 (Automated Synoptic Observation System; ASOS) 자료의 전국 45개 지점 평균값을 사용했다. 지위고도와 바람, 온도 등의 대기 변수 자료는 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) Reanalysis1 자료를 사용했다. 해수면온도와 상향 장파복사는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V5, Interpolated Outgoing Longwave Radiation 자료를 사용했다. 전구 강수 자료는 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) version2.3 combined precipitation dataset, 눈덮임 자료는 Rutgers university Northern hemisphere weekly snow cover extent, 토양수분 자료는 ECMWF ReAnalysis (ERA) Interim의 volumetric soil water 자료를 사용했다. 북극 해빙자료는 NOAA/NSICDC (National Snow and Ice Date Center)에서 제공하는 Sea Ice Concentration version3와 Sea Ice Index version3 자료를 사용했다. 북극진동(Arctic Oscillation; AO) 지수, 북대서양진동(North Atlantic Oscillation; NAO) 지수, 북태평양진동(North Pacific Oscillation; NPO) 지수는 NOAA Climate Prediction Center (CPC)에서 제공하는 자료를 사용했다.

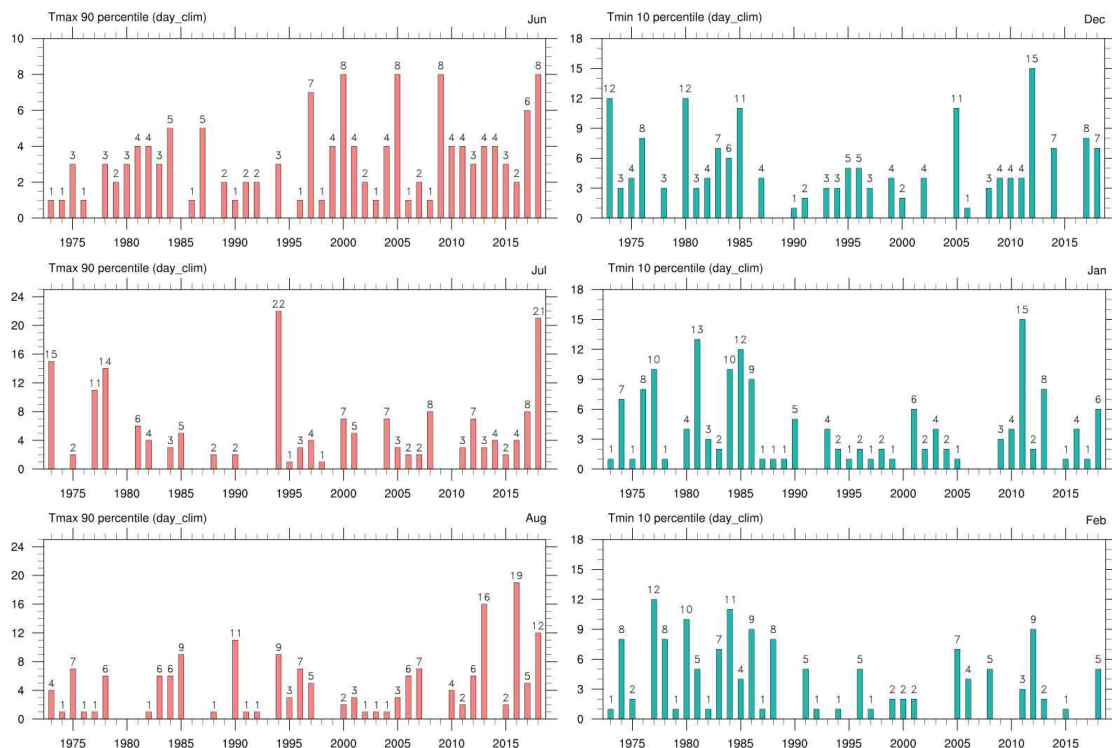


Figure 22. (Left) The number of days over 90 percentile of the daily maximum temperature in the month, (Right) the number of days under 10 percentile of the daily minimum temperature in the month.

Table 2. Extreme temperature cases, and the temperature and rank (based on 1973-2018) of the each case.

	Month (climatology of mean Temp.)	Year	mean Temp. (rank)	max/min Temp. (rank)
Summer	Jun (21.1°C)	2005	22.4°C (2)	27.8°C (4)
	Jul (24.5°C)	2018	26.8°C (2)	31.6°C (2)
	Aug (25.1°C)	2016	26.7°C (5)	32.0°C (3)
Winter	Dec (1.5°C)	2012	-1.7°C (2)	-6.0°C (3)
	Jan (-1.0°C)	2011	-4.8°C (3)	-9.8°C (2)
	Feb (1.1°C)	2012	-0.8°C (7)	-5.7°C (7)

(2) 여름철 극한 기온 사례

(가) 6월 극한 기온 사례: 2005년 6월

2005년 6월은 전국 평균기온 22.4°C로 평년보다 1.2°C 높았으며, 평균 최고기온 27.8°C, 평균 최저기온 18.0°C로 평년보다 각각 1.3°C, 1.3°C 높았다. 월 강수량은 158.8mm로 평년보다 적었다. 월 초반에는 기온변동이 있었으나 중반을 지나면서 기온이 급격히 증가해 평년보다 높은 기온이 이어졌으며 최고기온은 평균기온과 유사하나 최저기온은 월 초반의 며칠을 제외하고 계속해서 증가하는 추세로 평년보다 높게 나타났다. 2005년 여름철 기온은 7월과 8월에 평년과 비슷했으나 6월에만 기온이 평년보다 높았다.

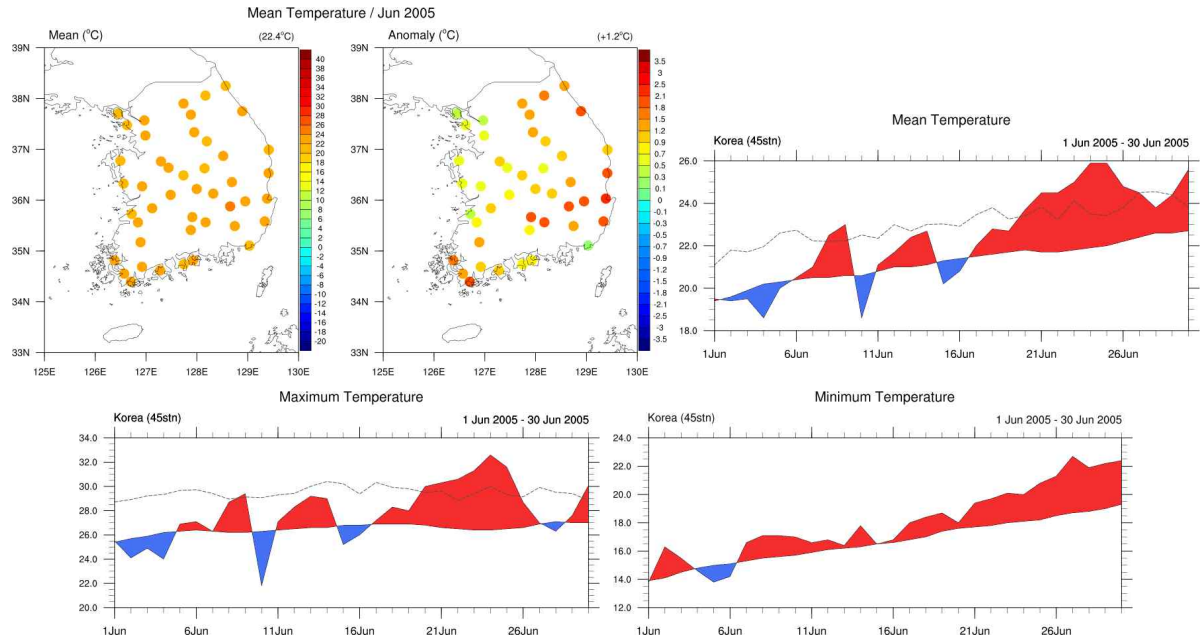


Figure 23. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Jun 2005, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Jun 2005 (dashed line indicates 90 percentile of temperature).

대기 순환장을 살펴보면 상층 200hPa 지위고도장에서 중위도에 양/음의 지위고도 편차가 파동 형태로 나타났으며 500hPa 지위고도장도 이와 유사한 모습을 보였다. 하층 850hPa 지위고도와 해면기압에서는 북극에 양의 편차가 위치하고 서유럽과 북태평양 동부 등 일부 지역을 제외한 중위도 지역은 음의 편차가 위치했다. 우리나라는 음의 지위고도 편차가 위치하고 서풍편차의 영향을 받았다. 2m 기온은 우랄산맥 주변과 티베트 주변에서는 음의 편차가, 유라시아 대륙의 그 외 지역에서는 양의 기온 편차가 나타났고 특히 우리나라와 중국을 포함한 유라시아 대륙 동편에서 기온이 높았다. 상층 제트의 위치는 평년과 비슷했으나 우리나라 주변에서는 세기가 약해지고 중국동부와 일본 동쪽에서 평년보다 강했다.

해수면온도는 우리나라 주변에서는 서해 온도가 다소 높았고 동중국해 주변으로는 음의 해수면온도 편차가 나타났다. 열대 태평양은 중립상태로 Nino3.4 지수 0.18로 2005-2006년 겨울 약한 엘니뇨 발생 이후 라니냐로 전환되는 시기였다. 아열대 중태평양 해수면온도는 평년보다 높았으며 알래스카 만 부근까지 대각선 방향으로 높은 해수면온도가 이어졌다. 북대서양에서는 적도 부근부터 북쪽으로 양~음~양의 해수면온도 편차가 나타났는데 이러한 tripole 형태의 분포는 이전 겨울부터 이어졌다. 적도 서태평양 maritime continent에서는 대류활동이 억제되었고 열대 태평양에서는 대류활동이 평년과 비슷했다. 아열대 서태평양에서는 대류활동 강화가 나타났고 일본 남쪽까지 대류 강화가 이어졌다.

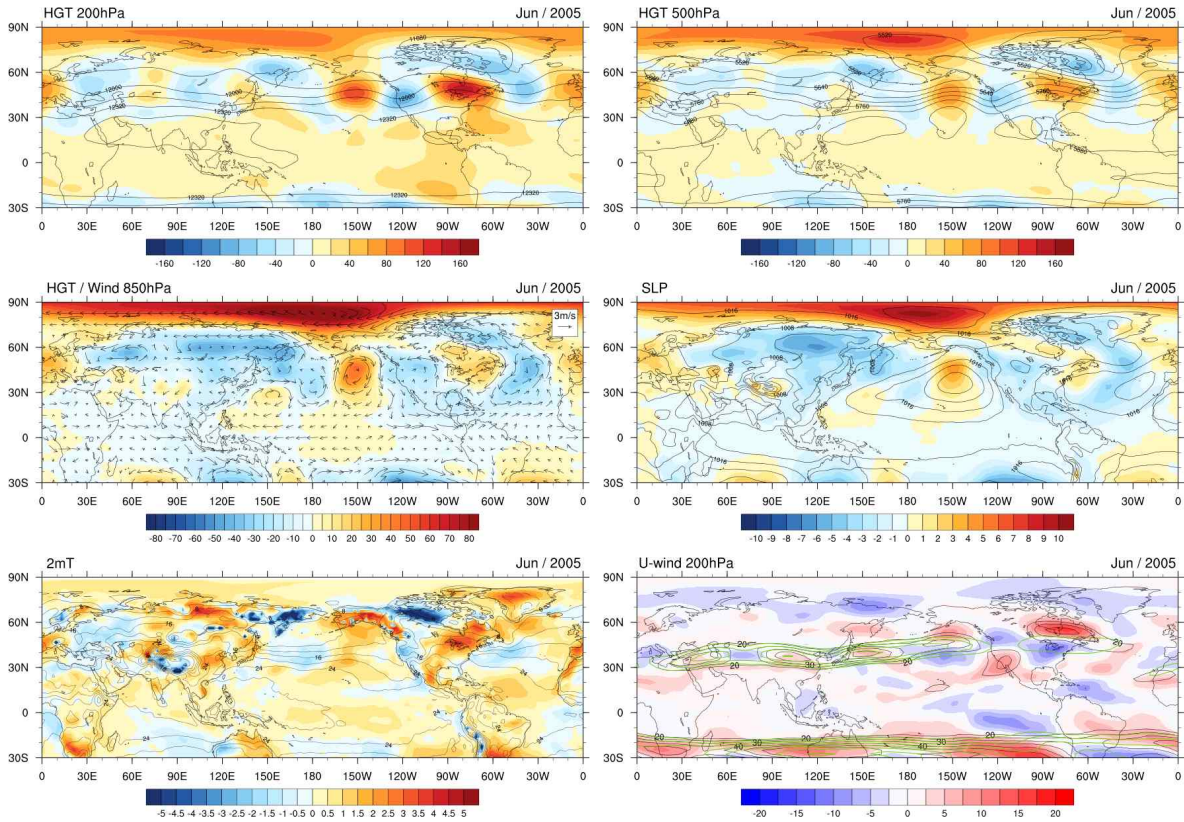


Figure 24. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Jun 2005 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).

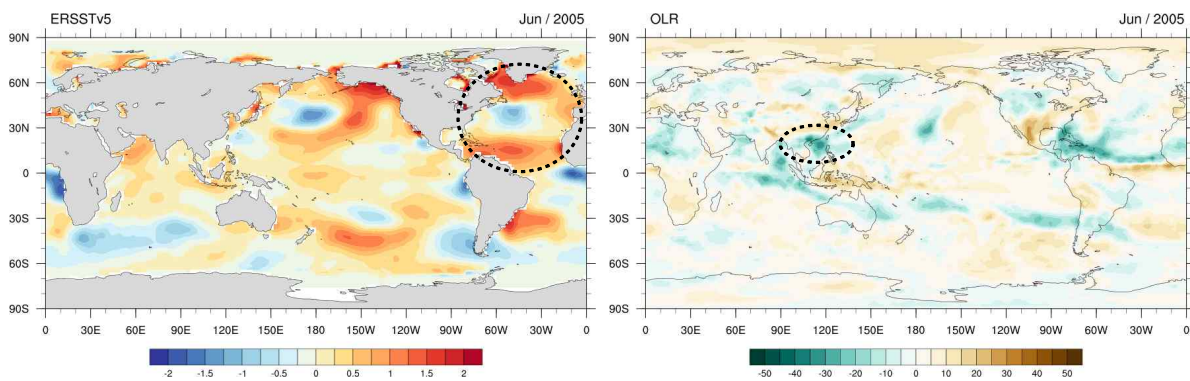


Figure 25. (Left) Sea surface temperature (SST) anomalies, and (Right) outgoing longwave radiation (OLR) anomalies in Jun 2005.

지위고도 분포에서 상층부터 하층까지 북극에 강한 고기압성 편차, 중위도 유라시아에는 저기압성 편차가 위치해 음의 북극진동 패턴이 나타났으며 북극진동 지수는 -0.38 로 음의 값을 보였다. 그러나 우리나라 6월 기온과 북극진동 지수의 상관계수는 0.01 로 통계적으로 직접적인 상관성은 없다. 하층 850hPa 지위고도와 해면기압에서 한반도 북쪽에 저기압성 편차가

위치했는데 중국 동북지역에 위치한 저기압성 편차의 영향으로 우리나라는 서풍의 영향을 받았다. 우리나라 주변의 저기압성 편차는 상층보다 하층에서 더 뚜렷하게 나타났는데, 하층 온도와 순환장을 보면 중국 동부지역 온도가 매우 높고 건조했으며 저기압성 순환에 의한 서풍으로 이 지역으로부터 덥고 건조한 공기가 우리나라로 유입될 수 있었다 (Figure 26). 2005년 6월은 다른 해와 비교해 중국 동부 지역 온도가 매우 높은 편이었고 서풍 또한 강한 해였다 (Figure 27). 남중국해에서 강한 대류활동이 있었고 (Figure 25) 연직 바람과 온도 분포에서 상승과 하강운동이 나타난 것으로 보아 (Figure 28), 중국 동부지역의 높은 온도는 남중국해에서 강한 대류활동으로 인한 보상하강운동에 의해 유도될 수 있었던 것으로 보인다.

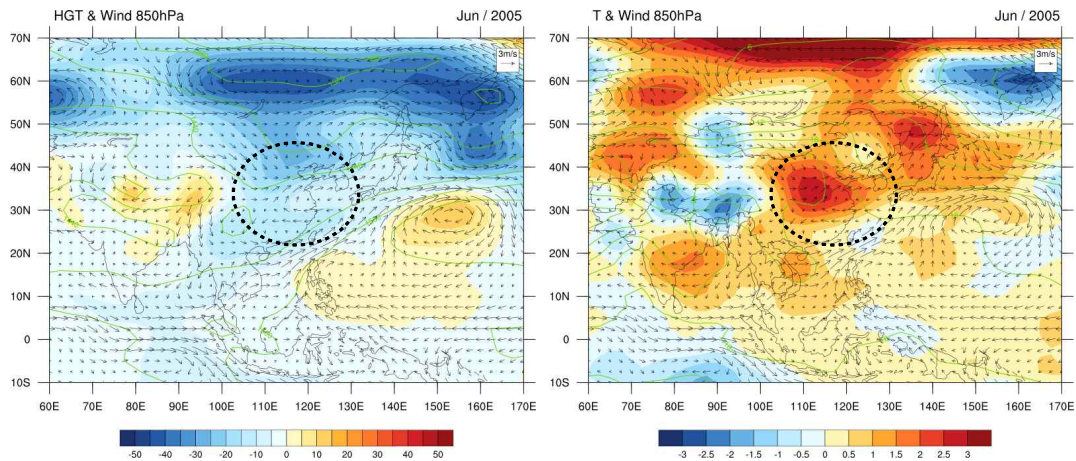


Figure 26. (Left) 850hPa geopotential height and wind, (Right) 850hPa temperature and wind in Jun 2005 (shading: anomaly, green contour: mean, vector: wind anomalies).

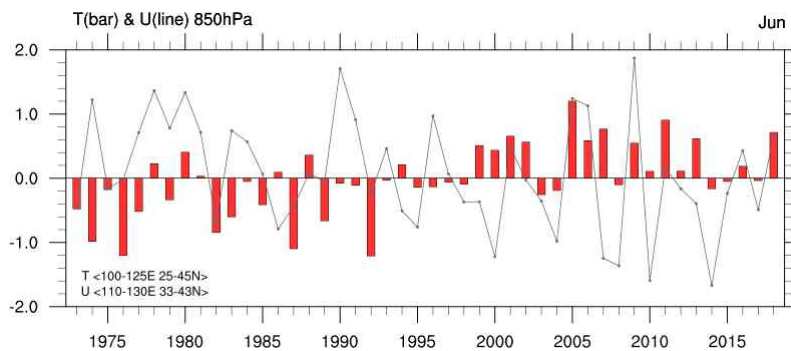


Figure 27. Time series of the area averaged 850hPa temperature anomalies (100-125E, 25-45N) and zonal wind anomalies (110-130E, 33-43N) over the eastern China for Jun.

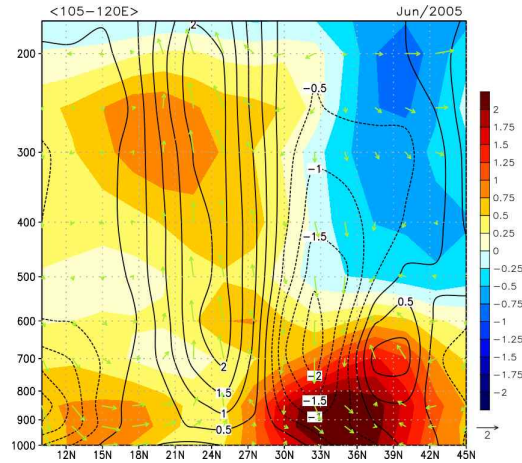


Figure 28. Vertical distribution of the longitudinal averaged (105-120E) temperature anomalies (shading) and vertical wind anomalies (ω [Pa/s], black contour) in Jun 2005. Vector indicates meridional and vertical wind anomalies. Vertical wind(ω) is multiplied by -100 .

3월 중국 동북부 지역 눈덮임과 우리나라 6월 기온의 상관계수는 0.72로 3월에 눈덮임이 많으면 6월 기온이 상승하는 경향이 있다. 봄철에 눈덮임이 많으면 눈이 녹으면서 다량의 토양수분이 형성되고 봄철을 지나면서 토양수분의 영향은 지면 강제력으로 작용해, 증발 냉각 및 강수과정을 통해 동쪽으로 대기 파동이 유도되어 6월 우리나라 상층에 고기압성 순환, 오호츠크 해에 저기압성 순환, 고위도에 고기압성 순환이 형성되는 파동 패턴이 형성될 수 있는 것으로 알려져 있다 (기상청 기후예측과, 2018). 그러나 2005년에는 3월 중국 동북부 지역에 눈덮임이 평년보다 많았으나 6월에 우리나라에는 저기압성 순환이 나타나 알려진 경향과는 차이를 보였다. 2005년에는 중국 동북부 지역에 눈덮임이 4월까지 평년보다 많은 수준이었고 (Figure 29) 토양수분도 6월까지 평년보다 많은 수준을 보였는데 (Figure 30), 토양수분이 충분히 많아 증발에 의한 냉각효과가 지속되면서 6월 하층에 저기압성 편차가 나타나는데 기여한 것으로 보인다. 과거 자료에서도 5월 중국 동북부 토양수분에 대한 6월 850hPa 지위고도 회귀분석에서는 우리나라~만주에 고기압성 편차, 오호츠크 해~러시아 북부에 저기압성 편차가 나타났으나, 6월 토양수분에 대한 6월 850hPa 지위고도 회귀분석에서는 우리나라 북쪽~몽골에 저기압성 편차, 오호츠크 해 부근에 고기압성 편차가 나타나 (Figure 31) 5월과 6월 토양수분에 대해 지위고도는 반대 경향을 보였다. 토양수분과 관련된 영향은 추후 더 자세한 연구가 필요하겠다.

Figure 32는 6월 우리나라 기온이 평년보다 높았던 해의 850hPa 합성장과 우리나라 6월 기온에 대한 6월 850hPa 지위고도 회귀분석을 나타내는데, 유라시아 대륙에 파동 형태, 우리나라와 일본 주변에 고기압성 편차, 오호츠크 해 부근 저기압성 편차와 북태평양에 고기압성 편차가 나타났을 때 우리나라 기온이 높았던 경향을 보였다. 2005년 6월에 오호츠크 해 부근 저기압성 편차와 북태평양 동편의 고기압성 편차는 6월 기온이 높았던 해 합성장과 유사했으나 중국과 러시아에 전반적으로 저기압성 편차가 나타나 기온이 높았을 때와 다른 경향을 보였는데, 이는 전 지구적인 대규모 순환에 의한 영향 보다는 우리나라 주변을 둘러싼

순환장의 영향으로 서풍에 의한 고온 건조한 공기가 유입되면서 기온이 높았던 사례로 분석된다.

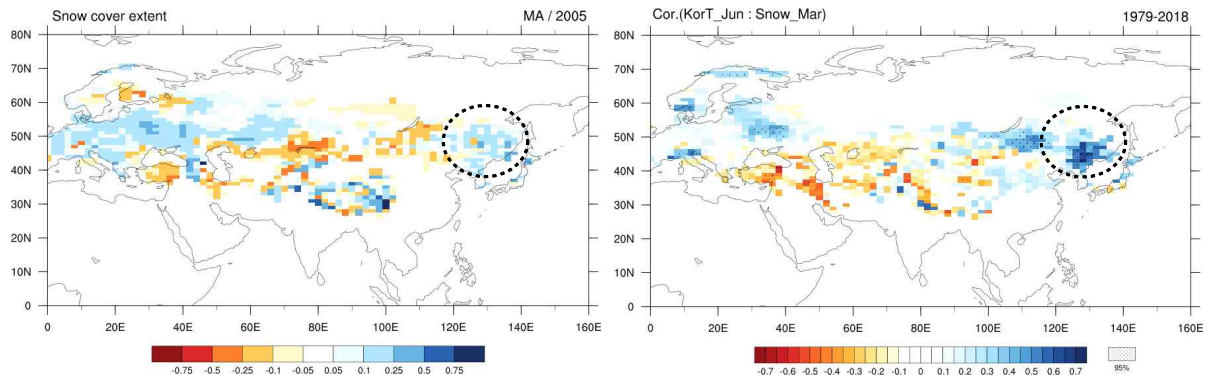


Figure 29. (Left) Snow cover anomalies for Mar-Apr 2005, and (Right) correlation between Mar snow cover and Jun temperature in South Korea.

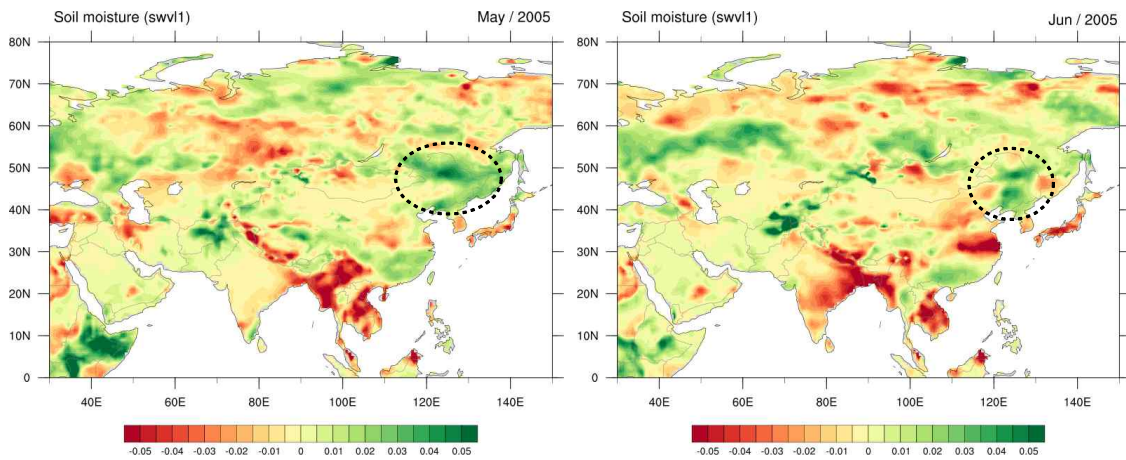


Figure 30. Soil moisture anomalies in (Left) May and (Right) Jun 2005.

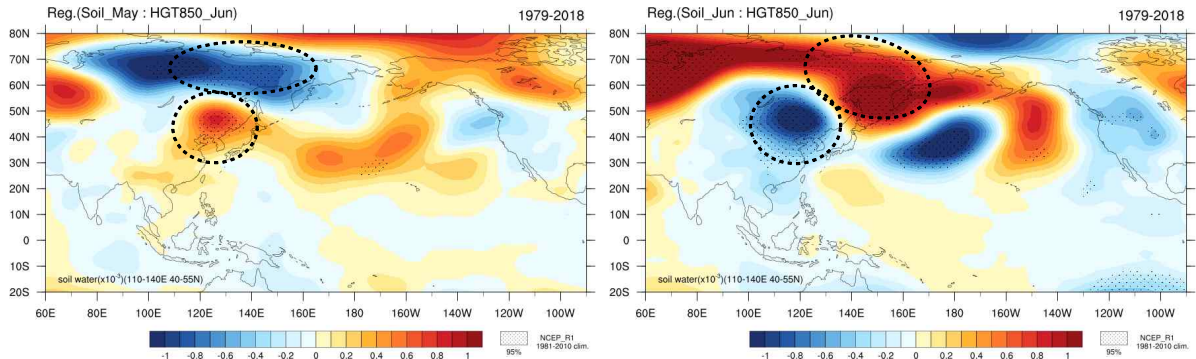


Figure 31. Linear regression of Jun 850hPa geopotential height with respect to the (Left) May and (Right) Jun soil moisture averaged over the eastern China (110-140E, 40-55N). Soil moisture is multiplied by 10^{-3} . Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

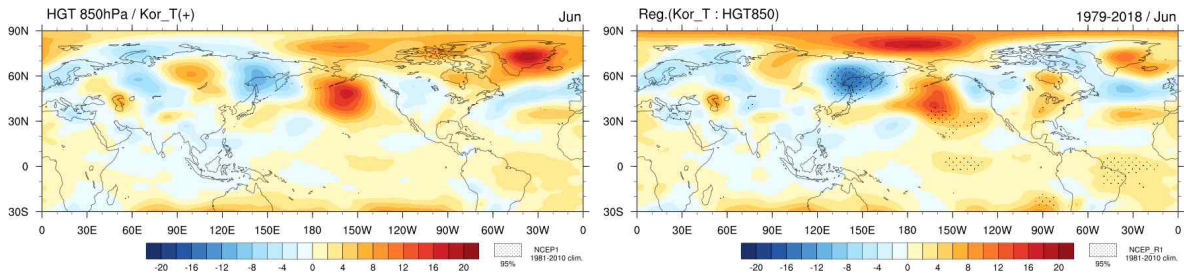


Figure 32. (Left) Composite map of Jun 850hPa geopotential height anomalies for the case of above than normal Jun temperature in South Korea. (Right) Linear regression of Jun 850hPa geopotential height with respect to the Jun temperature in South Korea. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

(나) 7월 극한 기온 사례: 2018년 7월

2018년 여름철은 7월 초부터 8월까지 폭염이 기승을 부렸으며 특히 7월 중순부터 8월 중순까지는 일 평균기온이 90퍼센타일을 넘는 날이 지속되었다. 7월에 시작된 폭염이 8월까지 이어졌으며 폭염의 원인도 같기 때문에 7월과 8월을 함께 분석했다. 7월은 전국 평균기온 26.8℃로 평년보다 2.3℃ 높았으며, 평균 최고기온 31.6℃, 평균 최저기온 22.9℃로 평년보다 각각 2.8℃, 1.8℃ 높았다. 월 강수량은 172.3mm로 평년보다 적었으며 장마가 매우 빠르게 종료되었다. 8월은 전국 평균기온 27.3℃로 평년보다 2.2℃ 높았으며, 평균 최고기온 32.2℃, 평균 최저기온 23.3℃로 평년보다 각각 2.4℃, 1.8℃ 높았다. 8월 강수량은 282.1mm로 평년과 비슷했다. 2018년 7월은 평균기온과 최고기온 최고 순위로 2위를 기록했고 (1위 1994년), 8월은 평균기온 최고 순위로 2013년과 함께 1위를 기록했으며 최고기온은 2위, 최저기온은 3위를 기록해 매우 무더운 여름이었다. 7월 초반 한차례 기온변동 후에 기온이 큰 폭으로 증가한 뒤 평년보다 높은 기온이 8월까지 계속해서 이어졌으며 최고기온과 최저기온도 평균기온과 유사한 경향을 보였다.

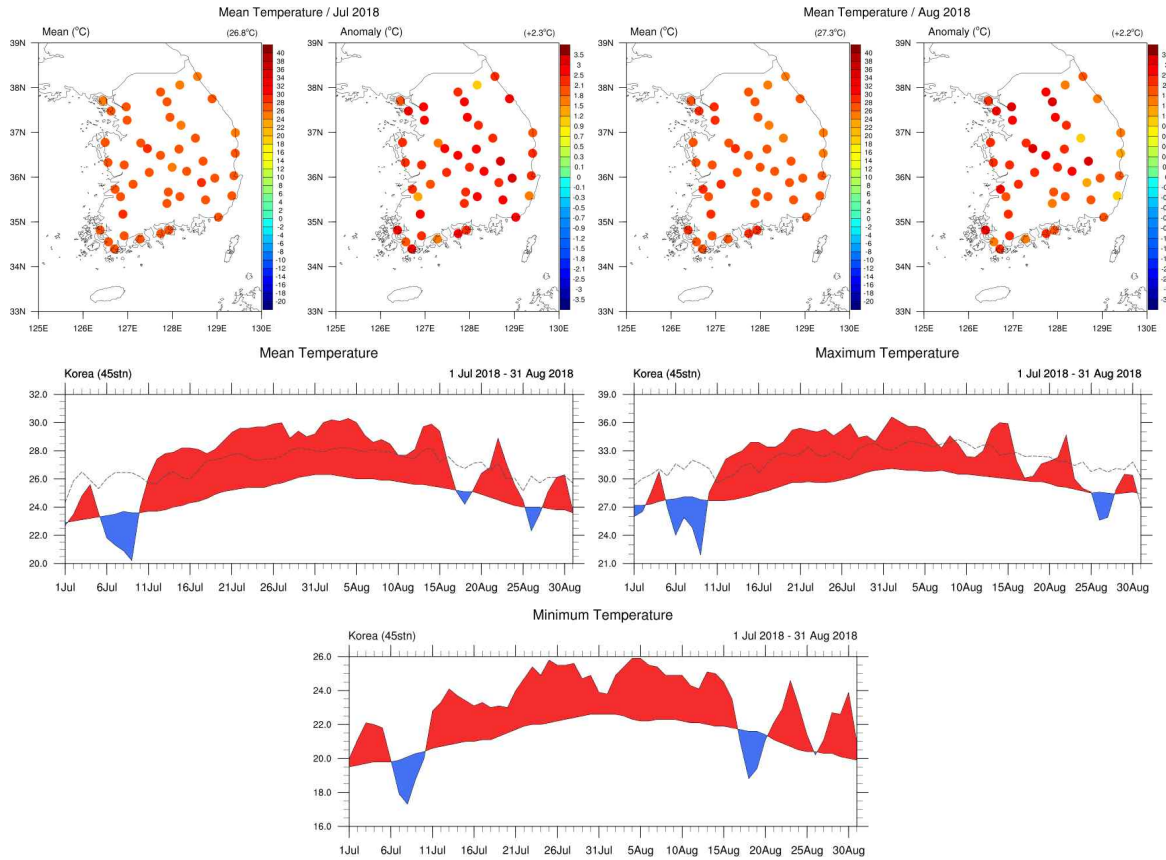


Figure 33. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Jul and Aug 2018, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Jul-Aug 2018 (dashed line indicates 90 percentile of temperature).

2018년 7월과 8월 대기 순환장 분포는 약간의 차이는 있었으나 전체적으로 유사했다. 상층 200hPa 지위고도장에서 중위도 대부분의 지역에 양의 편차가 나타났는데 특히 스칸디나비아 반도와 카스피 해 주변, 우리나라 북쪽, 북아메리카 동쪽에 강한 양의 편차가 위치하고 북아메리카 북극쪽에는 음의 편차가 위치했다. 500hPa 지위고도장도 200hPa 지위고도장과 유사하게 스칸디나비아 반도, 우리나라 주변, 알래스카 만, 북아메리카 동쪽을 중심으로 양의 편차, 북아메리카 북쪽에 음의 편차가 나타났으며 이러한 패턴은 상층부터 하층까지 유사한 순압구조를 보였다. 해면기압에서는 북유럽~북러시아 서부, 북태평양~알래스카 만, 중위도 북대서양에 양의 편차가 위치했고 북극에서는 음의 편차가 나타났다. 우리나라에는 양의 지위고도 편차가 위치했고 북태평양고기압은 일본 동쪽과 알래스카 만 부근에서 강화되었다. 2m 기온은 북반구 대부분의 지역에서 강한 양의 기온 편차를 보였으며 특히 스칸디나비아 반도, 카스피 해 주변, 인도 북쪽지역, 북아메리카 서해안 지역에서 양의 기온 편차가 강하게 나타났다. 상층 동서 바람은 우리나라 주변에서 평년보다 바람 세기가 감소했고 제트는 북상했으며 200hPa 지위고도장에서 강한 양의 편차가 나타난 지역에서 바람세기는 평년보다 약했다.

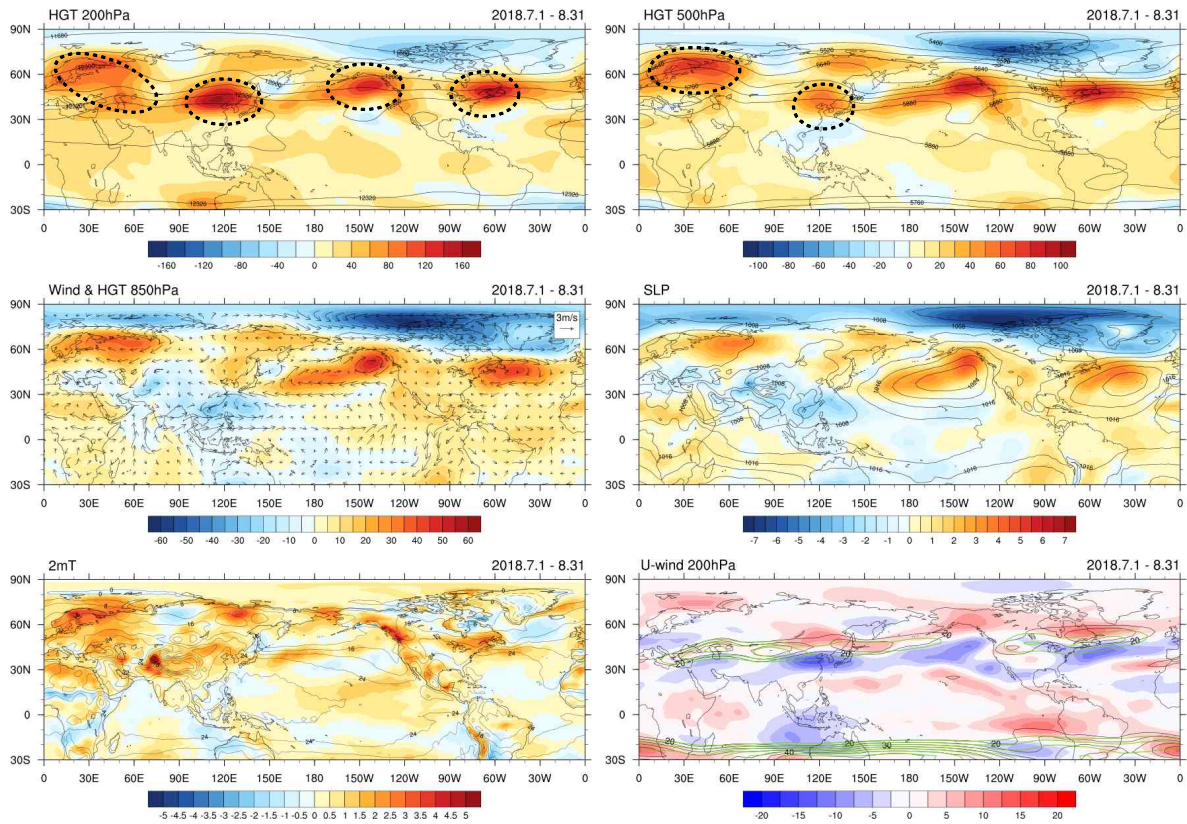


Figure 34. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Jul-Aug 2018 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).

우리나라 주변 해수면온도는 평년보다 높았으며 특히 일본 동쪽 북서태평양 해수면온도가 매우 높았는데 이 지역에 위치한 양의 지위고도 편차의 영향으로 볼 수 있다. 열대 태평양 해수면온도는 동태평양에서 적도 남쪽은 음의 편차, 적도 북쪽은 양의 편차를 보였다. 열대 중~서태평양에서는 양의 온도 편차가 나타났으나 필리핀과 인도네시아 일대의 maritime continent 지역에서는 약한 음의 온도 편차가 나타났다. 7월과 8월 Nino3.4 지수는 각각 0.25, 0.11 이었으며, Nino3 지수는 0.27, -0.04로 중립상태를 나타냈다. 2018년 여름은 2017-2018년 겨울 라니냐 이후 엘니뇨로 전환되는 시기였다. 인도양 해수면온도는 양의 편차를 나타냈으며 북대서양에서는 적도에서 북극 방향으로 음~양~음의 편차로 tripole 분포가 나타났다. 해수면온도가 높은 열대와 아열대 서태평양~중태평양 넓은 지역에서 대류활동이 활발했으며 대류활동이 활발한 지역의 북쪽인 중위도에서는 대류활동 억제를 보였다. 인도 북서쪽에서도 활발한 대류활동이 나타났다. 8월에는 7월에 비해 열대 중태평양의 대류활동은 약화되었으나 서태평양과 인도 북부에서의 대류활동은 계속해서 활발하게 나타났다.

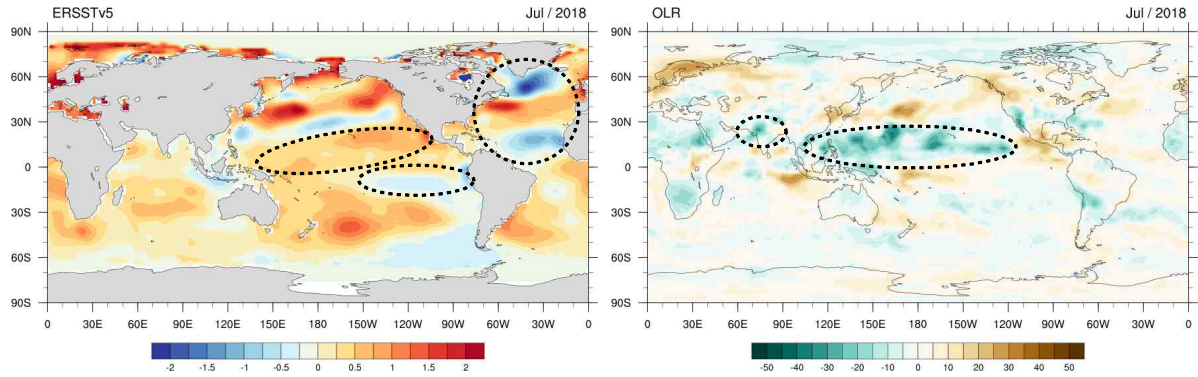


Figure 35. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Jul 2018.

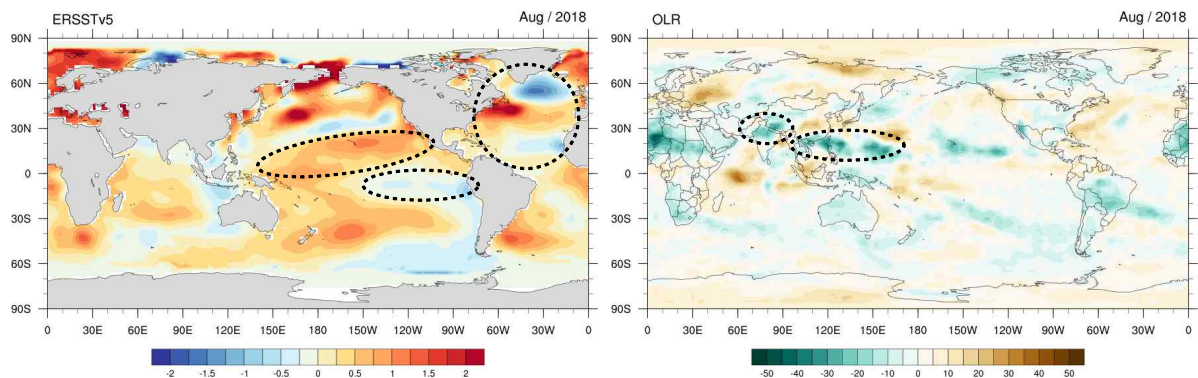


Figure 36. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Aug 2018.

우리나라 여름철 순환장은 아열대 서태평양의 대류활동과 밀접하게 연관되어 있는데 (Kwon et al., 2005) 아열대 서태평양에서 대류활동이 활발하면 보상하강운동으로 중위도에서는 대류활동이 약화되고 고기압성 편차가 발달하는데 영향을 줄 수 있다. 2018년 여름철 대류활동이 활발했던 아열대 서태평양 필리핀 해 주변 지역에서 평균한 상향장파복사(Outgoing Longwave Radiation; OLR)를 7월과 8월 지위고도장에 회귀분석해보면 아열대 서태평양 지역에는 저기압성 편차, 우리나라 주변~북태평양까지 중위도에는 고기압성 편차가 나타났는데 (Figure 37), 이러한 패턴은 Pacific-Japan (PJ, Kosaka and Nakamura, 2006) 패턴으로 알려져 있다. 해면기압의 2018년 7월 현황을 보면 알려진 PJ패턴과 매우 유사하며 연직 속도에서 아열대 지역에 활발한 상승기류와 중위도 부근의 하강기류가 잘 나타나 (Figure 38,39) 우리나라 주변의 고기압성 편차는 서태평양 대류활동과 연관된 PJ 패턴의 영향이 있었던 것으로 볼 수 있다. 아열대 서태평양에서 활발한 대류활동은 서태평양부터 중태평양까지 높은 해수면온도와 더불어 MJO 활동과도 관련이 있다. 기온이 급격히 상승한 7월 12일 경부터 MJO 활동이 활발해졌고 위상 5-6에 위치해 (Figure 40) 서태평양에서의 대류활동이 강화될 수 있었다. MJO는 위상 5-6일 때 대류활동이 활발한 구역이 maritime continent~서태평양 지역에 위치하는 것으로 알려져 있다.

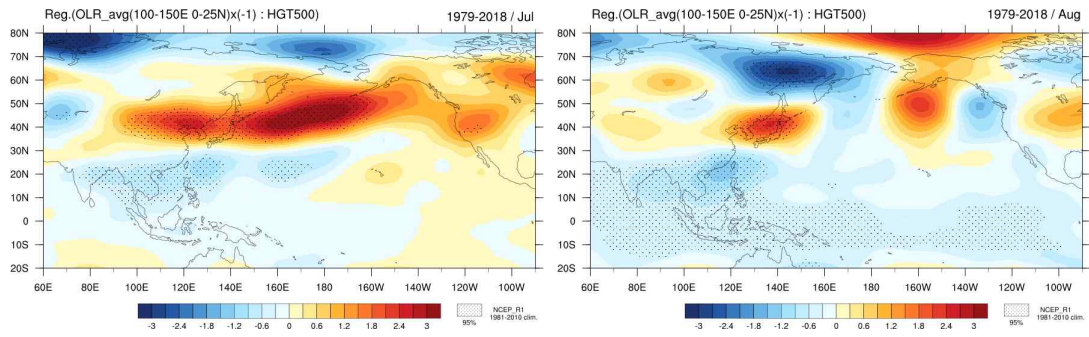


Figure 37. Linear regression of (Left) Jul and (Right) Aug 500hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the western Pacific (100–150E, 0–25N). Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student’ s t-test.

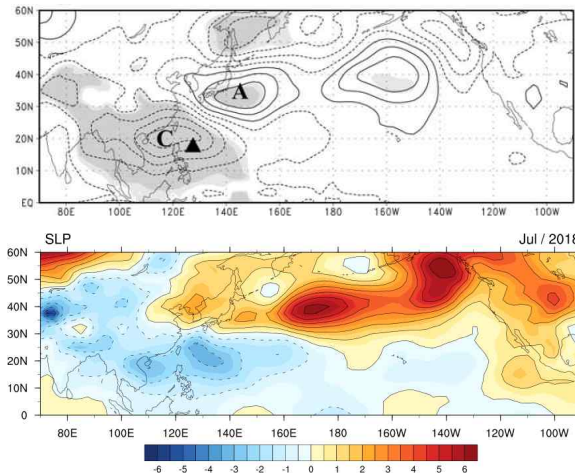


Figure 38. (Top) Composite maps of sea level pressure anomalies for the strongest monthly events of the PJ pattern (Fig.4(c) in Kosaka and Nakamura, 2006), (Bottom) sea level pressure anomalies in Jul 2018.

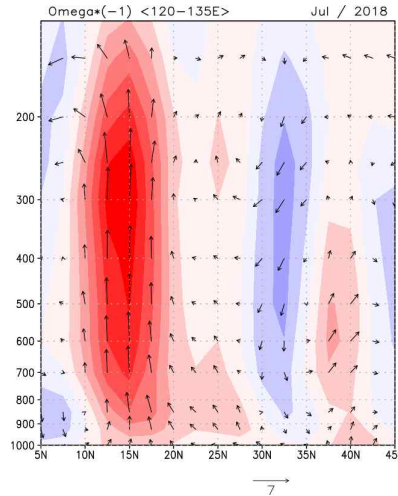


Figure 39. Vertical distribution of the longitudinal averaged (120–135E) vertical wind anomalies (ω [Pa/s], shading) in Jul 2018. Vector indicates meridional and vertical wind anomalies. Vertical wind is multiplied by -100 .

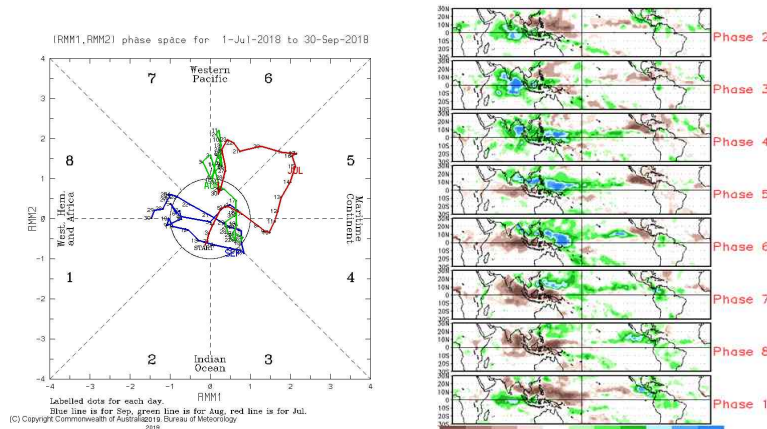


Figure 40. (Left) MJO phase during Jul–Sep 2018, and (Right) composite maps of precipitation anomalies for MJO phase in May–Sep. (Bureau of Meteorology <http://bom.gov.au/climate/mjo/>, Climate Prediction Center <http://cpc.ncep.noaa.gov/>)

상층 200hPa 지위고도에서 중위도 북미~유럽~중아시아~동아시아에 걸쳐 파동 형태로 나타나는 양의 지위고도 편차는 circumglobal teleconnection (CGT) 패턴과 유사했다. CGT 패턴은 북반구 여름철에 나타나는 원격상관 패턴으로 200hPa 지위고도상의 변동성과 관련되어 있으며 동아시아 지역 여름철 기온과 강수에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Figure 41, Ding and Wang, 2005). CGT 패턴과 관련된 상층 양의 지위고도 편차가 우리나라에 위치하면 우리나라는 고기압성 편차의 영향을 받아 덥고 건조한 경향이 있다. CGT 패턴은 인도 지역 강수와 밀접하게 관련되어 있는데, CGT 패턴이 나타났을 때 인도 북서쪽에서 강수가 증가하는 신호 즉, 인도 여름몬순이 강화되는 신호가 나타난다. 인도 북서쪽 강수가 증가하면 강화된 강수에 의해 상승운동이 강화되고, 이로 인해 유도된 강제력이 중위도 상층 편서풍에 영향을

주면서 CGT 패턴을 강화시킬 수 있는 것으로 알려졌다.

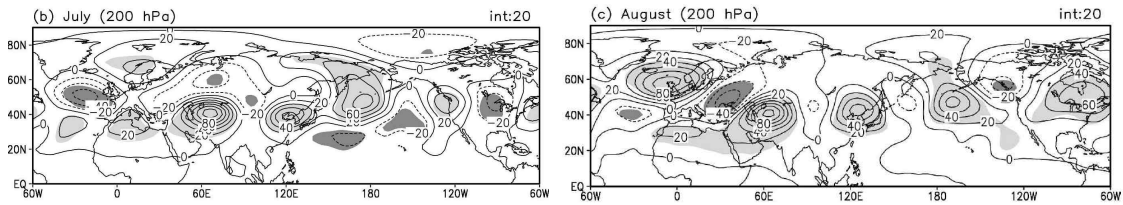


Figure 41. Composite difference of geopotential height at 200hPa between positive and negative CGTI years for (Left) Jul and (Right) Aug. Shading denotes regions of difference at 95% confidence level with positive and negative values. (Fig.5(b),(c) in Ding and Wang, 2005)

선행 연구에서 제시된 CGT index (CGTI, 60-70E, 35-40N 영역 평균된 200hPa 지위고도 편차, Ding and Wang, 2005)에 대한 200hPa 지위고도의 회귀분석 패턴을 구해보면 중위도를 따라서 나타나는 파동 형태의 패턴을 볼 수 있는데 (Figure 42) 이는 2018년 7월 200hPa 지위고도 패턴과도 유사했다. 또한 2018년 여름에는 인도 북서부 지역에서 대류활동이 평년보다 강하게 나타났는데, 이 지역에서 평균한 OLR에 대한 200hPa 지위고도 회귀분석 패턴에서도 CGT와 유사한 패턴을 볼 수 있어 (Figure 43) 인도 북서부에서 강화된 대류활동으로 인한 강제력이 CGT 패턴이 강화되는데 영향을 준 것으로 보인다.

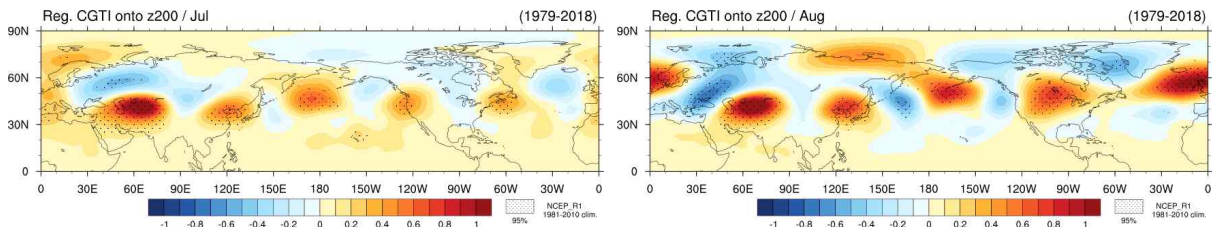


Figure 42. Linear regression of (Left) Jul and (Right) Aug 200hPa geopotential height with respect to the CGTI. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

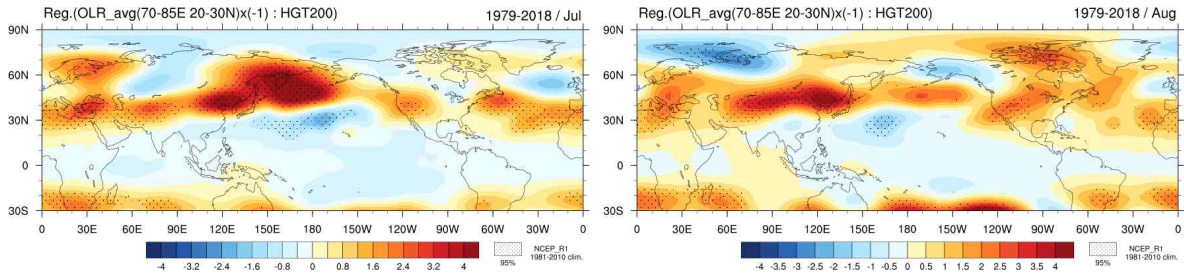


Figure 43. Linear regression of (Left) Jul and (Right) Aug 200hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the northwestern area of India (70–85E, 20–30N). Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student’s t-test.

상층에 고기압이 발달하게 된 요인으로 북대서양으로부터의 파동 전파에 의한 영향을 살펴봤다. 북대서양 해수면온도에서 적도부터 북극 방향으로 음~양~음 편차의 tripole 패턴이 나타났는데 과거 7월 기온이 높았던 1994년과 2013년에도 북대서양에서 유사한 해수면온도 패턴이 나타났다. 이러한 해수면온도 패턴은 북대서양진동(NAO)과 관련된 대기패턴과의 상호작용을 통해 서로 유지될 수 있으며 동아시아 여름철 기온과 강수에 영향을 줄 수 있는 것으로 선행 연구에서 제시된 바 있다 (Zou et al., 2013; Wu et al., 2011).

북대서양 tripole 해수면온도 분포를 지수로 만들어 연도별로 살펴보았다. 북대서양 tripole 해수면온도 지수는 2018년 7월의 해수면온도 분포를 바탕으로 영역을 정한 다음, 양의 온도 편차 영역과 음의 온도 편차 영역의 차이로부터 구했다. Figure 44에 표시된 박스 영역은 (1)55–20° W 50–60° N, (2)70–35° W 35–45° N, (3)50–15° W 13–23° N을 나타내며, 지수는 각 박스 영역에서 평균한 해수면온도로부터 $지수 = (2) - [(1) + (3)] / 2$ 으로 계산하였다. Figure 45에 나타낸 7월 북대서양 tripole 해수면온도 지수를 보면 과거보다 최근 들어 양의 값을 보인 해가 많았고 강도가 증가했으며 기온이 매우 높았던 2018년, 1994년, 2013년에 매우 큰 양의 값을 나타냈다. 북대서양 tripole 해수면온도 지수에 대한 200hPa 지위고도 회귀분석을 해보면 (Figure 47) 북유럽, 중앙아시아, 우리나라와 북태평양, 북아메리카에서 고기압성 편차가 나타났는데 이는 2018년 7월 패턴과 매우 유사했다. 2018년에는 북대서양에서 tripole 패턴이 봄부터 지속되었으며 양의 북대서양진동과 양의 북극진동도 봄부터 계속되었다 (Figure 45,46). 양의 북대서양(북극)진동일 때는 북대서양 북쪽(북극)에 저기압성 편차, 북대서양 중위도(중위도)에 고기압성 편차가 위치하는데, 저기압성/고기압성 편차 지역은 tripole 해수면온도 분포에서 음의 편차/양의 편차가 나타난 지역에 위치해, 양/음의 해수면온도 편차와 순환장의 고/저기압성 편차가 서로 상호작용을 통해 유지, 강화되면서 북대서양에 고기압성 편차가 계속해서 위치할 수 있었던 것으로 볼 수 있다. 북대서양의 지속적인 고기압성 편차는 파동소스로 작용해 제트를 따라 유라시아 대륙으로 파동이 전파되고 전파된 파동은 CGT 패턴을 더욱 강화시켜 우리나라 상층 고기압성 순환 강화에 영향을 준 것으로 볼 수 있다 (Figure 48).

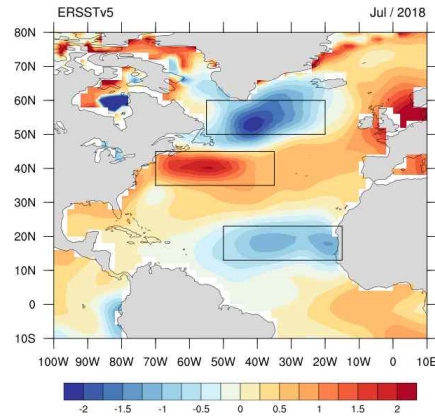


Figure 44. Distributions of the North Atlantic sea surface temperature anomalies in Jul 2018. Box area is used for the north Atlantic tripole SST index.

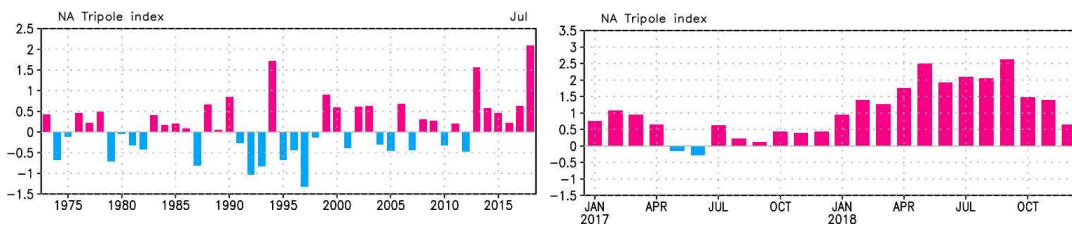


Figure 45. Time series of (Left) the north Atlantic tripole SST index for Jul, and (Right) the index from Jan 2017 to Dec 2018.

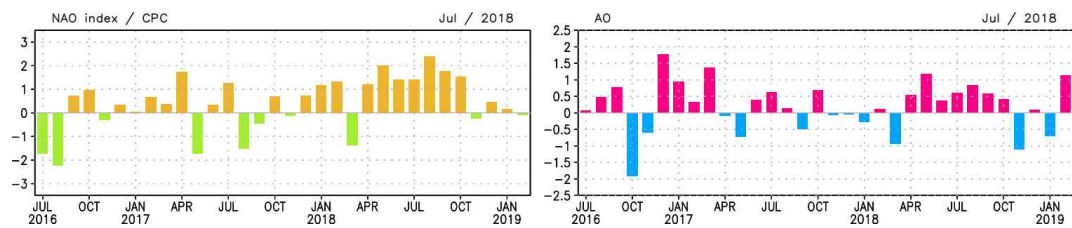


Figure 46. (Left) North Atlantic Oscillation (NAO) index and (Right) Arctic Oscillation (AO) index from Jul 2016 to Feb 2019.

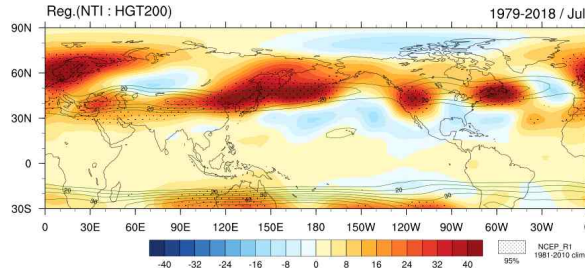


Figure 47. Linear regression of the Jul 200hPa geopotential height with respect to the north Atlantic tripole SST index. Green contour indicates climatology of Jul 200hPa zonal wind above the 15m/s. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

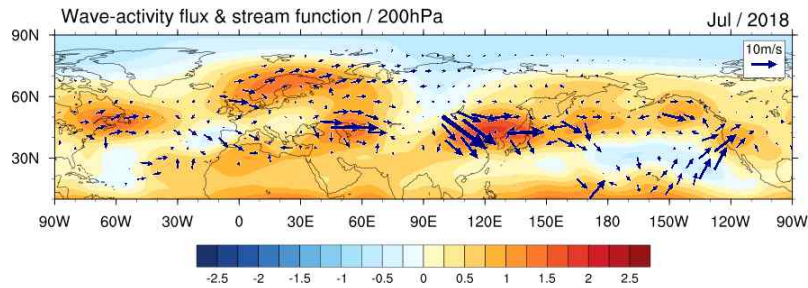


Figure 48. 200hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Jul 2018.

우리나라 상층에 고기압이 강하게 발달한 데에는 티베트에 중심을 둔 상층 고기압 강화에 따른 영향도 있었다. Figure 49의 2018년 7월과 8월 200hPa 지위고도 평균장을 보면, 12480gpm 위치가 평년에 비해 동쪽으로 확장되어 우리나라 북쪽에 위치한 것을 볼 수 있다. 특히 12520gpm 선은 평년에는 중국 남부에 위치했던 반면 2018년 7월에는 우리나라와 일본 남부까지 확장했는데, 이는 고기압의 영향이 평년보다 더 동쪽까지 확장한 것으로 볼 수 있다. 500hPa 지위고도 평균장의 5880gpm 선도 평년보다 북쪽에 위치해 우리나라는 북태평양고기압의 영향권에 들어있었다. 따라서 2018년 여름에는 상층의 티베트 고기압과 북태평양고기압이 동시에 우리나라를 덮고 있는, 상층부터 하층까지 고기압이 강하게 발달한 순압대기 구조를 보였다. Figure 50은 우리나라 위도 대에서 평균한 7월과 8월 200hPa 지위고도를 연도별로 나타내는데, 연도별 12520gpm의 동쪽 가장자리 위치를 보면 최근 기간으로 올수록 우리나라 주변에서 고기압의 강도가 더 강해지고 동쪽으로 확장한 것을 볼 수 있었고 이는 최근 들어 상층 고기압이 동쪽으로 장출하는 경우가 많아지고 있음을 보여준다.

상층 고기압의 강화는 지위고도의 선형 증가 추세와도 관련이 있다. Figure 51은 7월 200hPa 지위고도의 선형 추세를 나타내는데, 북극을 제외한 북반구 대부분 지역에서 증가추세를 보였으며 과거보다는 최근 기간에 증가 추세가 강한 것으로 나타났다. 지위고도

증가추세가 강하게 나타난 지역은 2018년 지위고도장에서 양의 편차가 강하게 나타난 지역과도 유사했다.

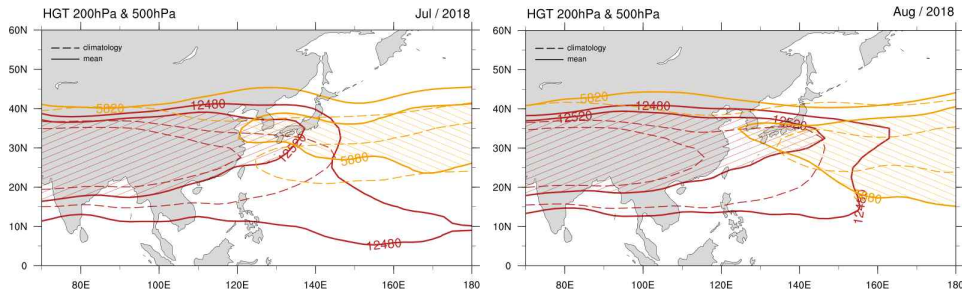


Figure 49. Geopotential height lines of 5820gpm, 5880gpm (yellow), 12480gpm, 12520gpm (red) in Jul and Aug 2018. Solid line indicates mean and dashed line indicates climatology.

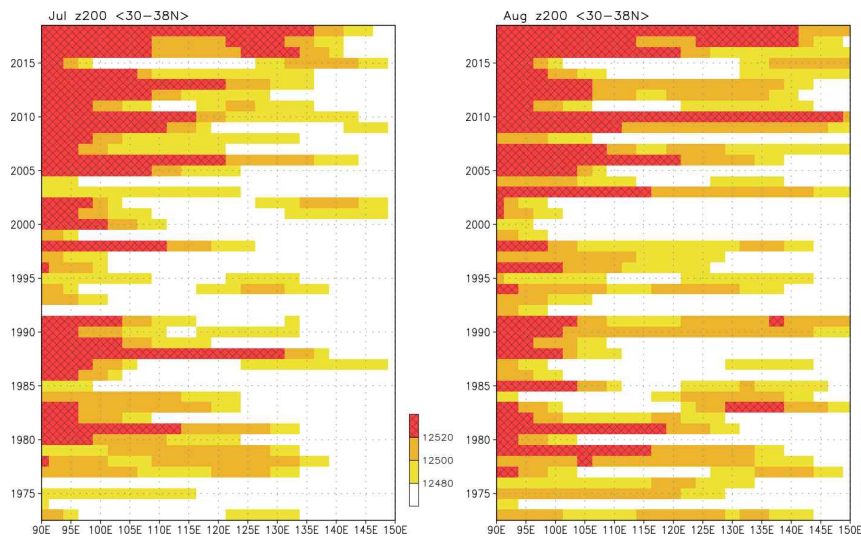


Figure 50. Hovmoller diagram of latitudinal averaged (30-38N) 200hPa geopotential height for (Left) Jul and (Right) Aug.

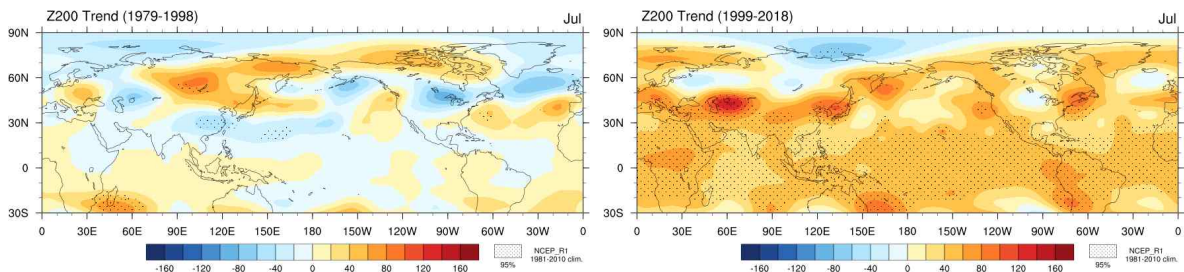


Figure 51. Linear trend of Jul 200hPa geopotential height for (Left) 1979-1998 period and (Right) 1999-2018 period. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

(다) 8월 극한 기온 사례: 2016년 8월

2016년 8월은 전국 평균기온 26.7°C로 평년보다 1.6°C 높았으며, 평균 최고기온 32.0°C, 평균 최저기온 22.5°C로 평년보다 각각 2.2°C, 1.0°C 높았다. 월 강수량은 76.2mm로 평년보다 매우 적었으며 8월 강수량 최저 1위를 기록했다. 월 초부터 평년보다 높은 기온이 계속해서 유지되면서 폭염이 이어지다가 후반에 비가 내리면서 기온이 급격히 낮아졌다.

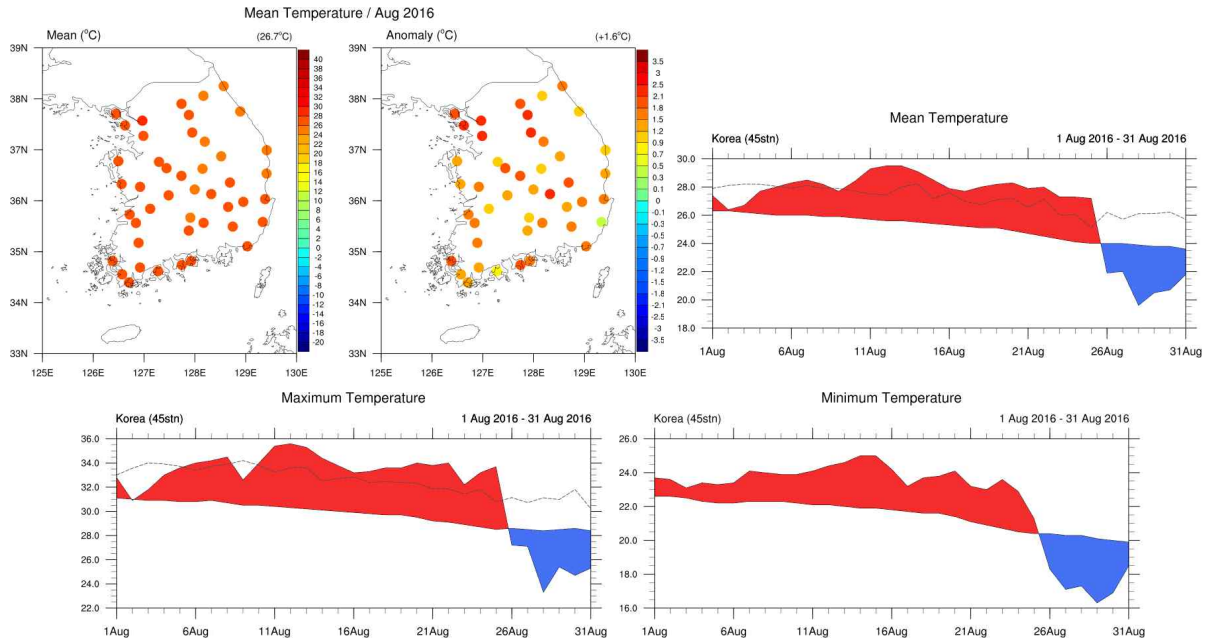


Figure 52. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Aug 2016, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Aug 2016 (dashed line indicates 90 percentile of temperature).

대기 순환장을 살펴보면, 상층 200hPa 지위고도장에서 우랄산맥 주변과 바이칼 호 남쪽의 몽골, 캄차카 반도 주변에 매우 강한 양의 편차가 위치했으며 500hPa 지위고도 또한 200hPa 지위고도와 유사했다. 우랄산맥과 캄차카 반도 부근의 양의 편차는 하층까지 이어져서 나타났으나 몽골의 양의 편차는 상층에서만 강하고 하층으로 갈수록 약해지는 특징을 보였다. 우리나라는 북서쪽 몽골 부근의 양의 편차와 캄차카 반도 부근의 양의 편차 사이에 위치했으며 하층에서는 음의 지위고도 편차 영역에 위치했다. 하층 바람은 우리나라 북서쪽의 고기압성 편차와 남동쪽의 저기압성 편차의 영향으로 북풍편차가 우세했다. 해면기압은 상층 패턴과 유사하게 카스피 해 북동쪽 우랄산맥 부근과 캄차카 반도 남쪽, 북태평양 동편에 양의 편차가 위치했고 북극에서는 음의 편차가 나타났으며 북극진동 지수 0.47로 양의 북극진동을 보였다. 하층에서 일본 남쪽에서 보이는 저기압성 편차는 태풍으로 인한 저기압이 반영된 것으로 볼 수 있으며 2016년 8월에는 7개의 태풍이 발생했는데 이 중 6개가 일본 남쪽 바다에서 발생해 일본 동북부에 영향을 주었다. 2m 기온은 시베리아 동북부와 북유럽을

제외한 유라시아 대륙 대부분의 지역에서 양의 편차가 나타났으며 카스피 해 북쪽 우랄산맥 주변 지역은 양의 기온 편차가 매우 강했고 북태평양과 북아메리카 북쪽에서도 강한 양의 편차가 나타났다. 상층 동서바람은 우리나라 주변에서 평년보다 바람세기가 약했고 제트가 북상하면서 바이칼 호 주변과 캄차카 반도에서는 평년보다 바람이 강했다.

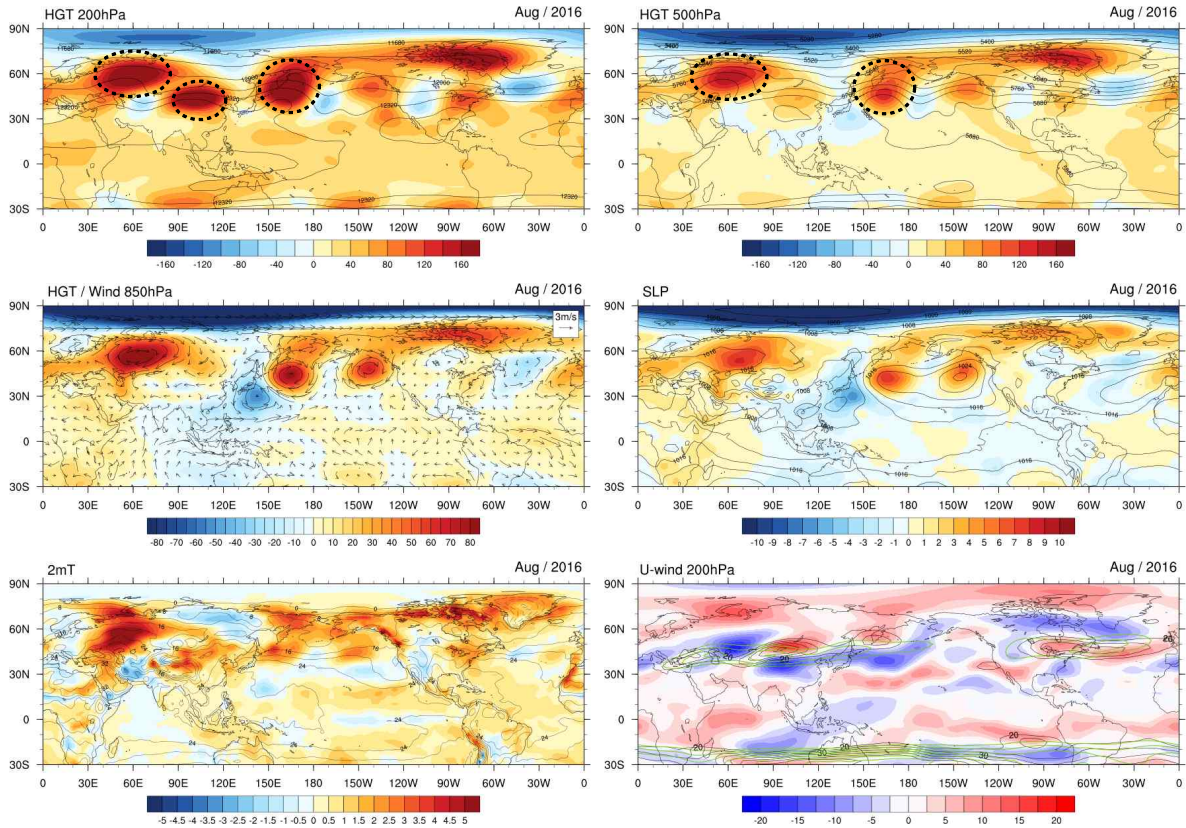


Figure 53. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Aug 2016 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).

열대 해수면온도는 적도를 따라 동태평양부터 중태평양까지 음의 편차가 길게 나타나고 서태평양에서는 양의 편차가 나타났다. 음의 편차는 적도 주변의 좁은 지역에만 한정되어 나타났고 그 북쪽으로는 양의 편차, 중위도 부근에 다시 음의 편차, 그 북쪽에 캄차카 반도 남쪽~알래스카 만까지 강한 양의 편차가 나타났다. Nino3.4 지수 -0.51 , Nino3 지수 -0.56 으로 약한 라니냐 상태를 나타냈는데 2015-2016년 겨울 강한 엘니뇨 발생 이후 엘니뇨가 소멸하는 시기였으며 2016년 겨울에는 약한 라니냐가 발생했다. 이전 겨울에 강한 엘니뇨가 발생한 후 소멸하고 라니냐로 발달하는 단계였으나 라니냐 발달기의 해수면온도와는 다른 분포를 보여 동태평양에 음의 해수면온도 편차가 넓게 분포하지 않고 적도 부근에만 모여 있는 특이한 형태를 보였다. 또한 북반구 고위도 해수면온도가 매우 높은 상태로 북극 주변과 북태평양, 북대서양 서편의 해수면온도가 평년보다 매우 높았다. 대류활동은 해수면온도가 높은 아열대

서~중태평양에서 강하게 나타났고 인도 북서쪽~중국 서부지역에서도 대류활동이 활발했던 것으로 나타났다.

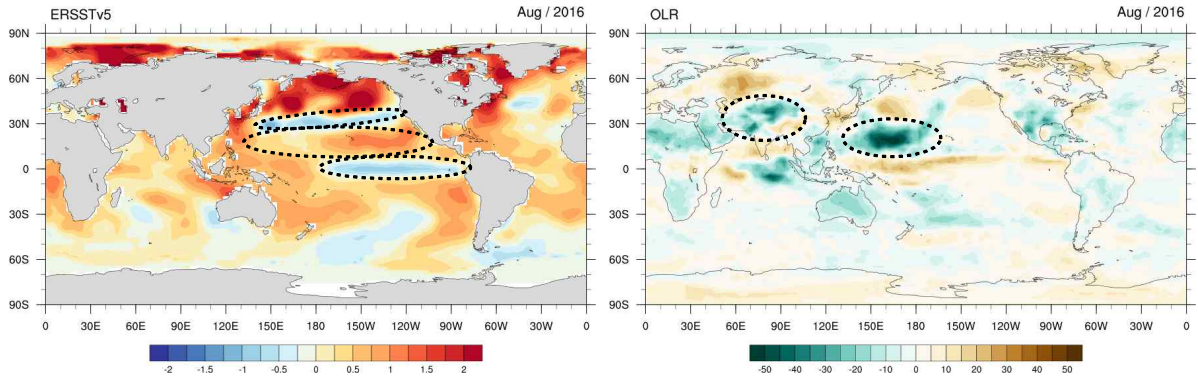


Figure 54. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Aug 2016

2016년 8월은 대기 순환장 분포에서 볼 수 있듯이 우리나라에 고기압성 편차가 위치하지 않았음에도 기온이 매우 높았으며 기존의 알려진 폭염 발생과는 차이가 있었다. Figure 55의 200hPa과 500hPa 지위고도를 보면 200hPa 지위고도의 12480gpm은 평년보다 동쪽으로 뻗어나가기는 했으나 북쪽으로는 확장하지 않아 우리나라 남쪽에 위치하였고, 12520gpm도 평년보다는 동쪽에 위치했으나 우리나라를 덮지는 않았다. 북태평양고기압 세력을 나타내는 500hPa 지위고도의 5880gpm은 평년보다 남북방향으로는 확장했으나 가장자리가 평년보다 동쪽에 위치해 우리나라는 두 고기압 영역에 들어가지 않았다.

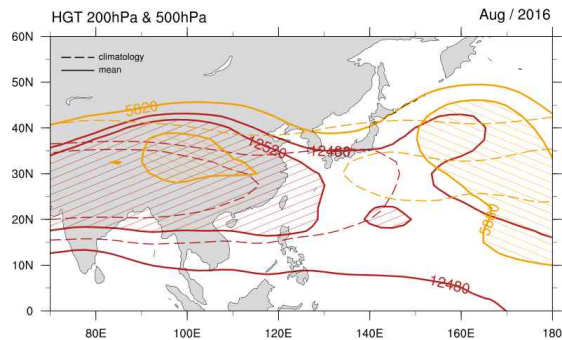


Figure 55. Geopotential height lines of 5820gpm, 5880gpm (yellow), 12480gpm, 12520gpm (red) in Aug 2016. Solid line indicates mean and dashed line indicates climatology.

2016년 8월의 순환장에서 기존의 기온이 높았던 때와 다르게 특이했던 점으로 캄차카반도 주변에 매우 강한 고기압이 위치했다. 캄차카반도 주변에 위치한 고기압성 편차는 상층부터 하층까지 순압적으로 발달하였고 블로킹으로 작용해 대기의 원활한 흐름을 방해했던 것으로

보인다. 캄차카 반도 주변의 고기압성 편차는 중서태평양에서 활발했던 대류활동과 관련이 있다. 2016년 8월에는 일본 남동쪽 아열대 중서태평양에서 대류활동이 매우 활발했는데 (Figure 54), 이 지역에서 활발한 대류활동으로 인한 보상하강운동으로 대류활동 지역 북쪽인 캄차카 반도 주변에서 고기압성 편차가 나타날 수 있음을 선행 연구에서 제시한 바 있다 (Yeh et al., 2018). Figure 56은 대류활동이 활발했던 아열대 중서태평양 지역에서 평균한 OLR을 지위고도에 회귀분석한 것으로 캄차카반도 주변에 강한 고기압성 순환이 나타나는 것을 볼 수 있었고 몽골에서도 고기압성 순환이 유의하게 나타났다.

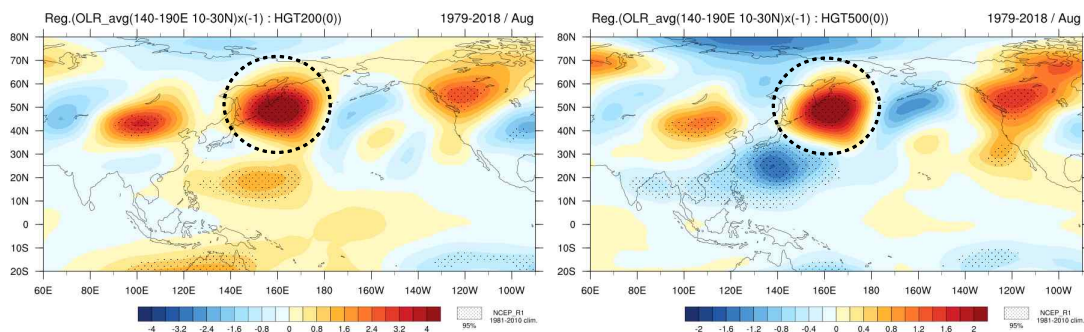


Figure 56. Linear regression of the Aug (Left) 200hPa and (Right) 500hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the central-western subtropical Pacific (140-190E, 10-30N). Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

아열대 중서태평양의 강한 대류활동은 해수면온도 분포와 관련 있을 것으로 보인다. 2016년 여름은 라니냐 발달시기였으나 동태평양에서 음의 해수면온도 편차가 적도 부근의 좁은 지역에서만 나타나고 그 북쪽으로 아열대~중위도 지역에 양의 해수면온도 편차, 북쪽 중위도 좁은 지역에서 다시 음의 해수면온도 편차가 나타나 띠 형태를 이루었다. 이러한 독특한 구조로 인해 일반적인 라니냐 발달시기의 대류활동 지역보다 북쪽인, 해수면온도가 낮은 구역 사이의 해수면온도가 높은 아열대 서~중태평양에서 대류활동이 활발할 수 있었던 것으로 볼 수 있다.

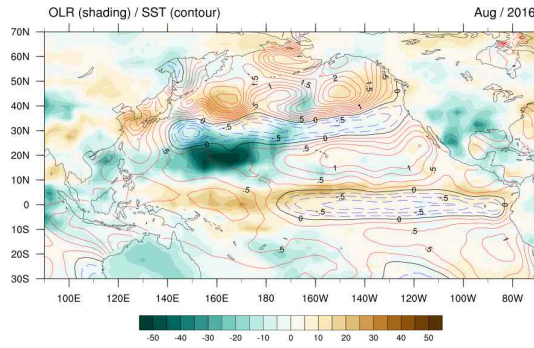


Figure 57. Distributions of the North Pacific SST (contour) and OLR (shading) anomalies in Aug 2016.

500hPa 지위고도 편차를 캄차카반도 주변 지역에서 평균해 연도별로 살펴보면, 과거 8월에 캄차카반도 주변에서 고기압성 순환이 강했던 경우 (시계열에서 표준편차보다 큰 경우) 우리나라 기온은 평년보다 높은 경우 3개, 평년과 비슷한 경우 3개, 평년보다 낮은 경우 1개로 평년보다 높거나 낮은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다 (Figure 58). 선행 연구에서는 일평균 자료에서 캄차카 반도 부근에 강한 양의 지위고도 편차가 일정기간 유지되었을 때의 우리나라 기온 경향을 살펴보았는데, 기온이 높거나 낮은 경우가 비슷하게 나타났다. 기온이 높았던 경우에는 캄차카반도와 중국 북동부에 고기압성 편차가 서로 분리되어 나타나고 하층 순환장에서도 중국 북부와 시베리아에 고기압성 편차가 발달했으나, 기온이 낮았던 경우에는 캄차카반도 부근의 양의 지위고도 편차는 강했으나 중국 북동부 지역 고기압은 약했던 것으로 나타났다 (김유진 등, 2019). 따라서 캄차카반도 주변에 강한 고기압성 편차가 위치하면 대기 흐름이 정체되면서 기온이 높아질 수 있으나, 캄차카반도 주변의 고기압만으로는 폭염이 유발되기 어려우며 우리나라 서쪽으로부터 고온 건조한 공기 유입이 함께 있어야 기온이 높아지는 것으로 볼 수 있다. Figure 59는 특히 기온이 높았던 기간에 평균한 200hPa과 850hPa의 온도와 바람장으로, 캄차카반도 주변의 고기압이 블로킹으로 작용하면서 서쪽인 몽골 상층에는 상대적으로 온도가 높은 강한 고기압성 편차가 위치해 북풍의 영향으로 우리나라 쪽으로 더운 공기가 유입될 수 있었다. 하층에서는 몽골 지역의 고기압성 편차는 약해졌지만 북풍의 영향을 계속해서 받아 대륙의 고온 건조한 공기가 유입될 수 있었는데 바람은 편차가 아닌 평균장에서도 북풍이 우세했다. 몽골에 위치한 고기압은 우랄산맥 부근에 위치한 고기압과 연관되어 있었는데, Figure 60의 200hPa wave-activity flux에서 우랄산맥 부근의 고기압성 순환 지역에서 몽골을 지나 우리나라 쪽으로 파동이 전파되는 것을 볼 수 있었다.

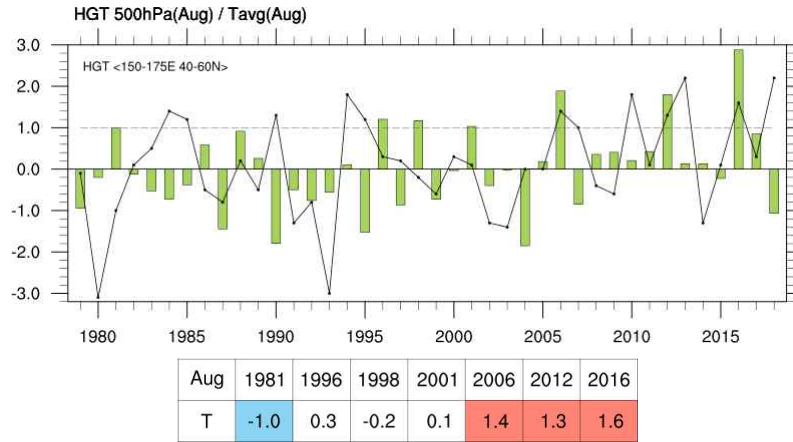


Figure 58. (Top) Time series of the normalized 500hPa geopotential height anomalies averaged over the Kamchatka peninsula (150–175E, 40–60N) and the mean temperature in South Korea for Aug. (Bottom) Aug mean temperature in South Korea for the strongest year of the top panel. Red(blue) shading indicates above(below) normal temperature.

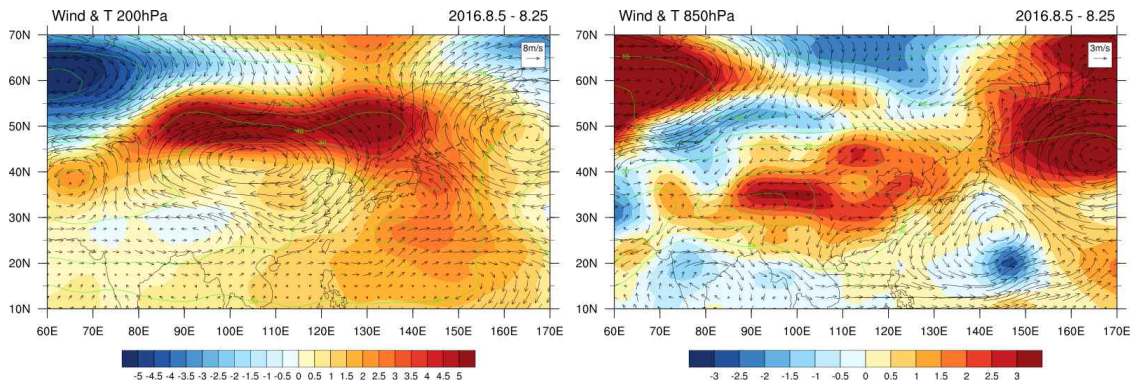


Figure 59. (Left) 200hPa and (Right) 850hPa temperature and wind anomalies for 2016.8.5.–8.25 (shading: anomalies, green contour: mean, vector: wind)

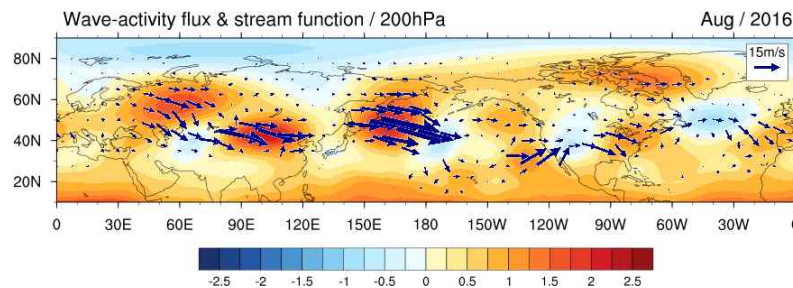


Figure 60. 200hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Aug 2016.

2016년 8월의 대류활동에서 나타난 특이한 점으로 아열대 중서태평양의 대류활동 외에 인도 북서쪽~중국 서부 지역에서도 대류활동이 강하게 나타났다. Figure 61에 나타난 대류활동이 강한 지역에서 경도 평균한 연직 기온과 바람분포에서 활발한 대류활동으로 인해 대류활동 지역 북쪽인 우랄산맥 주변에서는 보상하강운동에 의한 고기압성 편차가 유도될 수 있었음을 볼 수 있었다. 2016년에는 고기압성 편차가 위치한 우랄산맥 주변과 카스피 해 동쪽에서 봄철에 눈덮임이 평년보다 적었고 늦봄~여름에는 유라시아 대륙 북서부에 토양수분이 평년보다 적었다 (Figure 62). 건조한 토양 바로 위에 위치한 공기가 가열되어 기온이 증가하고 다시 뜨거운 공기가 토양을 건조하게 만드는 피드백을 통해 고기압이 유지되는데 기여한 것으로 볼 수 있으나, 토양수분의 영향과 관련된 부분은 추후 자세한 연구가 필요하다.

상층 고기압의 강화는 지위고도의 선형 추세와도 관련이 있다. Figure 63은 8월 200hPa 지위고도의 선형 추세를 나타내는데, 북극을 제외한 북반구 대부분의 지역에서 증가추세가 나타났으며 과거보다는 최근 기간에 증가 추세가 강해졌다. 지위고도 증가추세가 강하게 나타난 카스피 해 북쪽, 중국 북부, 캄차카 반도 북쪽과 북아메리카 서해안 지역은 2016년 지위고도에서 양의 편차가 강하게 나타난 지역과 유사했다.

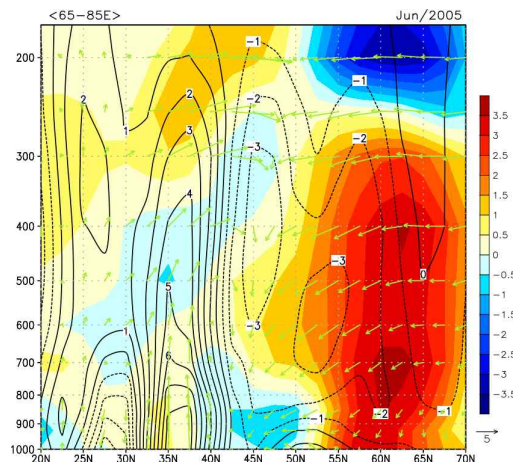


Figure 61. Vertical distribution of the longitudinal averaged (65-85E) temperature anomalies (shading) and vertical wind anomalies (ω [Pa/s], black contour) in Aug 2016. Vector indicates meridional and vertical wind anomalies. Vertical wind(ω) is multiplied by -100.

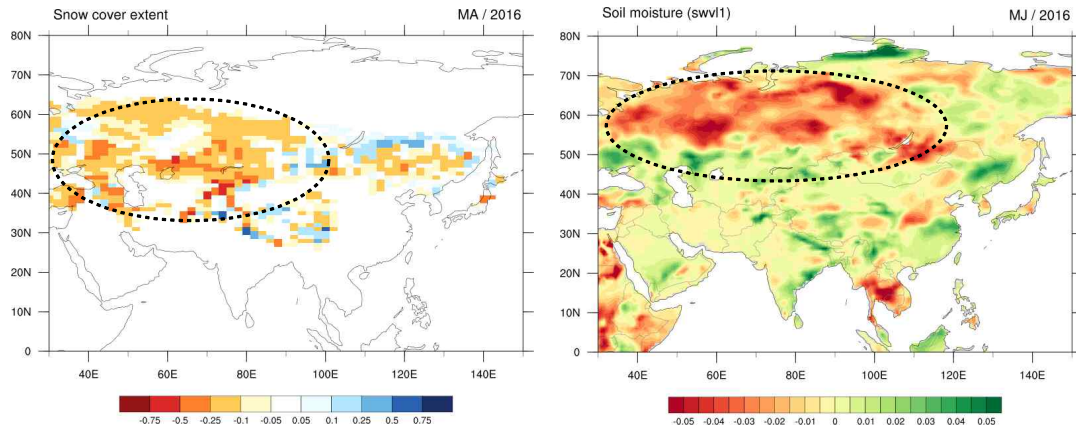


Figure 62. (Left) Snow cover anomalies for Mar-Apr 2016, (Right) soil moisture anomalies for May-Jun 2016.

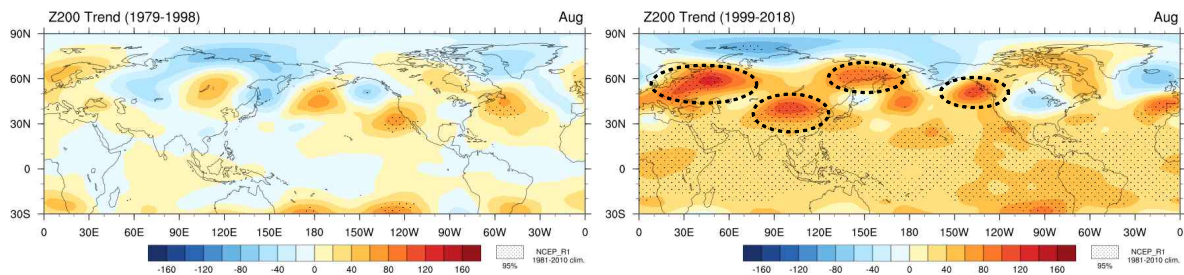


Figure 63. Linear trend of Aug 200hPa geopotential height for (Left) 1979-1998 period and (Right) 1999-2018 period. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

(3) 겨울철 극한 기온 사례

(가) 12월 극한 기온 사례: 2012년 12월

2012년 12월은 전국 평균기온 -1.7°C 로 평년보다 3.2°C 낮았으며, 평균 최고기온 3.0°C , 평균 최저기온 -6.0°C 로 평년보다 각각 4.0°C , 2.8°C 낮았다. 월 강수량은 60.4mm 로 평년보다 많은 편이었다. 월 초반에는 기온이 큰 폭으로 감소했다가 15일 전후로 며칠간은 평년보다 높았으나 다시 큰 폭으로 감소해 한 달 동안 기온의 변동 폭이 매우 컸다. 최고기온과 최저기온도 평균기온과 유사한 경향으로 나타났으며 기온이 높았던 14일에는 많은 비가 내려 월 강수량 증가에 크게 기여했다.

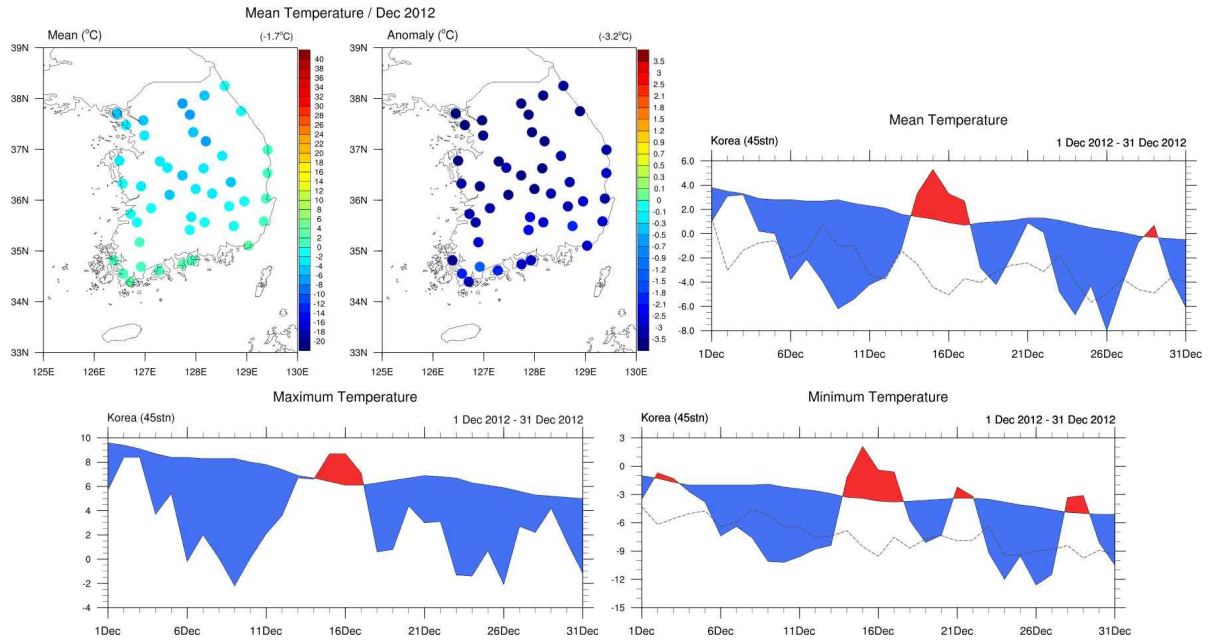


Figure 64. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Dec 2012, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Dec 2012 (dashed line indicates 10 percentile of temperature).

대기 순환장 분포를 보면 상층 200hPa 지위고도에서 바이칼 호 주변~우리나라와 일본까지 음의 편차가 위치했으며 우랄산맥 주변에는 양의 편차가 위치했다. 이러한 분포는 500hPa 지위고도에서도 잘 나타났으며 우랄산맥 주변 기압능과 한반도 북쪽의 기압골, 베링 해 부근의 기압능으로 이어지는 파동 형태가 나타났다. 북유럽, 동아시아, 북아메리카 서부에 음의 편차가 위치하고 북극 주변에서는 양의 편차가 위치했다. 특히 바렌츠-카라 해 주변, 북태평양 베링 해 남쪽, 북대서양 그린란드 주변에서 양의 편차가 두드러지게 나타났으며 이 지역의 양의 편차는 하층에서도 강하게 나타났다. 하층 850hPa 지위고도에서 우리나라는 음의 편차 영역에 위치했으며 우랄산맥 주변과 북태평양 베링 해 남쪽에는 강한 양의 편차가 위치했다. 해면기압에서도 이러한 분포는 이어져 유라시아 대륙 북부 대부분 지역에서 강한 양의 편차가 나타나 대륙 고기압은 강하게 발달했음을 볼 수 있었다. 북태평양에도 양의 편차가 나타나 알류산 저기압은 평년보다 약했다. 하층 바람은 풍향의 변화가 커서 우리나라에 영향을 준 뚜렷한 주풍이 월평균에서는 보이지 않았으나 기온이 큰 폭으로 하강한 시기에는 북서풍계열 바람편차, 상대적으로 기온이 상승한 시기에는 남동풍계열 바람편차의 영향을 받았다. 2m 기온은 유라시아 대륙 대부분의 지역에서 음의 편차가 나타났고 특히 시베리아에서 매우 강한 음의 편차가 나타났다. 북극 바렌츠-카라 해 부근과 북대서양 그린란드 주변은 강한 양의 편차, 베링 해와 알래스카 부근은 음의 편차가 나타났다. 상층 동서바람은 우리나라 남쪽에서는 세기가 강해졌으나 시베리아와 일본 동쪽에서는 평년보다 약했다. 제트는 평년보다 중심이 남서쪽으로 약간 이동했고 중심세기는 평년보다 강했다.

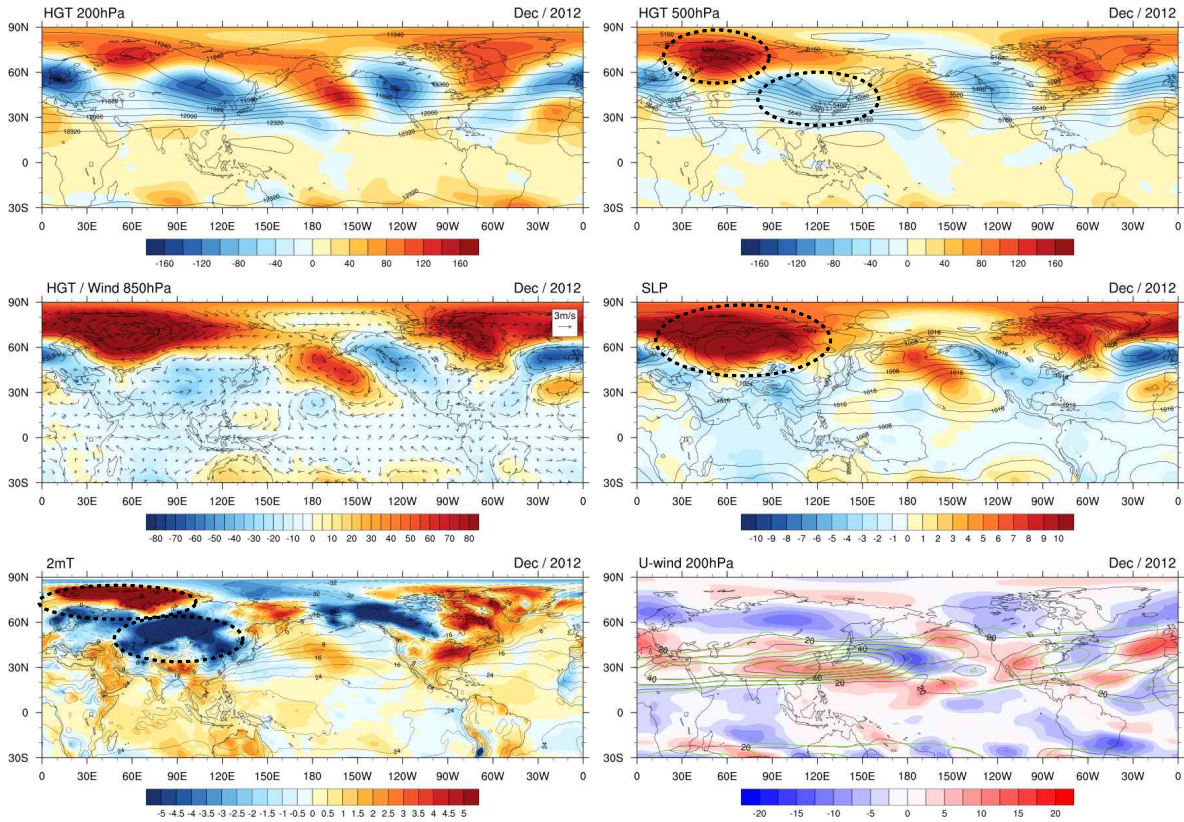


Figure 65. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Dec 2012 (shading: anomaly, black contour: mean, green line: climatology).

열대 태평양 해수면온도는 적도 동태평양에서는 평년보다 낮았고 열대 중태평양~서태평양과 인도양에서는 평년보다 높았다. 동태평양의 음의 해수면온도 편차는 남반구 쪽으로 치우쳐 나타났다. Nino3.4 지수 -0.22 , Nino3 지수 -0.40 으로 약한 음의 편차인 중립상태를 나타냈으며 2010-2012년 겨울 연속된 라니냐 이후 중립상태가 이어졌다. 중위도 북태평양에는 우리나라 인근부터 북동쪽으로 음~양~음 형태의 해수면온도 편차가 나타났는데 이는 지위고도의 음~양~음 패턴과 일치했다. 북극의 바렌츠-카라 해 주변과 북대서양 캐나다 동쪽 해수면온도는 매우 높았다. 열대 대류활동은 적도 동~중태평양과 maritime continent 동쪽지역에서는 억제신호가 나타났고 적도 북쪽으로 아열대 동~중태평양에서는 대류활동이 증가했다. 인도양과 인도네시아 부근에서는 넓은 지역에 걸쳐 대류활동이 활발했다.

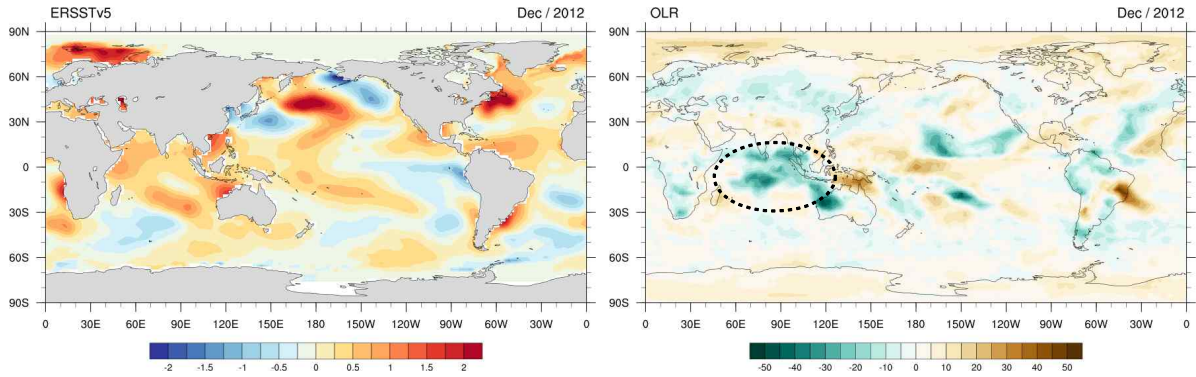


Figure 66. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Dec 2012.

지위고도 분포에서 북극지역에 고기압성 편차, 중위도 유라시아 대륙과 북아메리카, 북대서양 지역에 저기압성 편차가 위치해 음의 북극진동 패턴을 보였으며 북극진동 지수는 -1.75 로 강한 음의 값을 나타냈다. 특히 우랄산맥 주변 지역에서는 상층부터 하층까지 강한 고기압성 편차가 나타나는 순압구조를 보였다. 우랄산맥 주변 지역에 고기압성 편차가 강하게 나타났는데 이 지역에서 고기압 정체로 블로킹이 나타나면 풍하측으로 찬 공기를 이류시켜 동아시아 지역의 기온을 감소시키고 동아시아 기압골 강화에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려졌다 (Lee and Jhun, 2006). 우랄산맥 지역의 블로킹은 북극진동 지수가 음일 때 남북방향의 흐름이 강해지면서 더 발달하기 좋은 조건이 되는데, 음의 북극진동이 나타나면서 제트기류의 흐름이 동아시아 쪽으로 휘어지고 대륙에서 우리나라 방향으로 불어오는 바람이 강해져 한기가 유입될 수 있다 (Gong et al., 2001; Jeong and Ho, 2005). Figure 67에 우랄산맥 부근에서 평균한 500hPa 지위고도에 대한 2m 온도의 회귀분석을 나타냈는데, 유라시아 대륙 동편에서 전반적인 음의 기온 편차가 나타났고 유라시아 대륙 전반적으로 대륙 고기압이 강해진 것을 볼 수 있었다. Figure 68의 시계열은 12월 우랄산맥 지역에서 평균한 500hPa 지위고도 편차를 나타낸 것으로 우랄산맥 지역에서 지위고도가 강했던 해의 (표준편차 1이상인 해) 기온과 북극진동 지수를 살펴보면 7개 사례 중 5개 사례에서 기온이 평년보다 낮았고 특히 강한 음의 북극진동이 함께 있었던 2005년에 기온이 매우 낮았던 것을 볼 수 있었다.

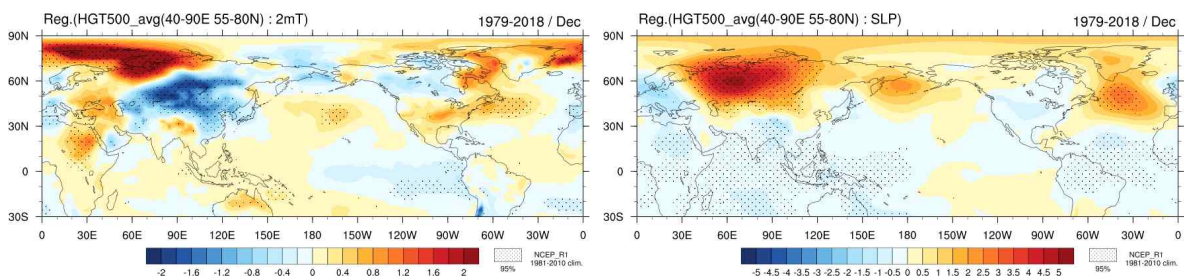


Figure 67. Linear regression of (Left) 2m temperature and (Right) sea level pressure with respect to the 500hPa geopotential height averaged over the Ural Mountains (40–90E, 55–80N) for Dec. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

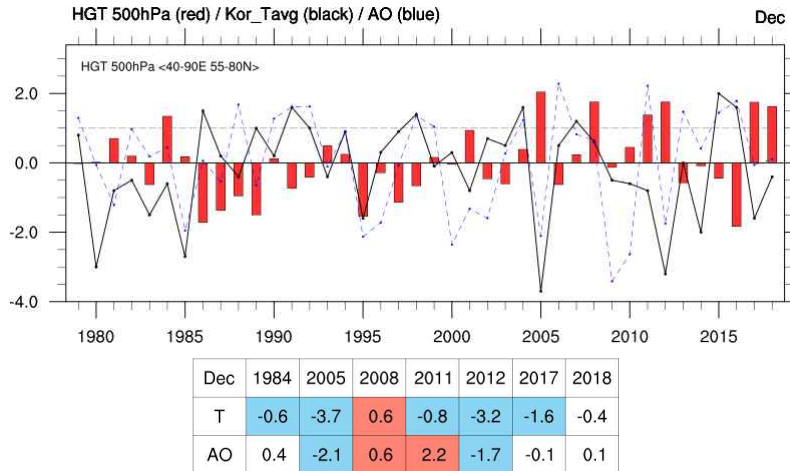


Figure 68. (Top) Time series of the normalized 500hPa geopotential height anomalies averaged over the Ural Mountains (40–90E, 55–80N), mean temperature in South Korea, and AO index for Dec. (Bottom) Dec mean temperature and AO index for the strongest year of the geopotential height anomalies in the top panel. Red(blue) shading indicates above(below) normal temperature and greater(less) than 0.5(-0.5) AO index.

우랄산맥 부근의 고기압성 편차가 강하게 발달한 원인으로 북극 해빙의 영향을 살펴보았다. 2012년은 북극 해빙농도가 매우 적었던 해로 특히 바렌츠-카라 해 해빙이 적었으며 가을철(9-11월) 평균한 연도별 해빙영역 편차에서 북반구 전체 해빙영역은 2012년에 최소를 기록했다 (Figure 69,70). 북극 해빙은 겨울이 되고 해빙이 증가하면서 12월에는 일부 지역에서 평년수준으로 회복했으나 바렌츠와 카라 해에서는 여전히 해빙으로 덮인 영역이 적었다. 바렌츠와 카라 해 두 지역을 합한 해빙 면적은 1979-2018년 기간에서 2012년이 최소 2번째를 기록했다. 가장 적었던 해는 2016년으로 2012년에는 베링 해와 척치 해는 해빙이 평년보다 많았으나 2016년에는 베링 해와 척치 해 해빙도 평년보다 적어 차이가 있었다.

선행연구에서는 북극 해빙이 줄어들면 해수 표면에서 대기로의 열속 전달이 증가하고 대기 온도는 해빙이 많을 때보다 상승할 수 있어 고기압성 편차를 유도하고, 유도된 고기압성 편차에 의해 행성파의 연직 전파가 강화되고 극소용돌이를 약화시켜 음의 북극진동을 유발한다는 것을 밝혔다 (Kim et al., 2014; Mori et al., 2014). 또한 북극 해역 중 바렌츠-카라 해 지역의 지표온도가 평년보다 높으면 이 지역의 상층 고기압성 순환이 로스비파 전파 형태로 동아시아 지역에 저기압성 순환을 유도할 수 있다고 제시했다 (Figure 71, Kug et al., 2015). 2012년은 이러한 패턴이 잘 나타난 해로 바렌츠-카라 해 해빙이 매우 적었고 이 지역 지표온도는 평년보다 높았다. 해면기압에서는 바렌츠-카라 해를 포함한 우랄산맥 부근에 고기압이 위치했고 이 고기압은 하층부터 상층까지 순압적으로 발달했다. 상층의 고기압성 순환은 파동 전파를 통해 바이칼 호 부근의 저기압성 순환을 유도할 수 있었는데 Figure 72의 wave-activity flux에서도 바렌츠 해 부근에서 동아시아 방향으로 파동이 전파되는 패턴을 볼 수 있었다.

사례해와 유사하게 과거 가을철(9-11월) 해빙면적이 적었던 해에 우리나라 기온 경향을 살펴보면 특별한 경향을 찾기 어려웠다. 해빙면적에는 뚜렷한 감소경향이 나타나며 2002년 이후로 평년보다 해빙이 많았던 해는 없었기 때문에 가을철 해빙과 우리나라 기온과의 직접적인 관련성을 찾기 어려운 것으로 보인다.

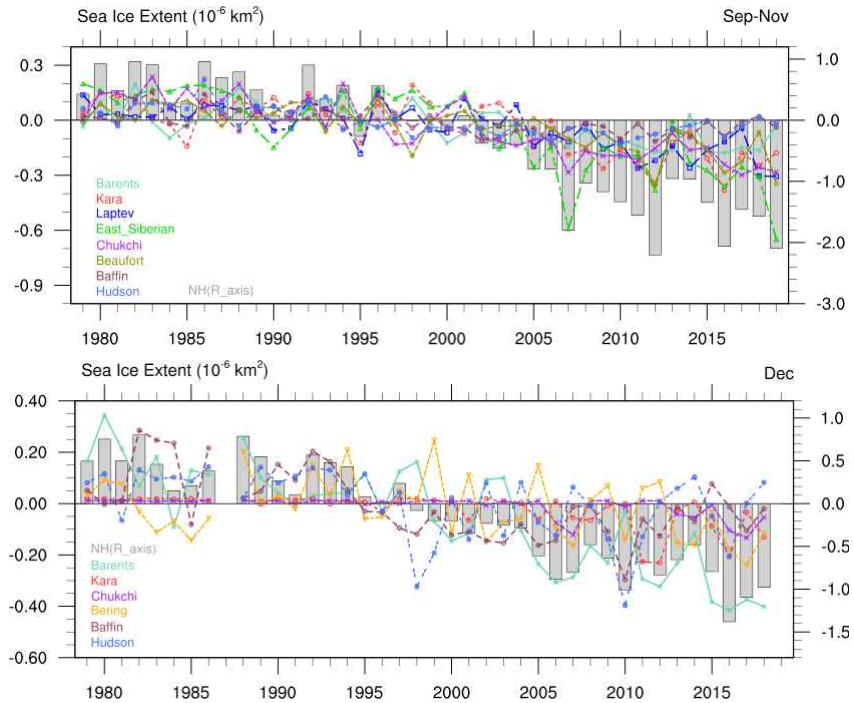


Figure 69. Time series of Arctic sea ice extent anomalies for (Top) Sep-Nov mean and (Bottom) Dec. Left axis is for the each Arctic sea region and right axis is for the NH, the whole of Arctic region.

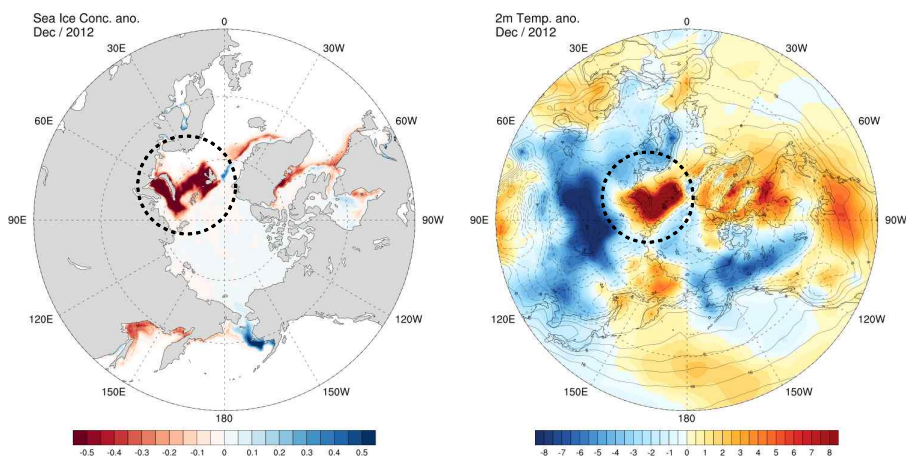


Figure 70. (Left) Arctic sea ice concentration anomalies and (Right) 2m temperature anomalies in Dec 2012.

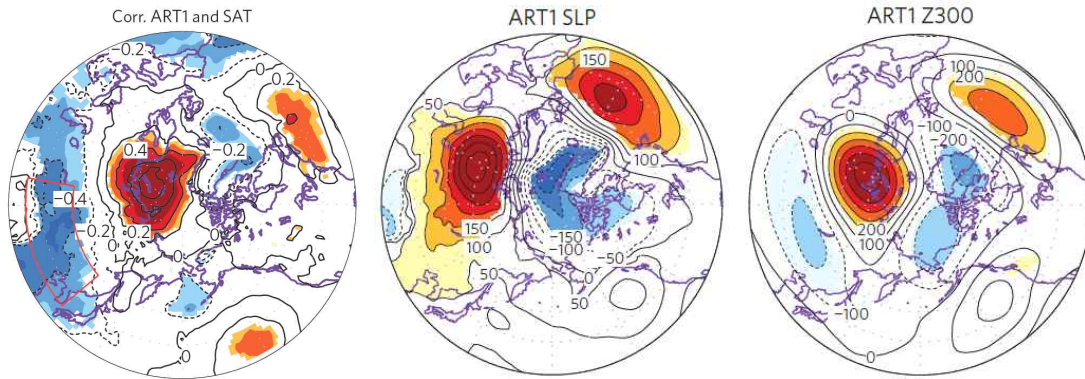


Figure 71. Correlation maps for the (Left) surface air temperature, and regression maps for the (Middle) sea level pressure and (Right) 300hPa geopotential height on the ART1 index during Dec-Feb for the period 1979/1980-2013/2014. Shading denotes significant values at the 95% confidence level based on a Student's t-test. ART1 index is the average of surface air temperature over the Barents-Kara sea region (30-70E, 70-80N) (Fig.2, Fig.3 in Kug et al., 2015).

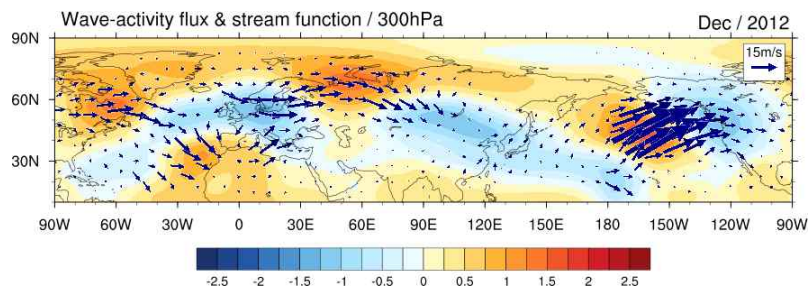


Figure 72. 300hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Dec 2012.

선행 연구에서는 열대 서태평양과 동인도양에서 대류활동이 활발하고 강수가 증가하면 강수가 증가한 지역의 북서쪽 상층에 고기압성 순환이 유도되고 이에 대한 로스비파 전파 형태로 우리나라 동쪽에 저기압성 편차가 유도될 수 있다는 것을 보였으며 이 저기압성 편차는 연직으로 순압구조를 가져 하층에서도 저기압성 순환이 유도될 수 있다고 제시했다. 선행연구에서 제시한 이러한 반응은 라니냐 절정기 겨울에 나타날 수 있는 반응이다 (Wang et al., 2000; Son et al., 2014; 국중성 등, 2017). 2012년 12월에 Nino 지수는 중립상태였으나 해수면온도 분포를 보면 열대 동태평양부터 중태평양 쪽으로 해수면온도가 낮은 편이고 서태평양과 인도양은 해수면온도가 평년보다 높아 해수면온도 분포는 라니냐와 유사했다. 대류활동은 전형적인 라니냐 절정기에 나타나는 대류활동보다는 서쪽에서 대류활동이 활발해 해수면온도가 높은 인도네시아와 동인도양에서 활발한 대류활동을 보였다. Figure 73은 대류활동이 활발했던 동인도양-maritime continent 일부 영역에서 평균한 OLR에 대한 지위고도의 회귀분석을 나타내는데 우리나라 주변에서 저기압성 편차가 나타난 것을 볼 수 있으며 이는 동인도양-maritime continent 지역에서 활발했던 대류활동이 우리나라 주변에

저기압성 편차가 강화되는데 영향을 준 것으로 볼 수 있다. Figure 74에 12월 동인도양~서태평양 지역에서 평균한 OLR과 우리나라 기온을 나타냈는데, OLR이 강했던 해를 살펴보면 (-1 표준편차보다 작은 해) 9개 사례 중 5개 사례에서 기온이 평년보다 낮았다. 또한 9개 사례 중 6개 사례가 라니냐 시기였고 2개 사례는 라니냐는 아니었지만 Nino3.4 지수가 음수여서 라니냐에 가까운 상태를 보였다. 따라서 라니냐 시기에 동인도양~서태평양 주변에서 대류활동이 활발하고 그로인해 우리나라 주변에서 저기압성 순환이 유도되는 경향이 있는 것으로 볼 수 있겠다.

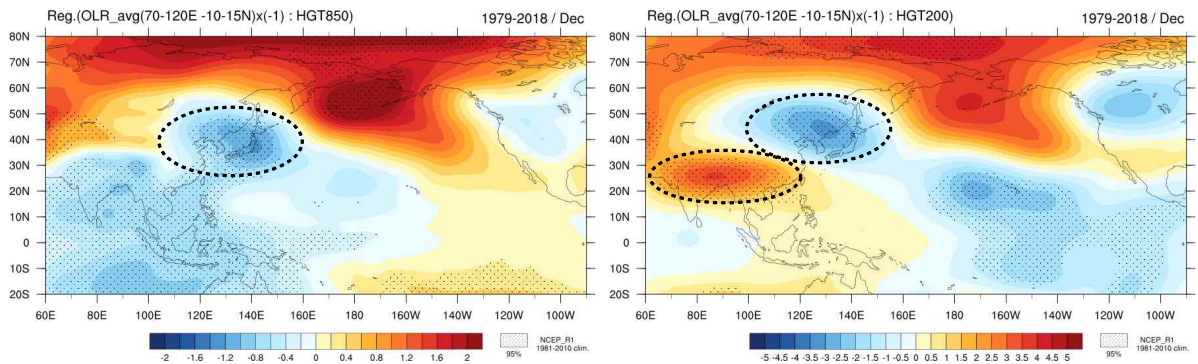


Figure 73. Linear regression of (Left) 850hPa and (Right) 200hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the eastern Indian ocean to the western Pacific (70-120E, 10S-15N) for Dec. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the student's t-test.

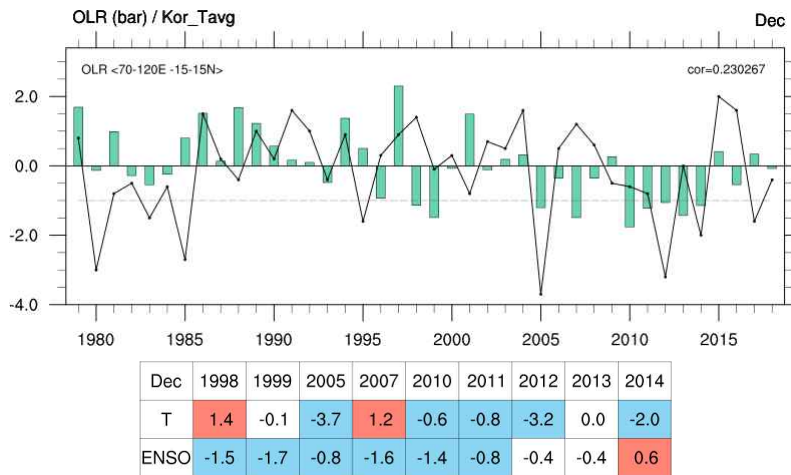


Figure 74. (Top) Time series of the normalized OLR anomalies averaged over the eastern Indian ocean to the western Pacific (70-120E, 15S-15N) and mean temperature in South Korea for Dec. (Bottom) Dec mean temperature and Nino3.4 index for the strongest year of convection in the top panel. Red(blue) shading indicates above(below) normal temperature and greater(less) than 0.5(-0.5) Nino3.4 index.

겨울철 대륙 고기압 발달은 유라시아 대륙에 덮여 있는 눈의 양과 관련이 있다. 선행 연구에 의하면 가을철에 유라시아 대륙에 눈이 얼마나 빨리 덮이는지와 북극진동 간에 연관성이 큰 것으로 알려졌다 (Cohen and Jones, 2011). 10월 눈덮임 속도와 겨울철 북극진동 간에는 음의 상관관계가 있으며 1973-2014년 기간 동안의 상관계수는 -0.56 으로 나타났다 (기상청 기후예측과, 2018). 이는 가을철에 유라시아 대륙이 평년보다 빠르게 눈으로 덮이면 대기 하층 공기를 차갑게 해 대륙 고기압이 평년보다 빨리 발달하는데 기여할 수 있는 것으로 해석된다. 2012년 10월의 유라시아 눈덮임 속도는 평년보다 빠른 편이었으며 (Figure 75) 10월과 11월의 유라시아 지역 눈덮임도 평년보다 많은 수준이어서 (Figure 76) 평년보다 빠른 유라시아 눈덮임이 대륙 고기압의 이른 발달에 기여한 것으로 보인다.

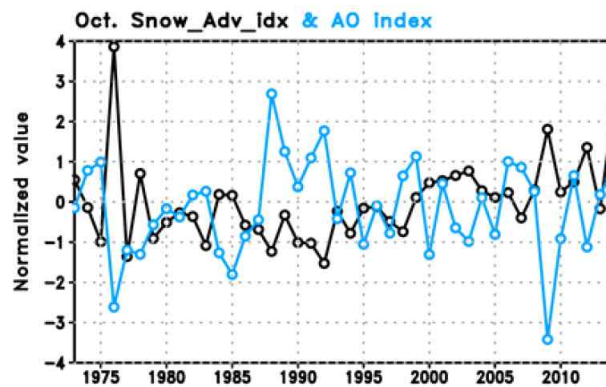


Figure 75. Oct snow advanced index for Eurasia and winter AO index. (Fig.6.26 in 기상청 기후예측과, 2018)

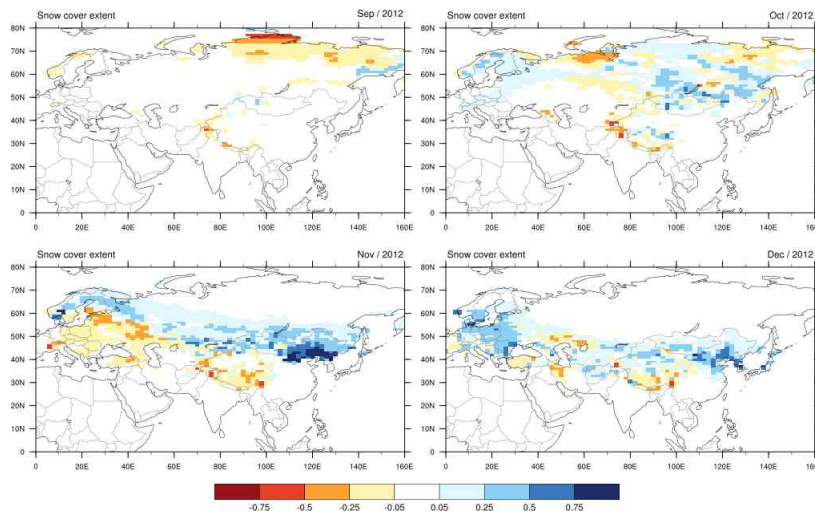


Figure 76. Snow cover anomalies in Sep to Dec 2012.

(나) 1월 극한 기온 사례: 2011년 1월

2011년 1월은 전국 평균기온 -4.8°C 로 평년보다 3.8°C 낮았으며, 평균 최고기온 0.5°C , 평균 최저기온 -9.8°C 로 평년보다 각각 3.8°C , 4.2°C 낮았다. 1월 한 달 동안 단 하루를 제외하고 평균기온이 평년보다 모두 낮았고, 최고기온은 한 달 내내 평년보다 낮았으며 특히 16일에 기온이 매우 큰 폭으로 떨어졌다. 월 강수량은 5.6mm 로 평년보다 적었으나 눈이 자주 내렸고, 강수일수는 평년과 비교해 적지는 않은 편이었으나 내린 양 자체가 적어 월 강수량이 평년보다 적었다.

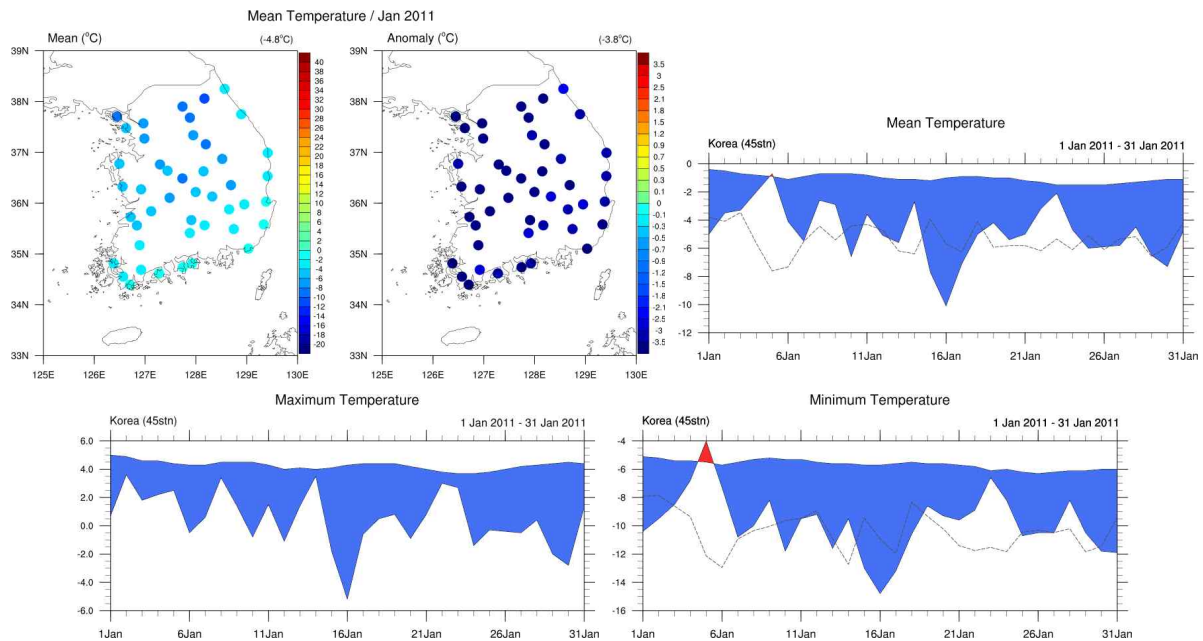


Figure 77. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Jan 2011, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Jan 2011 (dashed line indicates 10 percentile of temperature).

대기 순환장을 살펴보면 상층 지위고도장에서 북극에는 양의 편차가 위치하고 중위도에는 북태평양 동쪽을 제외한 모든 지역에서 음의 편차가 나타났다. 열대와 저위도 지역에도 음의 편차가 나타나 극 지역 양의 편차를 음의 편차가 둘러싼 형태로 나타났다. 양의 지위고도 편차는 특히 우랄산맥 동쪽, 베링 해 주변, 그린란드 서쪽, 중위도 북동태평양에서 강하게 나타났으며 이러한 지위고도 배치는 200hPa과 500hPa에서 동일하게 이어졌다. 하층에서도 상층과 유사한 기압배치가 이어졌으며 우랄산맥 동쪽 시베리아 지역, 북태평양 동쪽, 북대서양에 강한 양의 편차가 위치하고 북태평양 서쪽에서는 강한 음의 편차가 위치했다. 우리나라는 북서쪽의 고기압성 편차와 동쪽의 저기압성 편차의 사이에 위치해 북풍의 영향을 받았다. 해면기압은 유라시아 대륙 대부분의 지역에서 양의 편차, 북태평양에 음의 편차, 북아메리카와 북대서양 북쪽에 양의 편차가 나타났다. 대륙 고기압이 매우 강하게 발달하고 북태평양의 알류산 저기압 또한 강하게 발달해 대비를 이루었고 우리나라는 북풍의 영향을

받기 좋은 조건이었다. 2m 기온은 유라시아 대륙 북극 지역에서는 온도가 평년보다 높았고 중위도와 저위도에서는 온도가 평년보다 낮았다. 특히 중앙아시아와 중국, 우리나라의 온도가 낮았으며 북아메리카에서는 북대서양 그린란드 주변지역의 온도가 평년보다 높았고 그 외의 지역에서는 평년보다 낮았다. 상층 동서바람은 우리나라 주변에서 평년보다 세기가 증가했으며 한반도 북쪽에서는 세기가 감소했고 제트의 위치는 평년과 유사했다.

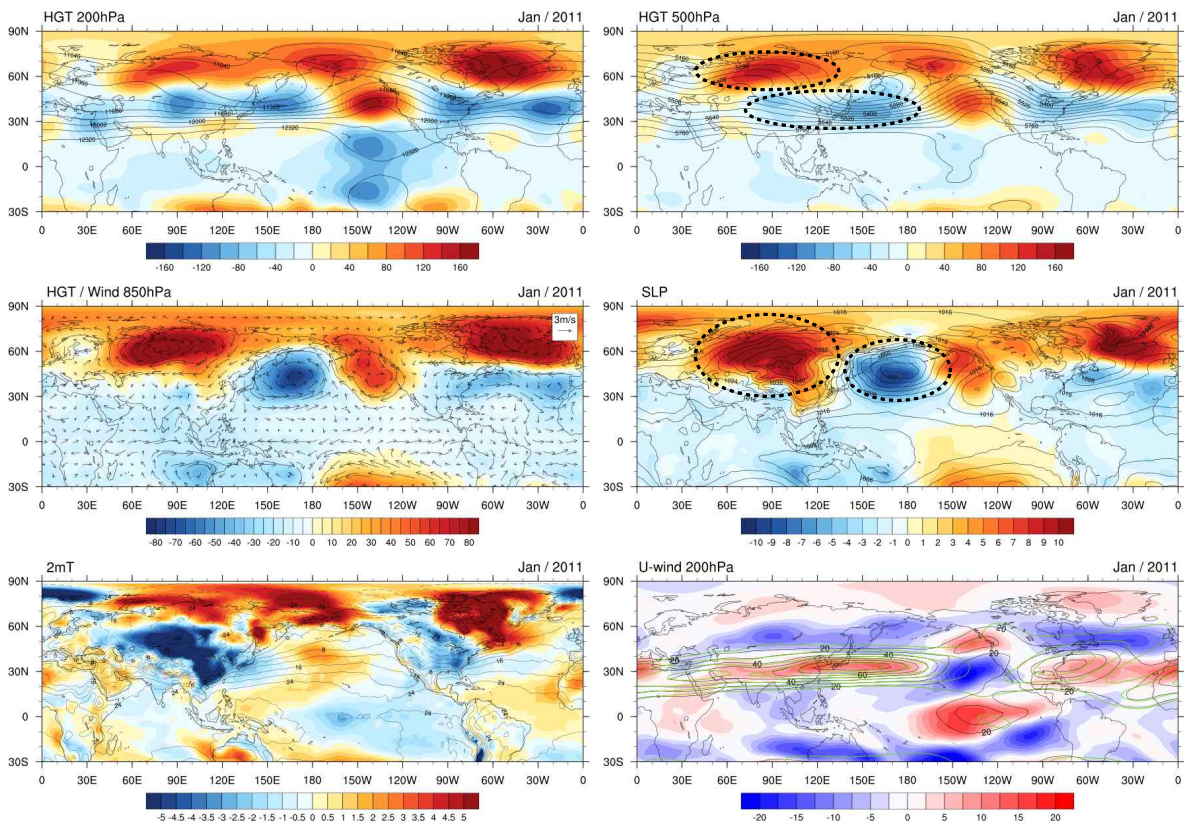


Figure 78. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Jan 2011 (shading: anomaly, black contour: mean, green line: climatology).

해수면온도 분포는 우리나라 주변에서 동해는 평년보다 다소 높았으나 서해와 남해, 동중국해 쪽으로는 평년보다 낮았다. 열대 태평양은 동태평양부터 중태평양까지 넓은 지역에 걸쳐 해수면온도가 평년보다 낮은 라니냐 상태를 보였다. 음의 해수면온도 편차는 날짜변경선 넘어 까지 나타났고 필리핀 해 주변에서는 양의 해수면온도 편차가 나타났다. Nino3.4 지수 -1.55, Nino3 지수 -1.26으로 2009-2010년 겨울 강한 엘니뇨 발생 이후로 강한 라니냐가 발생한 시기였다. 북대서양에서는 적도 부근부터 북쪽으로 양~음~양의 해수면온도 편차가 나타났다. 열대 대류활동은 열대 중태평양에서 대류활동 억제가 강하게 나타났고 동인도양~서태평양에서는 대류활동 강화가 강하게 나타났다.

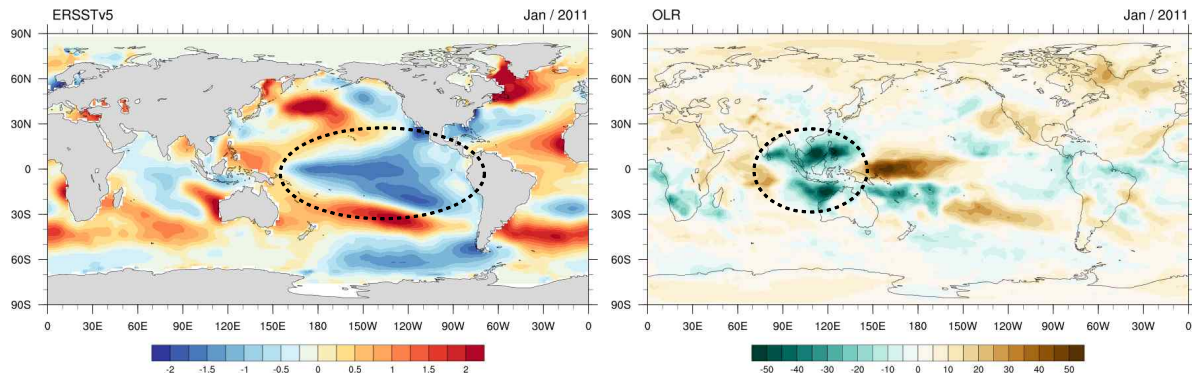


Figure 79. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Jan 2011.

겨울철 우리나라 기온은 동아시아 겨울몬순과 강한 상관성을 갖는다. 동아시아 겨울몬순은 대륙과 해양의 비열차이로 인해 발생하며 대륙 고기압과 알류산 저기압의 변동성 및 확장과 밀접한 관련이 있다. 대륙 고기압이 발달하고 확장하면 우리나라 쪽으로 불어오는 북풍계열 바람을 강화시켜 대륙의 찬 공기가 남하해 기온이 하강하고, 반대로 대륙 고기압과 알류산 저기압이 약하면 동아시아 기압골이 약화되고 찬 공기를 불러오는 북풍을 약화시켜 기온이 높아질 수 있다. 동아시아 겨울몬순 지수는 시베리아 고기압과 알류산 저기압 (Shi, 1996), 상층 제트 (Jhun and Lee, 2004), 기압골의 강도 (Sun and Sun, 1995) 등으로 표현되며 선행 연구에서 제시한 세 가지 지수를 Figure 80에 나타냈다. 시베리아 고기압과 알류산 저기압을 나타내는 지수는 두 지역의 해면기압 차이로 $SLP(110^{\circ} E, 20-50^{\circ} N) - SLP(160^{\circ} E, 20-50^{\circ} N)$, 상층 제트 지수는 두 지역의 300hPa 바람 차이로 $U300(110-170^{\circ} E, 27.5-37.5^{\circ} N) - U300(80-140^{\circ} E, 50-60^{\circ} N)$, 기압골의 강도 지수는 500hPa 지위고도를 평균한 $H500(125-145E, 30-45N)$ 으로부터 구했다. 동아시아 겨울몬순 지수가 강한 양의 값을 가질수록 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 강하고 동아시아 지역의 기압골은 강해지며 상층 제트도 강함을 의미하는데 (Ding, 1990; Wang et al., 2010; Wang and Chen, 2014; Jhun and Lee, 2004) 2011년 1월은 매우 큰 양의 값을 나타냈으며 특히 해면기압(SLP)과 상층 동서바람(U300)으로 표현되는 지수는 1월 값 중 가장 큰 값을 나타냈고 지위고도(H500) 지수도 최댓값에 근접했다. 2011년 1월 대기 순환장에서 해면기압장을 보면 유라시아 대륙에 고기압이 강하게 발달하고 북태평양에는 저기압이 발달했음을 볼 수 있었고 상층에는 우랄산맥 주변 지역에 기압능, 일본 북쪽으로 기압골이 발달하면서 우리나라는 북풍기류의 영향을 강하게 받아 북쪽의 찬 공기가 유입될 수 있었다.

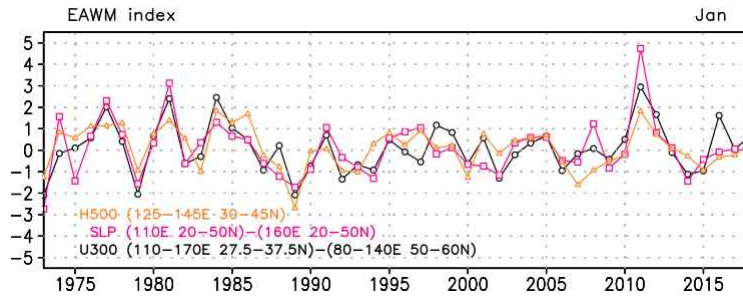


Figure 80. Time series of East Asian winter monsoon index for Jan.

동아시아 겨울몬순과 ENSO는 음의 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있다. 엘니뇨 절정기에 열대 중태평양에서는 높은 해수면온도에 대한 반응으로 대류활동이 증가하고 maritime continent 지역에서는 대류활동 억제가 나타내는데 이에 대한 Gill-type 대기반응으로 대류활동이 강화된 지역의 북서쪽 하층에는 고기압성 흐름, 상층에는 저기압성 흐름이 유도된다. 상층의 저기압성 흐름은 로스비파 전파에 의해 중위도에 고기압성 순환을 유도하는데 중위도의 고기압성 흐름은 연직으로 순압구조를 가지게 되어 상층에서 하층까지 고기압성 흐름이 나타나게 된다. 이에 따라 겨울철 동아시아 기압골은 약화되고 북서기류가 약화되어 동아시아 겨울몬순은 약해지는 것으로 알려져 있다 (Wang et al., 2000; 국종성 등, 2017). 라니냐 시기에는 이와 반대로 열대 중태평양에서 대류활동이 억제되면서 필리핀 해 인근 하층에 저기압성 흐름이 유도되고 중위도에 저기압성 흐름이 나타나게 되면서 북서기류가 강해지고 동아시아 겨울몬순은 강해진다. 엘니뇨(라니냐) 시기에 중위도에 고기압성(저기압성) 흐름이 나타나는 반응은 12월에 강하고 1월에는 약해지는 것으로 알려져 있다 (Son et al., 2014).

2010-2011년 겨울은 강한 라니냐가 발생한 기간으로 2011년 1월의 Nino3.4 지수는 -1.55로 큰 음의 값을 보였다. Figure 81은 12월과 1월 아열대 서태평양 지역에서 평균한 OLR에 대한 500hPa 지위고도의 회귀분석 패턴으로, 라니냐와 관련된 해수면온도에 대한 반응으로 해수면온도가 낮은 중태평양에서는 대류활동 억제가, 온도가 높았던 서태평양 필리핀 주변과 호주 북서쪽에서는 대류활동 강화가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 대류활동은 서태평양뿐만 아니라 동인도양에서도 활발했고 강수도 많았는데 (Figure 82), 서태평양과 인도양의 활발한 대류활동에 대한 대기반응과 로스비파 전파에 의해 우리나라 동쪽에 저기압성 편차가 유도될 수 있었다. 서태평양과 동인도양 대류활동 강화의 영향을 각각 살펴보기 위해 서태평양(110-140° E, 0-20° N)과 동인도양(80-100° E, 5-15° N) 지역에서의 OLR을 영역 평균해 시계열을 만들고 (Figure 84) 두 지역에서 대류활동이 활발했던 해를 추출하였다 (-1 표준편차보다 작은 해). Figure 83에 나타낸 서태평양과 동인도양에서 대류활동이 활발했던 해의 850hPa 지위고도 합성장에서 우리나라 동쪽에 저기압성 편차가 공통적으로 나타났고 동인도양 대류활동이 강했을 때 저기압성 편차가 더 강했던 것으로 나타났다. 서태평양과 동인도양 두 지역에서 대류활동이 강했던 해의 우리나라 기온 경향을 살펴보면 서태평양에서 대류활동이 활발했던 경우에 우리나라 기온은 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으나 동인도양에서 대류활동이 강했던 경우에는 기온이 낮은 경향을 보였다 (Figure 84).

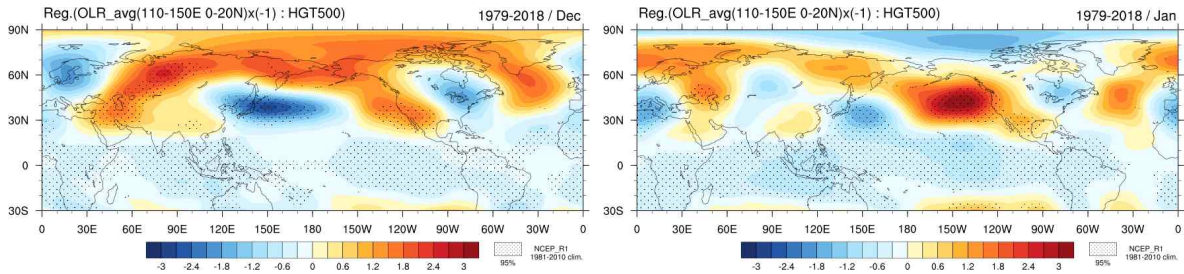


Figure 81. Linear regression of 500hPa geopotential height with respect to the OLR averaged over the subtropical western Pacific (110–150E, 0–20N) for (Left) Dec and (Right) Jan. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student’s t-test.

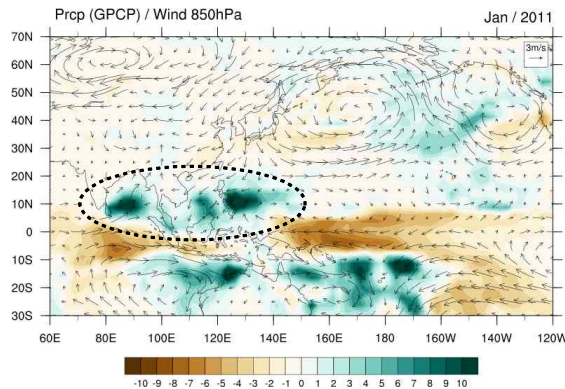


Figure 82. Precipitation (shading) and 850hPa wind anomalies (vector) in Jan 2011.

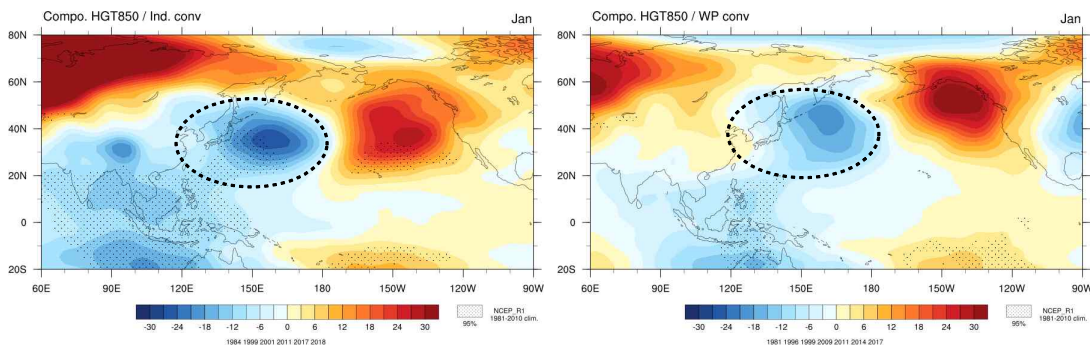


Figure 83. Composite maps of Jan 850hPa geopotential height anomalies for (Left) the strong Indian ocean convection cases and (Right) the strong western Pacific convection cases. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student’s t-test.

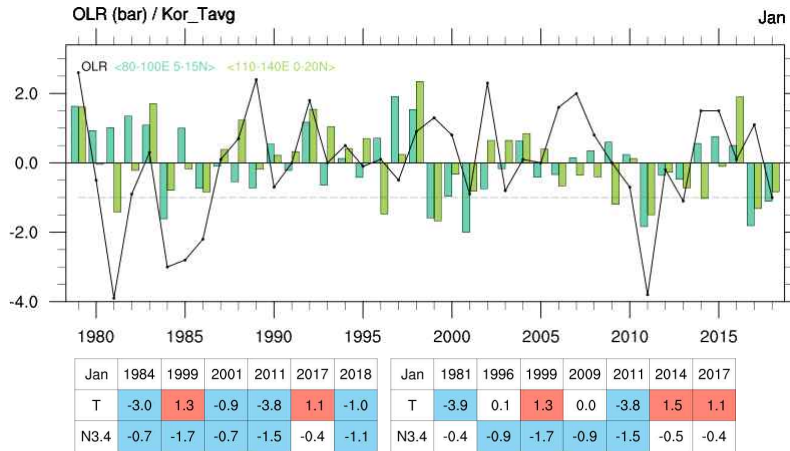


Figure 84. (Top) Time series of the normalized OLR averaged over the Indian ocean (80–100, 5–15N) and western Pacific (110–140, 0–20N), and mean temperature in South Korea. (Bottom) Jan mean temperature and Nino3.4 index for the strongest year of the (Left) Indian ocean convection and (Right) western Pacific convection. Red(blue) shading indicates above(below) normal temperature and above(below) 0.5(–0.5) Nino3.4 index.

음의 북극진동이 강할 때 동아시아 지역 상층에 음의 지위고도 편차가 위치하고 동아시아 기압골이 강화되면서 하층에서는 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 강화되기 좋은 조건이 형성된다. 이에 따라 하층에서 북풍이 강화되면서 한기가 남하해 우리나라는 평년보다 낮은 기온이 나타날 수 있다 (Jeong and Ho, 2005; Park et al., 2011; Woo et al., 2012). 북극진동과 ENSO 위상이 같은 경우 우리나라 기온과의 관련성이 강화될 수 있다. 북극진동이 음의 위상일 때 남북방향 흐름이 강해지면서 블로킹 고기압이 발달하기에 좋은 조건이 형성되는데, 라니냐 때에는 ENSO에 의한 강제력이 시베리아 근처의 서풍을 약화시켜 파동이 동쪽으로 전파되는 것을 방해하고 블로킹이 발생하기 좋은 조건을 제공할 수 있다 (Cheung et al., 2012). 또한 북극진동과 북태평양진동(NPO) 위상이 같을 때 동아시아 지역 기온과 북극진동과의 상관관계는 더욱 강화되는데, 음의 북극진동과 음의 북태평양진동이 동반되면 대륙과 해양간의 동서 기압경도가 강해지면서 북서풍이 더욱 강화될 수 있다 (Park and Ahn, 2016). 2011년 1월 북극진동 지수는 -1.68로 음의 북극진동이 나타났으며 2010년 가을부터 한여름을 제외하고 음의 북극진동이 계속 이어졌다. 북태평양진동 또한 -1.53으로 북극진동과 계속해서 같은 위상으로 나타났으며, 북태평양진동 지수는 -1.37로 음의 북태평양진동이 나타났다 (Figure 86). 세 가지 진동 지수가 음의 위상으로 서로 같은 위상을 보이며 동아시아 지역 기온이 더욱 낮아질 수 있는 방향으로 작용할 수 있었다.

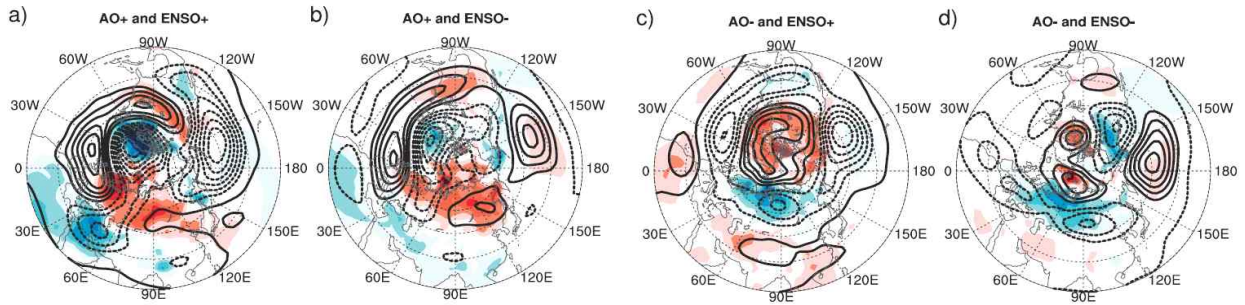


Figure 85. Composite maps of 500hPa geopotential height anomalies (contour) and standardized anomalies of surface air temperature (shading) under different combinations of the AO and ENSO. (Fig.12 in Cheung et al., 2012)

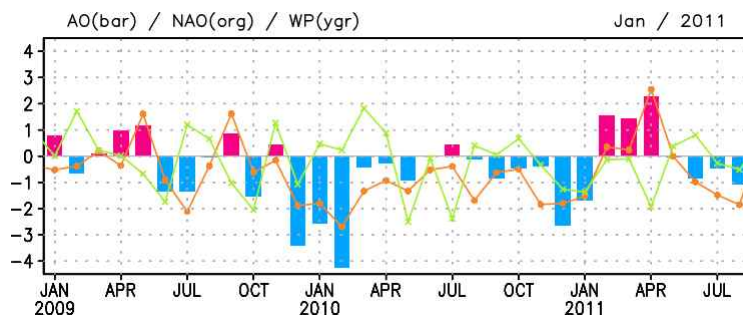


Figure 86. Time series of AO index (bar), NAO index (orange line), and NPO index (green line) from Jan 2009 to Aug 2011.

북극 해빙이 줄어들면 해수면이 해빙으로 덮여있을 때 보다 해양에서 대기로의 열전달이 증가해 기온이 상승하고 고기압성 편차를 유도할 수 있으며 유도된 상층 고기압성 편차에 의해 행성파의 연직 전파가 강화되어 극소용돌이를 약화시켜 음의 북극진동이 유발될 수 있다 (Kim et al., 2014; Mori et al., 2014). 2010년 가을철 북극 해빙 영역은 평년보다 적었으며 북극 해 대부분의 지역에서 해빙이 적었다. 겨울이 되면서 바렌츠 해와 카라 해 부근은 해빙이 증가했으나 그린란드 서쪽의 허드슨 만과 배핀 만에서는 12월이 되어도 해빙이 증가하지 않았고, 1월에도 이 지역의 해빙은 평년에 비해 매우 적어 2010년 12월과 2011년 1월에 최소면적 1위를 기록했다 (Figure 87,88). 2010-2011년 겨울에는 다른 해와 달리 북대서양 북서쪽에서 해빙이 매우 적었고 그린란드 남서쪽 래브라도 해 주변 해수면온도가 높았다 (Figure 89). 이 지역 해수면온도와 동아시아 기온 간에 직접적인 상관성은 높지 않지만, 이전 겨울부터 지속된 음의 북대서양진동 대기패턴과 높은 해수면온도가 서로 상호작용을 통해 음의 북대서양진동을 강화, 지속시키면서 파동 전파를 통해 동아시아 기압골에 영향을 주었을 것으로 볼 수 있다.

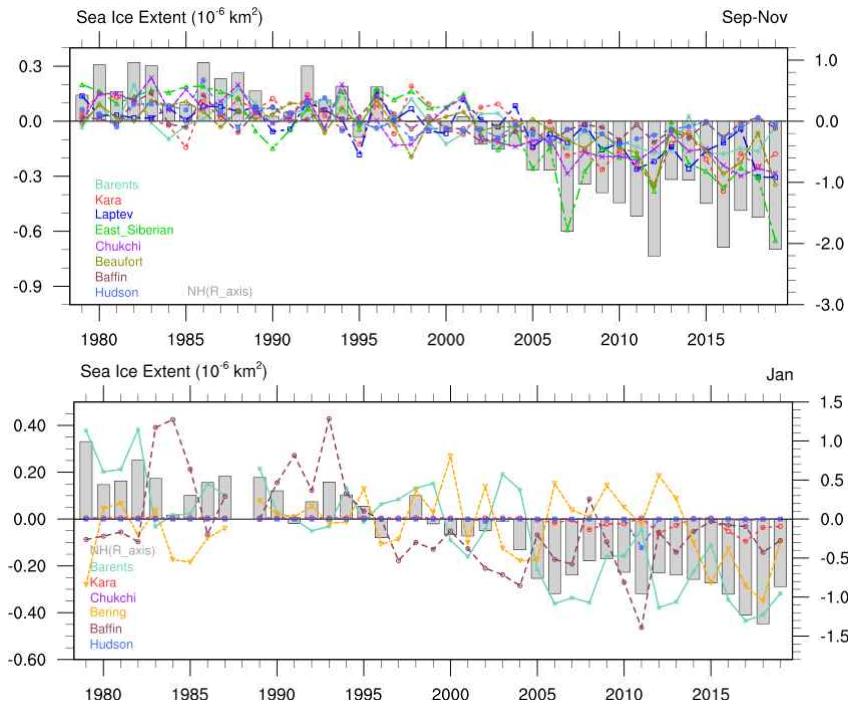


Figure 87. Time series of Arctic sea ice extent anomalies for (Top) Sep-Nov mean and (Bottom) Jan. Left axis is for the each Arctic sea region and right axis is for the NH, the whole of Arctic region.

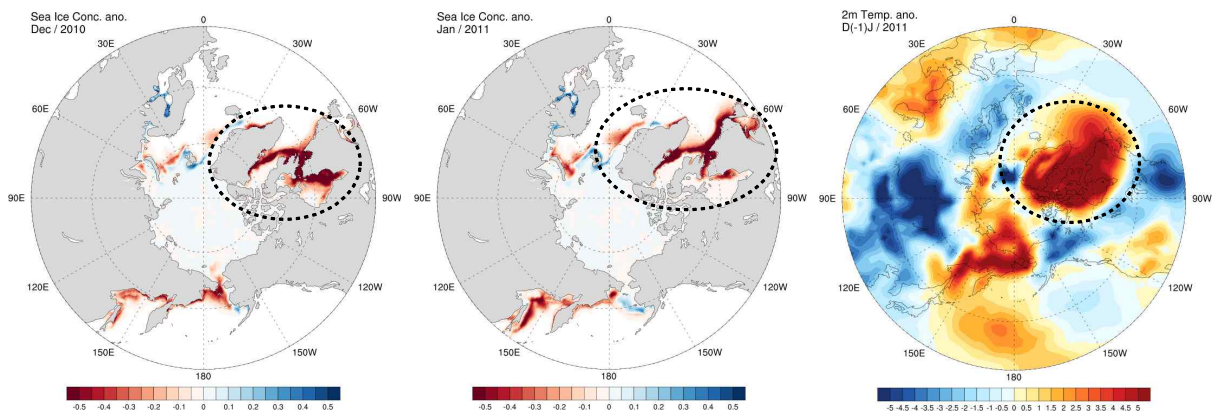


Figure 88. Arctic sea ice concentration anomalies in (Left) Dec 2010 and (Middle) Jan 2011, and (Right) 2m temperature anomalies in Dec 2010-Jan 2011.

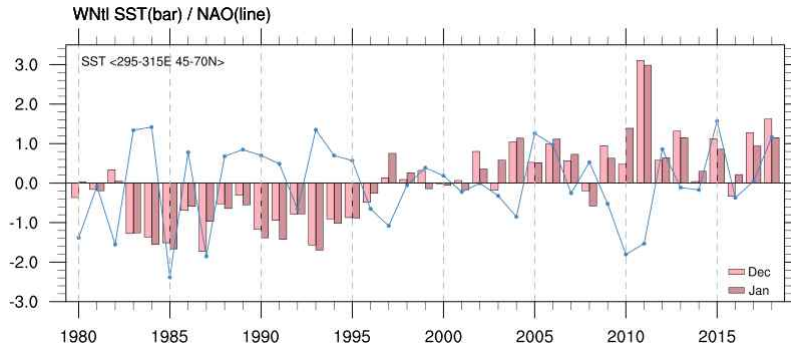


Figure 89. Time series of sea surface temperature anomalies averaged over the northwestern Atlantic (65-45W, 45-70N) for Dec and Jan, and North Atlantic Oscillation (NAO) index for Jan.

ENSO와 동아시아 겨울몬순 관계에는 장주기 변동이 있으며 Pacific Decadal Oscillation (PDO)와 Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) 같은 장주기 변동이 둘의 관계를 조절하는 중요한 요인으로 제시되었다 (Wang et al., 2008; He and Wang, 2013; Kim et al., 2017). 선행 연구에서는 PDO 음의 위상, AMO 양의 위상일 때 북서태평양 고기압이 서쪽으로 치우치면서 ENSO와 동아시아 겨울몬순의 관계가 강해질 수 있다고 하였으며 이러한 변화는 PDO와 AMO에 의해 유도되는 열대 태평양의 평균장 변화로 인해 나타나는 것으로 제시되었다. Figure 90은 ENSO와 몇 가지 동아시아 겨울몬순 지수간의 이동상관계수와 PDO, AMO 지수를 나타내는 그림으로, 2005-2013년 기간은 음의 PDO, 양의 AMO 위상에 해당하는 기간으로 라니냐-동아시아 겨울몬순 관계가 다른 기간에 비해 강했던 것으로 나타났다.

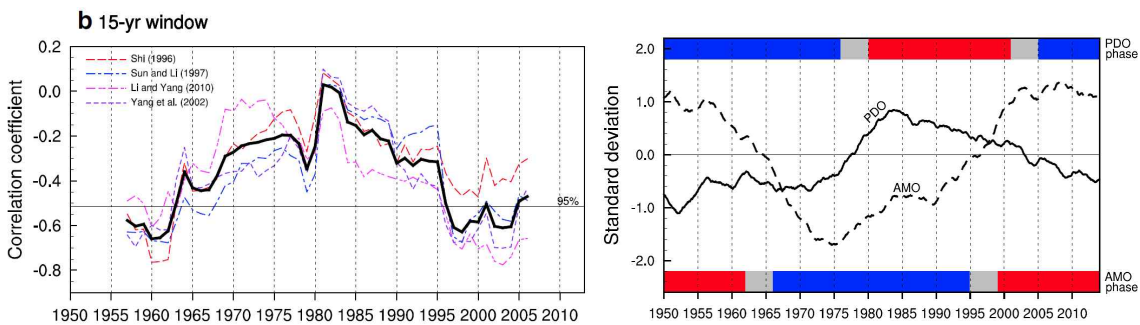


Figure 90. (Left) The 15-year moving correlations between the ENSO and four East Asian winter monsoon indices. The black solid curve indicates the averaged values computed from four moving correlations and horizontal solid line denotes the 95% significant level. (Right) The standardized PDO (solid) and AMO (dashed) indices. The shadings at the top and bottom are positive(red) and negative(blue) phases of the PDO and AMO, respectively. (Fig.2(b) and Fig.12 in Kim et al., 2017)

(다) 2월 극한 기온 사례: 2012년 2월

2012년 2월은 전국 평균기온 -0.8°C 로 평년보다 1.9°C 낮았으며, 평균 최고기온 4.7°C , 평균 최저기온 -5.7°C 로 평년보다 각각 2.1°C , 1.9°C 낮았다. 주기적인 기온변동이 있었으며 전반에는 기온이 평년보다 낮은 쪽에서 변동이 있었으나 후반으로 갈수록 전체적으로 기온이 증가하면서 평년보다 높은 수준이 나타난 날도 있었다. 최고기온과 최저기온도 평균기온과 유사하게 변동했다. 월 강수량은 10.4mm 로 평년보다 적었다.

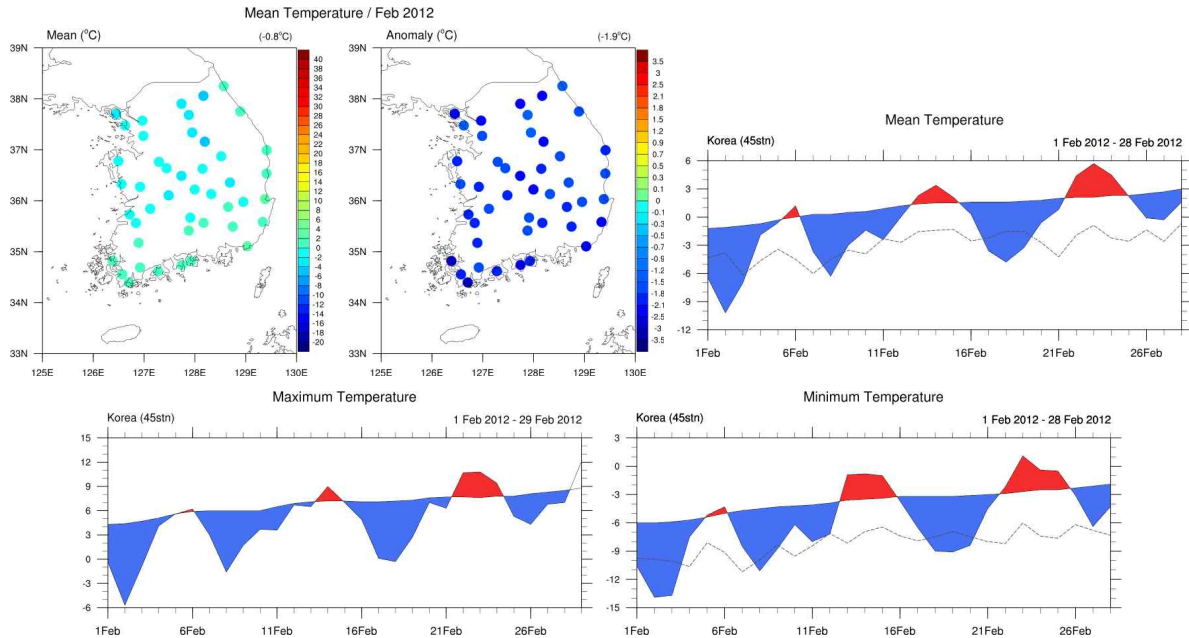


Figure 91. Spatial distributions of the monthly mean and anomalous temperatures of 45 meteorological stations in South Korea in Feb 2012, and time series of mean, maximum and minimum temperatures averaged at 45 stations in Feb 2012 (dashed line indicates 10 percentile of temperature).

대기 순환장을 살펴보면 상층 200hPa 지위고도장에서 우리나라 북쪽~베링 해 주변까지 음의 편차가, 우리나라 남쪽 중국~북태평양까지 양의 편차가 위치했다. 북극 바렌츠-카라 해 주변에는 매우 강한 양의 편차가, 북아메리카 북부, 북대서양 동쪽에도 양의 편차가 위치했다. 500hPa 지위고도 편차도 200hPa과 유사한 분포를 보였다. 하층에서는 우랄산맥 주변에 강한 고기압성 순환, 우리나라 북쪽~베링 해 주변까지 저기압성 순환이 위치했다. 바이칼 호 주변에서는 북풍 편차가 강했으나 우리나라에서는 바람의 변화가 커서 기온이 더 낮았던 시기에는 북풍이 우세했고 기온이 상대적으로 상승한 시기에는 남풍이 우세해 월 평균에서는 뚜렷한 주풍이 나타나지 않았다. 해면기압은 상층 지위고도 배치와 유사한 분포를 보여 대륙 고기압이 강하게 발달했고 북태평양에서는 북쪽 베링 해 주변에는 음의 편차, 중위도에는 양의 편차가 위치해 북태평양진동과 유사한 패턴을 보였다. 2m 기온은 북극 주변을 제외한 유라시아 대륙 대부분의 지역에서 평년보다 기온이 낮았다. 북극 바렌츠-카라 해 주변과 시베리아 북부에서는 기온이 평년보다 높았고 북아메리카 북부에서도 기온이 평년보다 높았다.

상층 동서바람은 우리나라 주변에서는 세기가 강해졌고 일본 남쪽으로는 세기가 약해졌다. 제트는 일본에 위치한 중심의 세기가 평년보다 강했고 전체적으로 평년보다 다소 북상했다.

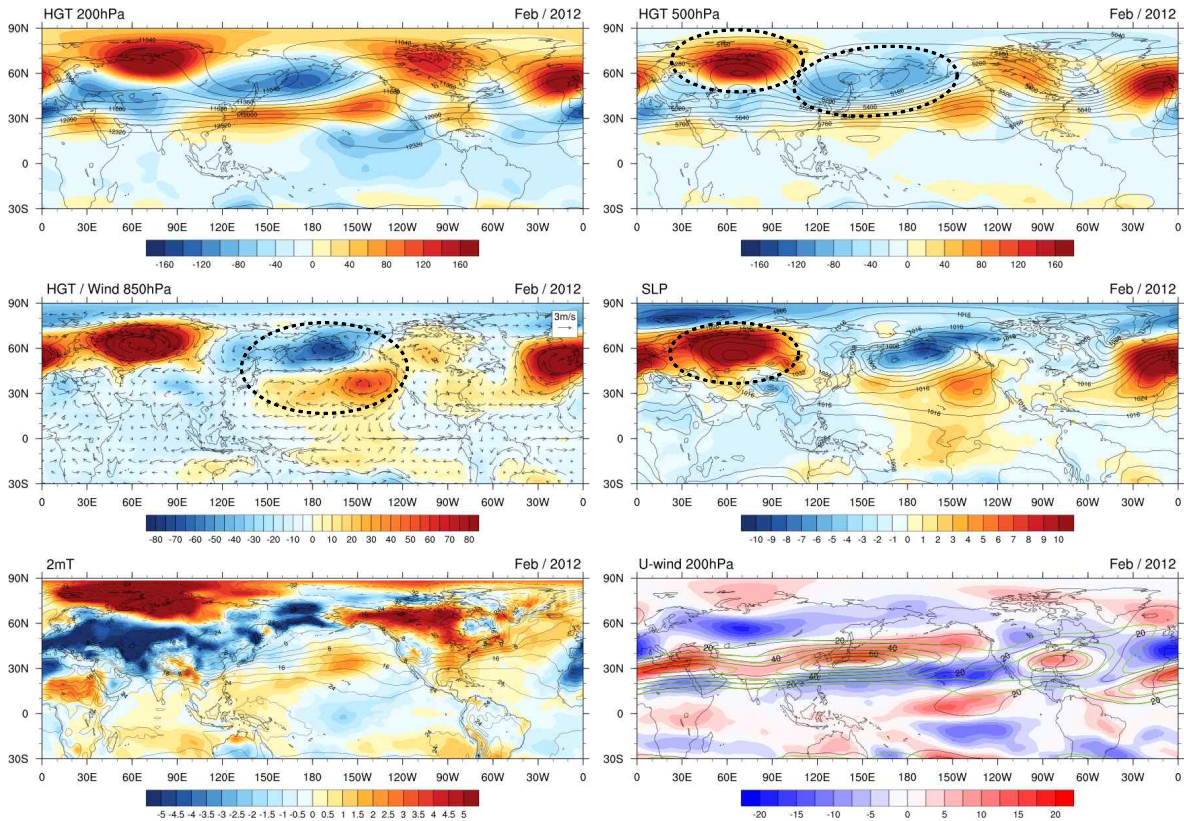


Figure 92. 200hPa geopotential height, 500hPa geopotential height, 850hPa geopotential height and wind anomalies, sea level pressure, 2m temperature, and 200hPa zonal wind in Feb 2012 (shading: anomaly, black contour: mean, green contour: climatology).

우리나라 주변 해수면온도는 서해에서 음의 편차, 남해에서 양의 편차를 보였으나 평년 수준을 크게 벗어나지는 않았다. 열대 태평양 해수면온도는 동태평양에서 양의 편차, 중태평양에서 음의 편차, 서태평양 maritime continent 주변에서 양의 편차를 보였다. 서태평양 필리핀 부근~중위도 중태평양까지 양의 해수면온도 편차가 이어졌고 베링 해와 알래스카 만 부근은 음의 편차를 보였다. Nino3.4 지수 -0.66 , Nino3 지수 -0.19 로 약한 라니냐 상태를 나타냈다. 2010-2011년 겨울 강한 라니냐 이후 연속해서 2011-2012년 겨울에는 약한 라니냐가 발생 했고 2012년 2월은 라니냐가 소멸되는 시기였다. 열대 대류활동은 해수면온도가 낮은 중태평양에서는 억제되었고 아열대 서태평양 필리핀 주변과 인도양에서는 증가했다. 서태평양에서는 적도 북쪽은 대류활동 증가, 적도 남쪽은 대류활동 억제가 나타났다.

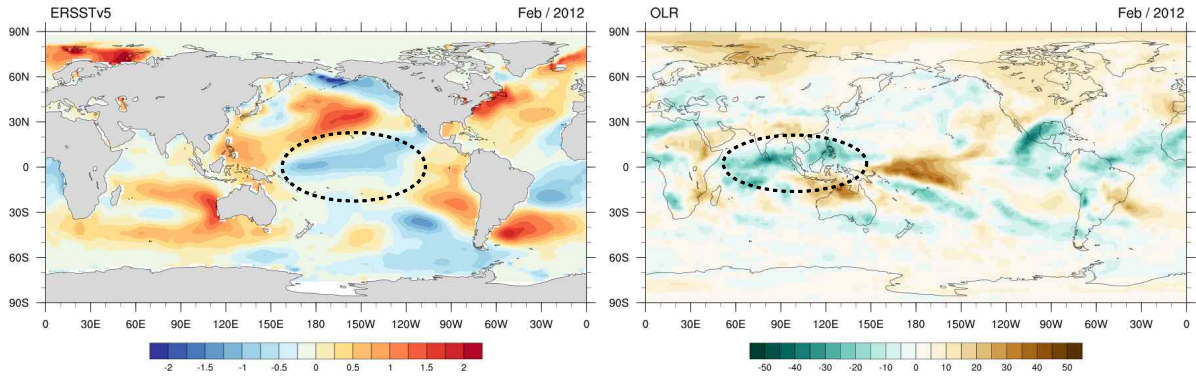


Figure 93. (Left) SST anomalies and (Right) OLR anomalies in Feb 2012.

2012년 2월에는 우랄산맥 주변 지역에 고기압성 편차가 강하게 나타났는데 이 지역에 고기압 정체로 블로킹이 발생하면 동아시아 기압골은 강해지고 하층 대륙 고기압이 강하게 발달할 수 있고, 이때 동아시아는 극에서 찬 공기가 내려오면서 기온이 하강하기에 좋은 조건이 된다. Figure 94에 나타낸 우랄산맥 부근 500hPa 지위고도에 대한 해면기압과 2m 온도의 회귀분석에서 유라시아 대륙 북부에 강한 고기압성 편차와 우리나라를 포함한 유라시아 대륙 동편에서 음의 기온편차가 나타나 이러한 관계를 볼 수 있었다. 2월 한 달 동안 나타난 주기적인 기온변동은 대륙 고기압의 확장과 관련되어 있는데, 대륙 고기압이 우리나라 쪽으로 확장하면 기온이 감소하고 약화되면 기온이 증가하는 변동을 보였다 (Figure 95).

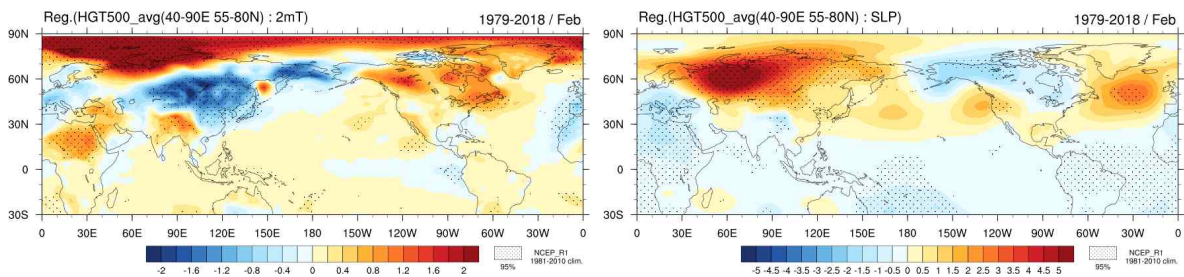


Figure 94. Linear regression of (Left) 2m temperature and (Right) sea level pressure with respect to the 500hPa geopotential height averaged over the Ural Mountains (40–90E, 55–80N) for Feb. Areas with black dots denote 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test.

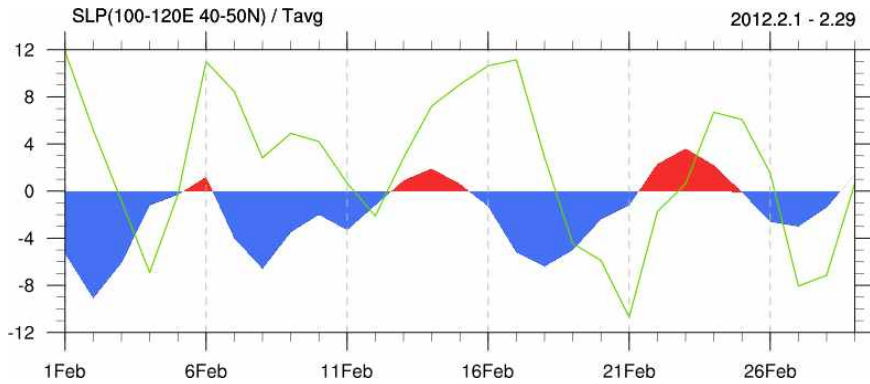


Figure 95. Time series of daily mean temperature anomalies in South Korea and area averaged (100-120E, 40-50N) sea level pressure anomalies in Feb 2012.

우랄산맥 부근의 고기압성 편차는 북극 해빙과 관련되어 있다. 북극 해빙이 줄어들면 얼음으로 덮이지 않은 해수면 면적이 늘어나면서 대기로의 열속 전달이 증가하고 대기 온도는 해빙이 많을 때보다 상승할 수 있어 고기압성 편차를 유도할 수 있다. 유도된 고기압성 편차에 의해 행성파의 연직 전파가 강화되고 극소용돌이를 약화시켜 음의 북극진동을 유발하고 동아시아 지역에 저기압성 순환을 유도할 수 있다 (Kim et al., 2014; Mori et al., 2014). 2011-2012년 겨울에 북극 해빙은 평년보다 적은 수준이었다. 특히 바렌츠-카라 해 해빙농도가 매우 적었으며 봄철까지 계속해서 해빙이 부족한 상태가 유지되었다 (Figure 96,97). 해빙의 영향으로 바렌츠-카라 해 지역에서 지표온도가 평년보다 매우 높았으며 바렌츠-카라 해를 포함한 우랄산맥 부근에서 하층부터 상층까지 강한 고기압이 발달했다. 우랄산맥 부근에 발달한 고기압은 바이칼 호 동쪽에 저기압성 순환을 유도할 수 있었는데 Figure 98에 나타난 wave-activity flux에서도 북극에서 동아시아로 전파되는 모습을 볼 수 있었다.

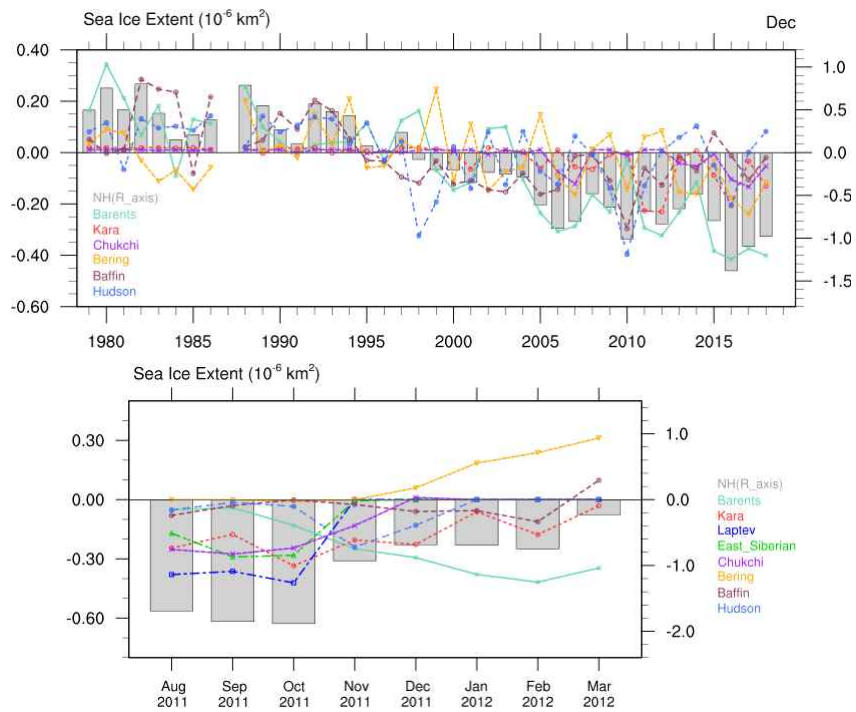


Figure 96. Time series of Arctic sea ice extent anomalies for (Top) Dec and (Bottom) Aug 2011–Mar 2012. Left axis is for the each Arctic sea region and right axis is for the NH, the whole of Arctic region.

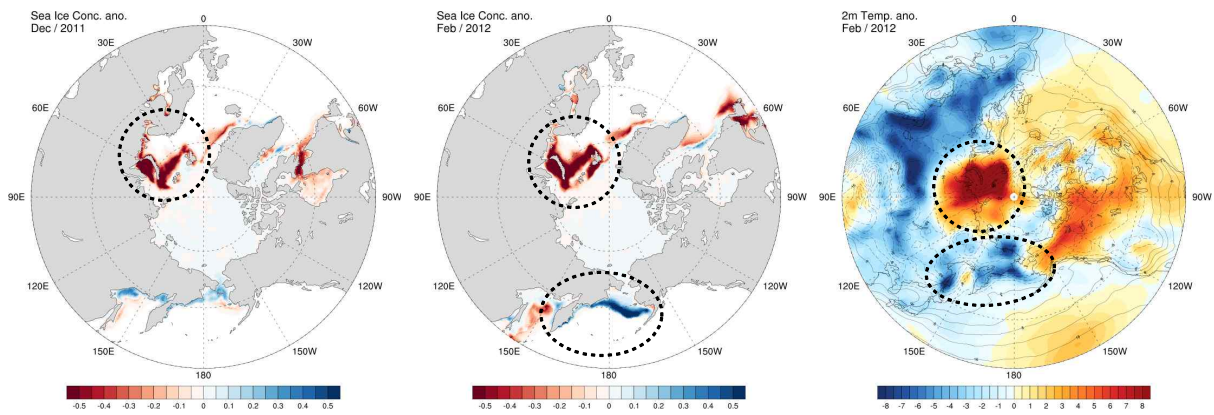


Figure 97. Arctic sea ice extent anomalies in (Left) Dec 2011 and (Middle) Feb 2012, (Right) 2m temperature anomalies in Feb 2012.

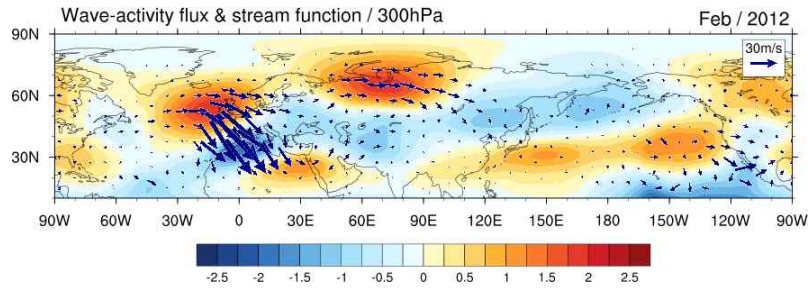


Figure 98. 300hPa wave-activity flux (vector) and stream function (shading) in Feb 2012.

해빙농도가 적었던 바렌츠-카라 해와는 달리 베링 해에서는 해빙이 평년보다 더 많았는데 해빙이 많았던 베링 해에서는 지표온도가 평년보다 낮았고 저기압성 편차가 유도될 수 있었다. Figure 99는 바렌츠-카라 해 부근과 베링 해 부근에서 각각 평균한 2m 온도를 500hPa 지위고도에 회귀분석한 그림으로 바렌츠-카라 해 온도에 대해서는 우랄산맥 부근에 고기압성 편차와 동아시아에 저기압성 편차, 베링 해 온도에 대해서는 베링 해 부근에 저기압성 편차가 나타나는 것을 볼 수 있는데 2012년 2월의 지위고도 패턴은 이 두 패턴을 합한 것과 유사했다.

2012년 북극진동 지수는 1월에는 약한 음의 지수, 2월에는 거의 0에 가까운 값을 보여 월 평균적으로는 북극진동과 낮은 기온 간에 관련이 없는 것처럼 보이나 일 단위 지수에서 보면 기온이 더 낮았던 1월 후반부터 2월 초반까지는 음의 값을 보였다 (Figure 100). 2011-2012년 겨울은 북극 기온이 높아 음의 북극진동이 발생하기 좋은 조건이었으나 베링 해 부근에서는 오히려 해빙이 더 많고 기온이 낮았으며 북아메리카와 북대서양에서는 양의 북대서양 진동이 이전 가을부터 이어지면서 고기압성 편차가 넓은 지역에 걸쳐 나타났다. 극의 영향으로 유라시아 대륙에서는 기온이 하강했으나 북아메리카에서는 오히려 기온이 증가하는 등 전형적인 음의 북극진동 패턴과는 차이가 있었다.

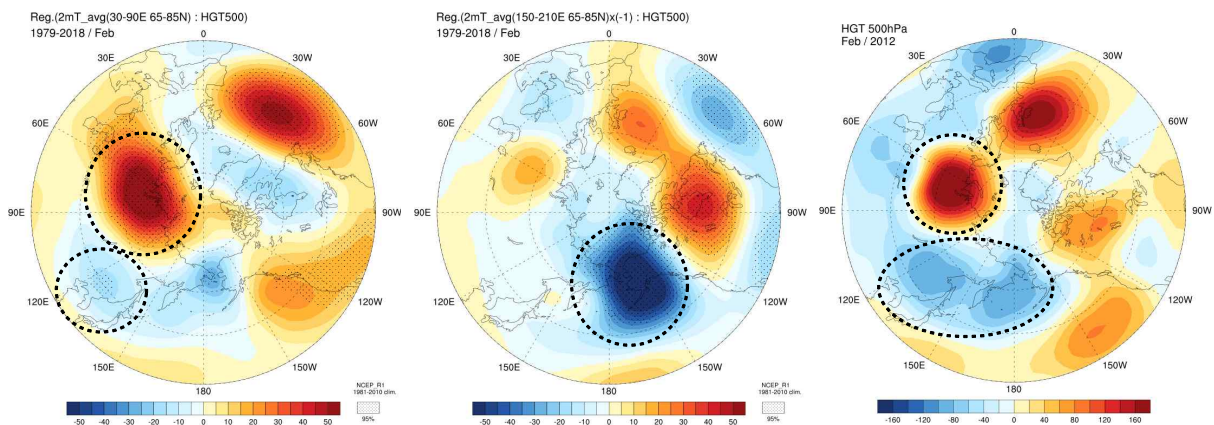


Figure 99. Linear regression of 500hPa geopotential height with respect to the 2m temperature averaged over the (Left) Barents-Kara sea (30-90E, 65-85N) and (Middle) Bering sea (150-210E, 65-85N) for Feb. (Right) 500hPa geopotential height anomalies in Feb 2012.

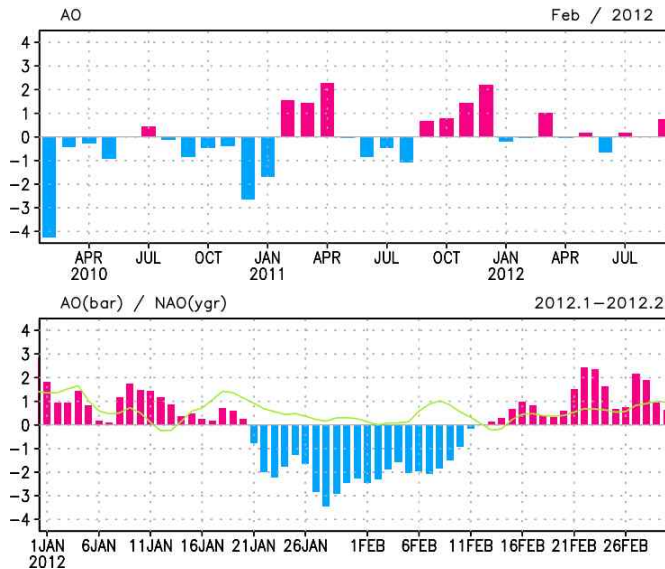


Figure 100. Time series of (Top) monthly AO index during Feb 2010–Sep 2012, and (Bottom) daily AO index (bar) and NAO index (green line) from Jan 2012 to Feb 2012.

겨울철 라니냐와 우리나라 기온의 경향성은 12월에만 기온이 낮은 경향이 나타나고 1월과 2월에는 뚜렷한 경향성을 보이지 않는 것으로 알려져 있다. 라니냐의 영향은 원격상관 패턴을 통해 설명될 수 있는데, 라니냐 겨울철에는 원격상관을 통해 우리나라 동쪽에 저기압성 흐름이 나타나면서 우리나라는 북풍 편차의 영향을 받아 기온이 하강하는 것으로 알려져 있다. 2012년 2월은 라니냐 발생 후 소멸하는 시기로 2010년 가을에 시작한 라니냐가 2012년 초까지 이어졌다. 라니냐 시기에는 열대 중태평양에서 대류활동 억제와 서태평양에서 대류활동 강화가 나타나는데, 2012년에는 이와 더불어 인도양에서도 대류활동이 활발했다. 인도양의 활발한 대류활동은 MJO와 관련된 반응으로 보이며 MJO 지수에서 2월에 큰 값을 보이며 활동이 활발했던 것으로 나타났다 (Figure 101). Figure 102는 2월 서태평양과 인도양에서 평균한 OLR과 우리나라 기온을 나타낸다. 서태평양과 인도양에서 대류활동이 활발했던 해를 살펴보면 절반 이상이 라니냐 해였고 라니냐가 아닌 해에도 Nino3.4 지수는 0에 가까운 중립이거나 음의 값이었으며, 이들 해에는 MJO 활동도 활발했던 것으로 나타났다. 서태평양과 인도양 지역에서 대류활동이 활발했던 경우 우리나라 기온은 평년보다 높지 않은 경향을 보였으며 특히 인도양에서 대류활동이 강했던 경우는 기온이 평년보다 높았던 경우가 없었다. Figure 103은 인도양과 서태평양 대류활동이 활발했던 해의 2월 지위고도 합성장을 각각 나타낸 것으로, 인도양 대류활동이 활발했던 해의 합성장에서는 인도양과 서태평양, 우리나라 주변과 일본 동쪽에 걸쳐 넓은 지역에서 저기압성 편차가 나타난 반면 서태평양에서 대류활동이 활발했던 해의 합성장에서는 인도양 대류활동이 활발했던 해의 합성장보다 우리나라 동쪽의 저기압성 편차가 북동쪽에서 나타나 우리나라에 미치는 영향이 적었던 것으로 볼 수 있다. 따라서 2012년 2월에는 라니냐 시기에 나타나는 대류활동 보다 더 서쪽인 열대 서태평양과 인도양에서 대류활동이 활발하게 나타남으로써 그에 대한 반응으로 유도되는 중위도의 저기압성 순환의 영향을 받았던 것으로 보인다.

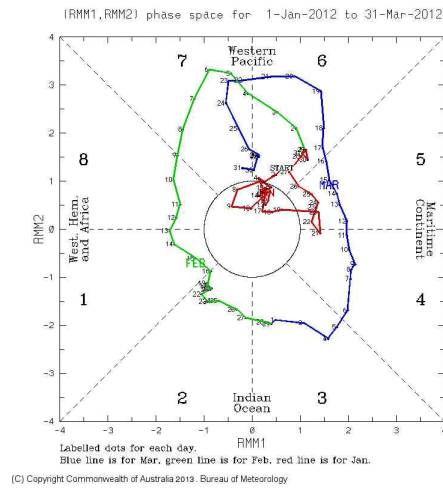


Figure 101. MJO phase during Jan–Mar 2012.
(Bureau of Meteorology <http://bom.gov.au/climate/mjo/>)

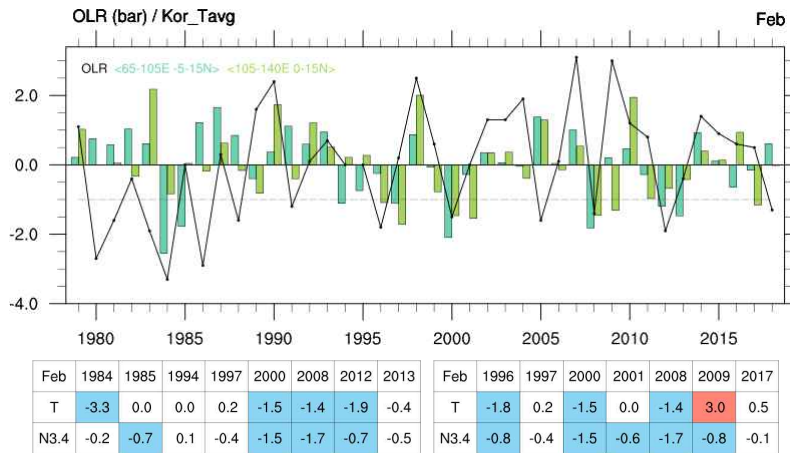


Figure 102. Time series of the normalized OLR anomalies (bar) averaged over the Indian ocean (65–105E, 5S–15N) and western Pacific (105–140E, 0–15N), and mean temperature (line) in South Korea for Feb. (Bottom) Feb mean temperature and Nino3.4 index for the strongest year of the (Left) Indian ocean convection and (Right) western Pacific convection. Red(blue) shading indicates above(below) normal temperature and greater(less) than 0.5(–0.5) Nino3.4 index.

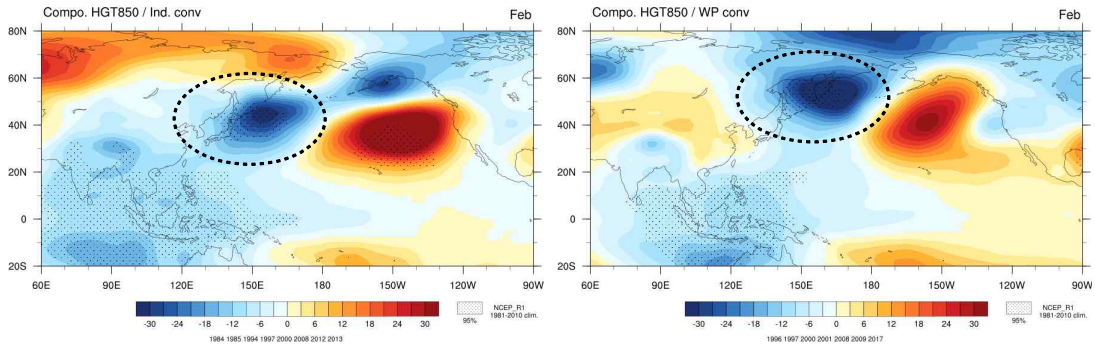


Figure 103. Composite maps of 850hPa geopotential height anomalies for the strongest year of the (Left) Indian ocean (65-105E, 5S-15N) convection and (Right) western Pacific (105-140E, 0-15N) convection.

(4) 요약

이 연구에서는 우리나라에서 발생했던 여름철 폭염과 겨울철 한파의 극한 기온 사례를 선정하고 사례의 특징과 발생 원인을 살펴보았다. 여름철 사례로 6월 사례인 2005년에는 대규모 순환에 의한 영향 보다는 하층 중국 동부의 높은 온도와 건조한 대기가 저기압성 순환에 의한 서풍의 영향으로 우리나라로 유입되면서 고온현상이 나타났다. 7월 사례인 2018년에 우리나라는 상층부터 하층까지 이어진 고기압성 순환의 영향을 받아 기온이 높았다. 고기압성 순환은 아열대 서태평양의 활발한 대류활동, 유라시아 대륙에서 파동전파로 나타난 CGT패턴, 티베트 고기압의 확장이 영향을 주었으며 북대서양의 tripole 해수면온도와 최근 북반구 여름철 지위고도의 선형 증가 추세가 상층 고기압성 편차 강화에 영향을 주었다. 8월 사례인 2016년에는 캄차카반도 주변에 강한 고기압이 위치해 블로킹으로 작용하면서 몽골에 위치한 고기압성 편차에 의한 북풍의 영향을 받아 우리나라로 건조한 공기가 유입되어 기온이 높았다. 캄차카반도 주변 고기압은 중태평양 대류활동 강화에 의해 유도되었고 몽골 상층 고기압은 이 지역의 토양수분 감소와 우랄산맥 주변에서 나타난 고기압성 편차와 관련이 있는 것으로 분석되었다. 겨울철 사례로 12월 사례인 2012년에는 가을철 북극 해빙 면적이 매우 적었으며 12월에 특히 바렌츠-카라 해 해빙이 매우 적었는데, 북극 해빙의 영향으로 음의 북극진동과 바렌츠-카라 해 부근에 고기압성 순환이 유도되어 대륙 고기압과 동아시아 기압골이 강화되었고 풍하측인 우리나라 기온이 하강했다. 1월 사례인 2011년에는 극의 영향과 해양의 영향이 복합적으로 나타났는데, 평년보다 적은 북극해빙의 영향으로 음의 북극진동이 나타나고 유라시아 대륙 북쪽의 고기압과 시베리아 고기압, 동아시아 기압골 강화에 영향을 주었다. 그린란드 서쪽 해의 매우 적었던 해빙은 대기와의 상호작용을 통해 음의 북대서양진동을 지속시켜 동아시아에 까지 영향을 주었고 라니냐와 관련된 열대 서태평양과 동인도양의 대류활동 또한 중위도 저기압성 순환 유도에 영향을 주었다. 2월 사례인 2012년에는 대륙 고기압의 확장에 따라 기온 하강이 나타났으며 북태평양의 저기압성 편차 또한 북서풍 강화에 영향을 주었다. 초겨울부터 바렌츠-카라 해 해빙이 평년보다 적어 우랄산맥 주변에서 고기압성 순환이 발달할 수 있었고 베링 해 해빙은 1월 이후로 평년보다 증가하면서 북태평양 저기압성 편차 발달에 영향을 주었다. 겨울철 사례에서는 공통적으로 라니냐 또는 라니냐와 유사한 동태평양의 낮은 해수면온도와, 인도양과 서태평양에서

대류활동이 활발했던 특징이 있었다. 각 사례 별로 간략하게 요약된 모식도가 부록에 수록되었다.

이 연구에서 사례 선정 과정에는 일평균 자료가 사용되었으나 사례 분석은 월 평균을 기반으로 하였다. 또한 특정 사례에 대해서만 분석했기 때문에 다른 폭염이나 한파 사례에 직접 적용하기에는 어려운 한계가 있다. 그러나 사례분석을 통해 다양한 사례에 대한 분석 정보를 보유함으로써 장기에보 생산에 활용될 수 있는 다양한 기후인자를 발굴과 추후 유사한 사례가 발생했을 경우 원인분석에 빠르게 대처할 수 있는 정보를 제공할 수 있다는 점에서 의미가 있다.

라. 기온 예측 통계 모형 개발

(1) 연구배경

APEC기후센터는 매달 아시아·태평양 지역의 기상청과 기후 관련 기관으로부터 전지구 기후모델 자료를 공유 받아 앙상블(Multimodel Ensemble; MME)하여 3개월 계절 예측 자료를 생산하고 있다. 그러나 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 모델간 앙상블 예측성능은 상대적으로 낮다(Kang and Shukla, 2006). 게다가, $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 격자 간격을 가진 낮은 수평해상도로 인해 한반도는 충분한 격자점으로 표현되지 못한다. 이에 따라 전지구 광역규모의 기후관측 또는 모델에서 모의된 대기 특성을 이용하여 동아시아 지역 기후를 예측하는 기법들이 활발하게 연구되고 있다. Kang (2009)은 통계적 규모축소법을 이용해 한반도 기온과 강수량 예측 시스템을 구축하였다. 한보름 등(2018)은 가을철 눈덮임, 해빙, 해수면온도, 성층권 변동성을 다중회귀분석에 적용하여 겨울철 기온을 예측하였다. 원유진(2017)은 우리나라 여름철 월별 기온에 영향을 주는 대기-해양 변수들을 선별하여 다중선형회귀모델에 적용하여 우리나라 여름철 기온을 예측하고 검증하였다. 손수정과 이태수(2017)는 IPCC의 GCM(전지구순환모델)의 문제점을 보완해 통계적 규모 축소법을 이용하여 특정 지역에 맞는 미래 기후 시나리오를 도출하였다.

기온은 트렌드와 계절성이 존재하는 대표적인 시계열 자료이다. 특히 한반도 지역의 평균기온이 지구평균 기온보다 크게 증가하여 기온 트렌드가 증가 추세에 있다(An et al., 2011). 우리나라의 기온 계절성도 변화하고 있다. Choi et al. (2006)은 1973년부터 2004년까지 우리나라 일 기온 자료를 바탕으로 평균적인 사계절 개시일과 지속기간의 공간적 분포패턴 및 최근의 변화추세를 분석하였다. 그 결과 1980년대 후반 이후 우리나라 겨울철 길이가 10일정도 짧아졌으며, 여름철 지속기간도 국지적으로 증가함을 보였다. 또한, 우리나라 겨울철 지속기간의 감소현상은 최근 전 세계적인 기후변화의 시그널로 나타나는 겨울철 기온상승 추세와 일치함을 보였다.

계절의 주기변동과 트렌드를 반영한 모델을 이용하여 한반도 기온을 예측할 수 있다면 기온예측 정확도 향상에 기여할 수 있다. 이 연구에서는 Facebook에서 개발한 Prophet 시계열 모델을 이용해 한반도 기온을 예측하고자 한다. Prophet 모델은 트렌드와 계절성을 고려할 수 있는 시계열 모델로 Additive 모델에 기반하여 개량되었으며, 각 변수마다 비선형적 적합을 가능하게 하고 시계열 데이터의 트렌드를 쉽게 찾아내도록 해주는 것에 초점이 맞추어진 모델이다. prophet 모델은 데이터를 차분해서 정규화 시킬 필요가 없고 결측치를 보정하지 않아도 된다. 또한 training이 빠르고 회귀분석과 같이 쉽기 때문에 통계학적 지식이 없는 연구자도 빠르게 적용할 수 있다.

이 연구의 구성은 총 5개의 절로 이루어져 있다. 다음절인 두 번째 절에서는 연구에서 사용된 전반적인 방법론에 대해 설명한다. 세 번째 절에서는 연구 자료인 ASOS 기온 자료와 기후지수에 대해 설명하고, 네 번째 절에서는 자료 분석내용과 분석결과를 설명한다. 다섯 번째 절에서는 연구 요약 및 결론을 다루도록 하겠다.

(2) 방법론

(가) 시계열 데이터 분석

시계열 자료는 추세요인, 순환요인, 계절요인, 불규칙요인으로 이루어져 있다(Harvey and Peter, 1990). 추세요인은 시계열에 영향을 주는 장기변동을 의미하고, 순환요인은 중기변동, 계절요인은 단기변동을 의미한다. 불규칙 요인은 측정 및 예측이 어려운 오차변동을 의미하며 시계열에서 추세, 순환, 계절 요인으로 설명하고 남은 변동을 의미한다고 할 수 있다.

(나) Prophet 시계열 모델

Prophet 시계열 모델은 R과 python을 통해 오픈 패키지로 널리 사용되고 있다. prophet 모델은 시계열 모델의 주요구성요소인 트렌드, 계절성, 공휴일요인으로 구성되어있고 다음과 같은 식으로 표현가능하다.

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + e(t) \quad [1]$$

$g(t)$ 는 t 시점에서 트렌드를 나타내며, $s(t)$ 는 t 시점에서 계절성을 나타내고 $h(t)$ 는 t 시점에서 불규칙하게 영향을 미치지만 미리 알 수 있는 정보, $e(t)$ 는 정규분포를 따르는 잔차를 나타낸다. 이 연구에서는 $g(t)$ 는 한반도 기온의 트렌드, $s(t)$ 는 한반도 기온의 계절성, $e(t)$ 는 한반도 기온의 잔차 이다. $h(t)$ 는 제외하고 연구하였다. prophet 모델은 각 설명변수와 반응변수 사이의 비선형적 관계를 고려하기 위해 잠재적 비선형 평활(smoother)을 적용한다는 점에서 Hastie and Tibshirani (1987)에 의한 GAM(Generalized Additive model)과 유사하다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i \quad [2]$$

위 식의 다중회귀 모형에서 선형요소인 $\beta_j x_{ij}$ 를 평활한 비선형함수 $f_j(x_{ij})$ 로 대체하면 Eq. [3]처럼 표현할 수 있다. 각 x_{ij} 에 대해 별도로 f_j 를 계산하고 그 다음에 이들의 기여를 모두 더하기 때문에 가법모델 (additive model)이라 한다.

$$y_i = \beta + f_1(x_{i1}) + \dots + f_p(x_{ip}) + \epsilon_i \quad [3]$$

시계열 가법 모형은 관심변수의 관측값인 y_t 가 다른 시계열 변동 요인(트렌드, 계절성)의 합으로 설명될 수 있다는 가정 하에 만들어진 모형이다. 가법모형에서 변동요인들 간에 서로 독립이라고 가정하며, 각 변동요인들의 값들은 원래 단위로 표현해도 무관하다.

Prophet 모델은 예측문제를 curv-fitting으로 예측하는데 이는 데이터의 시간적 의존 구조를 명시적으로 설명하는 기존의 통계적 시계열 모델과는 다르다. Prophet은 네 가지의 장점이 있다. 첫 번째는 유연성이다. 계절성과 다양한 기간에 대한 예측을 쉽게 모델에 적용가능하다. 두 번째는 일반 통계 시계열 모델과 달리 데이터를 차분해서 정규화 시키거나 결측치를 보정하지 않아도 되기 때문에 모델링이 쉽다. 세 번째는 모델 훈련 속도가 빠르다. 네 번째는 오픈패키지로 분석가가 쉽고 빠르게 모델을 활용할 수 있다.

(다) 트렌드

시계열 모형에서 트렌드는 시간에 따라 증가하거나 감소하는 추세를 말하며 Prophet 모델에서 $g(t)$ 로 표현한다.

$$g(t) = \frac{C}{1 + \exp(-k(t-m))} \quad [4]$$

C는 나타날 수 있는 최고기온, k 는 기온의 상승비율, m 은 상쇄모수이다. 여기서 C인 최고기온은 시간에 따라 변화할 수 있는 값이기 때문에 $C(t)$ 로 표시한다. 기온의 상승비율 k 도 시간에 따라 변화할 수 있는 값이고, 이를 반영하기 위해 change point라는 개념을 적용한다. 즉 처음 기온 상승률을 $k\%$ 라 할 때, 시간이 지나면서 change point마다 조금씩 조정이 된다.

$$a = k + \sum adjustments \quad [5]$$

$a(t)^T \delta$ 는 adjustment를 위한 함수로 t 시점에서 트렌드 상승률은 $k + a(t)^T \delta$ 이다. m 은 변화된 change point를 꼭선으로 바꾸어주는 상쇄 모수로 $m + a(t)^T \gamma$ 는 함수를 부드럽게 이어준다. 최종적으로 도출 되는 식은 Eq.[6]과 같다.

$$g(t) = \frac{C(t)}{1 + \exp(-(k + a(t)^T \delta)(t - (m + a(t)^T \gamma)))} \quad [6]$$

(라) 계절성

Prophet 모델에서 계절성은 푸리에 급수로 접근한다. 푸리에 급수란 주기 함수를 삼각함수의 가중치로 분해한 급수이다. 기온에서 계절성은 지구의 주기를 나타낸다. P는 시계열 데이터의 주기적인 기간을 나타낸다. 이 연구에서는 기온의 365일 데이터를 모두 사용하였기 때문에 윤년을 계산하여 P는 365.25로 하였다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{P}\right) \right) \quad [7]$$

n은 sin과 cos함수 주기 2π 내에서 몇 번의 순환이 이루어지는지를 나타낸다. 즉, N이 크면 시계열 패턴이 빠르게 바뀌는 것을 나타내고 N이 작으면 시계열 패턴이 느리게 변화하는 것을 나타낸다. 모델개발자는 데이터가 연 단위라면 $N=10$ 을 추천 한다.

$$\beta = [a_1, b_1, \dots, a_N, b_N] \sim Normal(0, \sigma^2) \quad [8]$$

이고, $X(t)$ 를 Eq. [9]이라고 할 때,

$$X(t) = \left[\cos\left(\frac{2\pi(1)t}{365.25}\right), \dots, \sin\left(\frac{2\pi(10)t}{365.25}\right) \right] \quad [9]$$

$s(t)$ 는 Eq. [10]과 같다.

$$s(t) = X(t)\beta; \quad \beta \sim Normal(0, \sigma^2) \quad [10]$$

(마) 베이저안 MAP(maximum a posteriori)

모수 추정을 위해 MAP(Maximum a posteriori)를 사용하였다. MAP는 베이저안 확률에 기반한 모수추정 방법이다. 베이저안 모수 추론과 기존 통계에서 모수 추론의 가장 큰 차이점은 모수 θ 를 추정하는 방법에 있다. 빈도주의 통계의 추론에서 모수 θ 는 고정된 값을 갖는 반면, 베이저안 모수추론에서는 모수 θ 에 대한 확률분포를 사용한다. 베이저안 모수추정 방법은 우리가 사전에 알고 있는 사전정보를 결합하여 모수추정이 가능하다.

y 는 관측된 자료를 나타내고 θ 는 모수를 나타낸다고 할 때, y 에 대한 확률밀도함수 θ 를 $p(y|\theta)$ 로 나타내고, 이를 y 에 대한 θ 의 우도함수(likelihood function)라 한다. 현실에서 모수 θ 는 알기 어렵기 때문에 베이저안에서는 θ 에 대한 분포를 결정함으로 불확실성을 수치화하는데, 이를 θ 의 사전분포(prior distribution)라 하고 $\pi(\theta)$ 로 나타낸다. 사전분포는 자료를 관측하기 이전에 결정되어지고 과거의 경험과 자료를 통해 정해진다. 베이즈 정리에 의해 y 조건일 때 θ 의 조건부분포를 구할 수 있으며 이를 θ 의 사후분포(posterior distribution)라 하고 $p(\theta|y)$ 로 나타낸다. θ 에 대한 베이저안 추론은 θ 의 사후분포 $p(\theta|y)$ 에 기초한다. 사후분포 요약 통계량으로서 평균, 중앙값, 최빈값, 분산 등을 계산할 수 있다. 여기서 사후 최빈값은 사후분포인 $p(\theta|y)$ 를 가장 크게 하는 θ 의 값으로 MAP라고 한다. 즉, 주어진 관측치에 대해

최대 확률을 가지는 θ 를 찾는다.

$$p(\theta|y) = \frac{p(y|\theta)\pi(\theta)}{p(y)} \quad [10]$$

(바) 랜덤포레스트

기계학습 방법 중 하나인 랜덤포레스트를 이용하여 월별 기온에 영향을 미치는 기후인자를 알아보았다. 랜덤포레스트는 데이터의 일부를 복원 추출하고 해당 데이터에 대해서 의사결정나무를 여러 개를 만들어 앙상블하는 형식으로 만들어진다(Breiman, 2001). 의사결정나무는 학습 데이터에 따라 생성되는 노드가 다르게 나타나기 때문에 일반화하여 사용하기 어렵다. 랜덤 포레스트는 의사결정나무를 앙상블하여 생성되기 때문에 과적합하지 않는다는 장점이 있고 일반화하기 어려운 의사결정나무의 단점을 보완할 수 있다(Park, 2016). 랜덤포레스트에서는 변수중요인 IncNodePurity 플랏을 제공한다. IncNodePurity는 해당 변수가 포함되지 않았을 때 예측오차가 얼마나 줄어드는지를 보여준다. 이 연구에서는 IncNodePurity에 의한 변수 중요도가 높은 변수를 Prophet 모델에 적합하여 한반도 월별 겨울철 기온을 예측하였다.

(사) 교차상관Cross-Correlation

시계열 상관분석을 위해 교차상관분석을 수행하였다. 교차상관분석은 시계열 자료 간 선형관계 또는 시계열의 유사성을 알아보기 위해 사용한다. 시계열 데이터에 적용되었을 뿐, 수식은 일반 피어슨 상관계수와 같다. 교차상관분석을 이용하면 시계열의 지연상관관계도 알 수 있다. 그러나 시계열 자료에 자기상관이 존재한다면 허위상관이 있을 수 있다. 그렇기 때문에 두 시계열 데이터를 먼저 백색잡음의 형태로 바꾼 다음 두 시계열의 상관관계를 구해야한다. 백색잡음이란 자기상관이 없는 시계열을 백색잡음이라고 한다. t 시점, k 시차에 대한 교차상관 식은 Eq. [12]와 같다.

$$r_k = \frac{\sum(X_t - \bar{X})(Y_{t-k} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_t - \bar{X})^2} \sqrt{\sum(Y_{t-k} - \bar{Y})^2}} \quad [12]$$

(아) 모델평가

통계적 추정의 정확성에 대한 척도로 MSE(Mean Squared Error), RMSE(ROOT Mean Squared Error), bias를 사용하였다. 각 척도는 예측값과 실제 관측값에 대한 예측 정밀도를 나타내며, 그 값이 작을수록 정밀도가 좋다. MSE는 잔차의 제곱에 대해 평균을 취한것이고 RMSE는 MSE에 루트를 취한 것이다. RMSE를 사용하면 잔차의 단위를 관측값과 유사한 단위로 다시 변환하여 해석을 쉽게 할 수 있다. bias는 예측된 값이 치우쳐진 정도를 나타낸다. 아래의

식에서 n 은 전체 관측치의 수이고, y_i 는 i 번째 관측값이며, \hat{y}_i 은 i 번째 예측값을 나타낸다.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_1^n (\hat{y}_i - y_i)^2, RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\hat{y}_i - y_i)^2}, bias = \hat{y}_i - y_i \quad [13]$$

MME와의 비교를 위해 Hit rate, HSS(Heidke Skill Score), 순위상관계수를 이용하였다. Hit rate는 3분위 예보에서 적중률을 나타내고 HSS는 3분위 예보 적중률에서 우연히 맞힐 확률을 제외하는 검증기법이다. 순위상관계수는 서열척도 간의 상관관계를 측정하는 방식이다. 3분위 예보에서 3개 범주는 이들 사이의 상대적 높낮음을 구분하고 비교할 수 있으므로 서열척도라고 할 수 있다. Hit rate, HSS, 순위상관계수는 값이 높을수록 좋다.

(3) 연구자료

(가) ASOS 한반도 기온

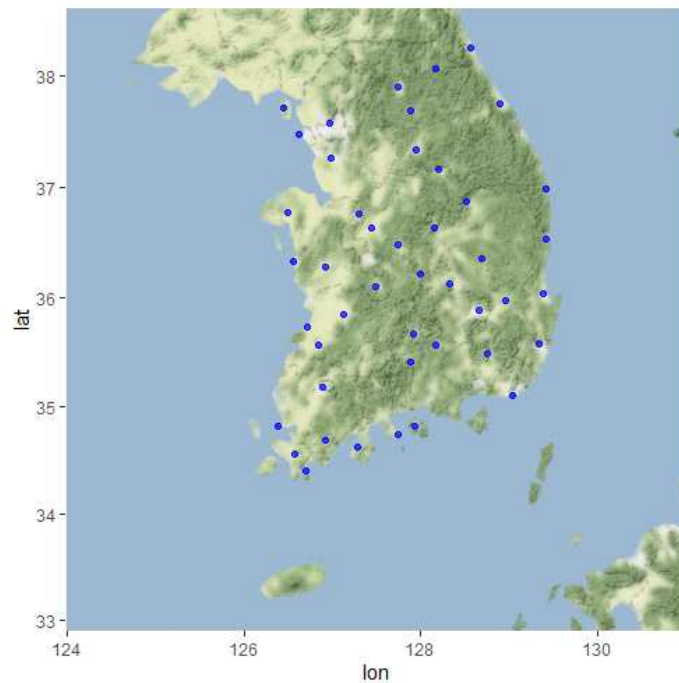


Figure 104. ASOS 45 stations

한반도 평균기온은 KMA(Korea meteorological administration)에서 선정한 ASOS 47개 지점 중 기후특성이 상이한 제주 지역을 제외한 45개 지점의 평균값을 이용하였다.

(나) 기후지수

기후 지수는 27개 기후지수를 이용하였으며 Table 3과 같다.

Table 3. climate indexes

indexes	indexes
NINO12	WP(Western Pacific teleconnection pattern)
NINO3	NP(North Pacific Pattern)
NINO34	AO(Arctic oscillation)
NINO4	AAO(Antarctic oscillation)
ONI(Oceanic Nino Index)	NAO(North Atlantic Oscillation)
TNI(Trans-Nino Index)	SOI(Southern Oscillation)
PACWARM(Pacific Warmpool)	NOI(Northern Oscillation)
EOFAC(Tropical Pacific)	QBO(Quasi Biennial Oscillation)
EMI(El Nino Modoki Index)	WYI(Webster-Yang Index)
DMI(Indian Ocean Dipole Mode Index)	AUSMI(Australian summer monsoon)
TNA(Tropical North Atlantic index)	SAMI(South Asia Monsoon Index)
TSA(Tropical South Atlantic index)	IMI(Indian Monsoon Index)
ATLTRI	WNPMI(Wstern North Pacific Monsoon Index)
PNA(Pacific North American)	

(4) 자료 분석 및 결과

(가) 시계열 모델을 이용한 한반도 기온 3개월 예측

시계열 분석에서는 시계열 자료를 그림으로 그려보는 것이 중요하다. 이를 시도표라 하고 시도표를 통해 시계열 특성을 잘 파악 할 수 있다.

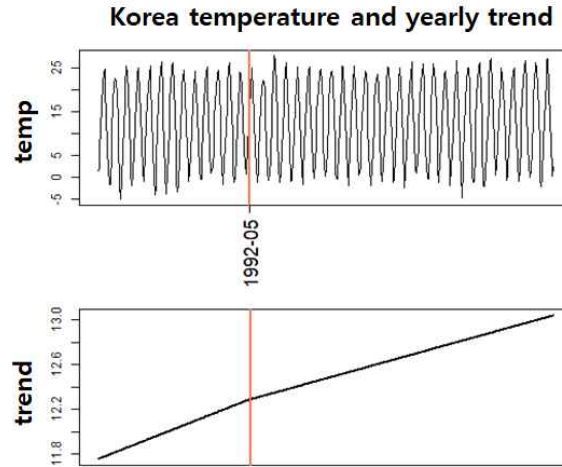


Figure 105. Detection of Korea temperature change points using Prophet model

Prophet 모델에서는 기온 트렌드 변화점을 자동으로 탐지한다. Figure 105는 1979부터 2018년까지 한반도 기온의 추세를 시각화한 결과이다. 한반도 연 기온은 1992년 5월을 기점으로 트렌드가 변화하였으며 꾸준히 증가하는 추세이다. 40년 동안 한반도 기온은 약 1.2°C 증가 했다.

한반도 기온 3개월 예측을 위한 기후지수로 AO(Arctic Oscillation), PACWARM(Pacific warm pool), TSA(Tropical South Atlantic Index), SOI(Southern Oscillation Index)를 이용 하였다. AO는 북반구 극지역의 월평균 1000-hPa 아노말리를 EOF(Empirical Orthogonal Function)하여 얻어지는 1번째 모드이다. AO는 북반구 날씨에 영향을 미치는 대규모 기후 패턴이며 양의 위상과 음의 위상이 번갈아 나타난다. 최근 기후변화로 인해 변화하는 극지역의 영향이 주목받고 있는 가운데, 북극진동이 동아시아 겨울철뿐만 아니라 여름철에도 영향을 줄 수 있다는 결과가 나왔다(Lee and Lee, 2016). SOI는 대규모 열대 SST 변동성과 연관 있으며 ENSO에서 SO 부분을 측정하는 것이다. TSA는 열대 남대서양의 Gulf of Guinea (0-20° S, 10° E~30° W)에서 월별 지표 해수면온도를 나타낸다. Cai et al. (2019)는 1990년대 후반 이후 온난화가 빨라지고 있다는 사실을 근거로 기후 예측에 대서양의 영향이 커지고 있다는 사실을 밝혔으며 열대 대양 간 활발한 상호작용이 한국을 포함한 전 지구적 이상 기후를 유도하는 대기 순환에 영향을 미친다는 사실을 확인했다. 김연희 등(2008)에서는 한반도 기후변동과 역학적으로 연관되어있는 기후지수들을 종합적으로 고찰하였다. 그 결과 AO는 한반도 1, 5, 7, 8, 10월 기온과 지연상관관계가 유의미하고, SOI는 4, 5, 6, 7, 9, 12월 기온과 지연상관관계가 존재하며, TSA는 1, 4, 5, 8, 9, 10월 기온과 지연상관관계가 유의미하다. 엘니뇨현상은 적도태평양 기압, 바람, 강수장의 변동을 수반하고, 원격상관을 통해 거리가 먼 곳의 기후를 변동시킨다(Horel and Wallace, 1981). 최근 들어 엘니뇨의 아노말리 형태가 동태평양보다 중태평양 해수면온도 아노말리가 더 강한 구조를 보이는 형태를 빈번히 보이고 있다. 이 현상을 Warm pool 현상이라고 한다. PACWARM지수는 Pacific Warm Pool을 나타내는 지수이다. 김진수 등(2014)에서는 변화하는 엘니뇨현상을 반영하여 한반도 기후변동성을

고려해야한다고 제시했다.

시계열 모델에 적용하기에 앞서 한반도 기온과 기후지수 시계열 자료의 통계적 상관성이 유의미한지 알아 볼 필요가 있다. 두 시계열 간의 상관관계를 파악하기 위해 두 시계열을 백색잡음의 형태로 바꾼 다음 교차상관관계(Cross correlation)를 구하였다. Figure 106은 한반도 연기온과 기후지수의 지연시차별 상관관계를 나타내는 cross correlation plot이다. Figure 106에서 파란 점선을 넘어가는 지연시차가 유의수준 0.05에서 통계적 상관성이 유의미한 시차이다. 교차상관분석 결과 유의수준 0.1에서 한반도 연기온과 AO 지연시차 4개월, SOI 지연시차 3개월, TSA 지연시차 9개월, PACWARM 지연시차 5개월이 통계적으로 유의미한 상관관계가 있다. 한반도 연기온과 기후지수의 상관관계는 유의수준 0.1에서 모두 유의하지만 그 계수가 0.1정도로 작다.

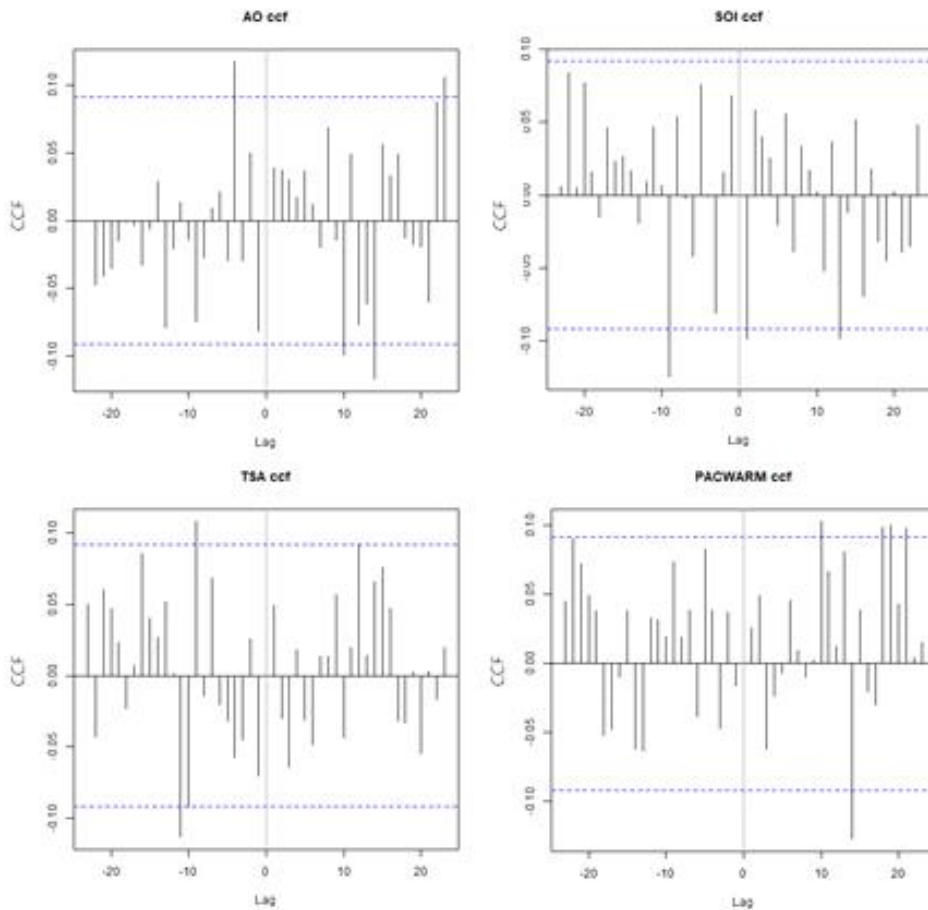


Figure 106. Cross correlation between Korean temperature and climate indexes

Table 4. Cross correlation between south Korea temperature and climate indices

Index	지연시차(월)	상관계수	지수명	지연시차(월)	상관계수
AO	4	0.118**	TSA	9	0.110**
SOI	3	-0.081*	PACWARM	5	0.084*

**p<0.05, *p<0.1

Table 5. Parameter estimation of south Korea temperature prediction

변수	모수	변수	모수
AO	0.0003	TSA	0.0051
PACWARM	0.0028	SOI	-0.0048

Table 5는 2018년 12월 한반도 기온 예측에 대한 모수추정 결과이다. 교차상관 결과와 같이 AO, TSA, PACWARM은 한반도 연 기온과 양의 상관관계를 가지고, SOI는 한반도 연 기온에 음의 상관을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 모수 추정값이 아주 작은 것을 알 수 있다. 그 이유는 한반도 기온은 계절성이 뚜렷한 시계열이므로 계절성에 의해 한반도 기온의 대부분이 설명되어지기 때문이다.

Table 6. Comparison of third quartile predictions between MME and Prophet models

date	OBS	MME	Prophet
2017-01	A	A	N
2017-02	N	A	A
2017-03	A	A	A
2017-04	A	A	A
2017-05	A	A	A
2017-06	A	A	A
2017-07	A	A	A
2017-08	N	A	A
2017-09	N	A	A
2017-10	A	A	A
2017-11	B	A	N
2017-12	B	A	N
2018-01	B	A	N
2018-02	B	N	A
2018-03	A	A	A
2018-04	A	A	A
2018-05	A	A	A
2018-06	A	A	A
2018-07	A	A	N
2018-08	A	A	A
2018-09	N	A	A
2018-10	A	A	A
2018-11	N	A	N
2018-12	N	A	N

Table 6은 2017~2018년 MME와 Prophet의 3분위 예측결과 비교표이다. A는 평년보다 높게, N은 평년 비슷, B는 평년보다 낮음으로 예측한 것을 의미한다. MME가 전반적으로 기온이

높을 것으로 예측하는 것에 비해 Prophet 모델은 평년 비슷 수준도 MME에 비해 잘 모의하는 것을 볼 수 있다. 평년 비슷 수준은 현재 기상청에서 운영하고 있는 1973부터 2017까지 월별 전국 평균기온 편차이다.

Table 7. Model validation of 3-month temperature prediction in south Korea

MODEL	(2013~2018)			(2017~2018)		OBSvsFCST Cor.
	MSE	RMSE	bias	Hit rate	hss	
Prophet	1.094	0.968	-0.175	0.625	0.438	0.550**
MME	1.069	1.034	0.216	0.521	0.313	-

Table 7은 한반도 3개월 기온 예측 결과에 대한 검증 수행 결과이다. 2013년부터 2018년 기간에 대한 교차검증 결과 Prophet 시계열 모델의 RMSE가 0.968, bias가 -0.175로 나타났다. MME는 기온을 높게 예측하는 경향이 있고, Prophet은 기온을 낮게 예측하는 경향이 있다. 2017년부터 2018년 기간에 대한 Hit rate는 0.625로 나타났고 HSS는 0.438로 나타났다. 순위상관계수는 0.550으로 상관관계가 높게 유의한 것을 알 수 있다. 전반적으로 Prophet 시계열 모델이 우수한 것을 알 수 있다.

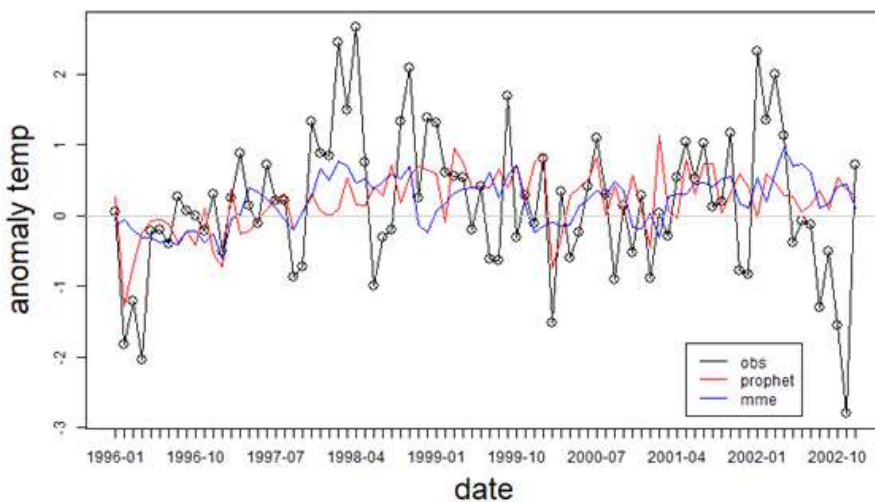


Figure 107. Comparison of anomaly temperature between Prophet model and MME(1-month Lead forecast)

Prophet 1개월 예측 결과와 MME hind cast기간의 1개월 예측 정보를 비교하였다. 관측과 예측 값의 상관계수는 Prophet 모델은 0.298이고, MME는 0.361이다. 두 모델 모두 유의수준

0.05에서 통계적 상관성이 있다. 아노말리 상관계수는 MME보다 낮지만 극값을 MME보다 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

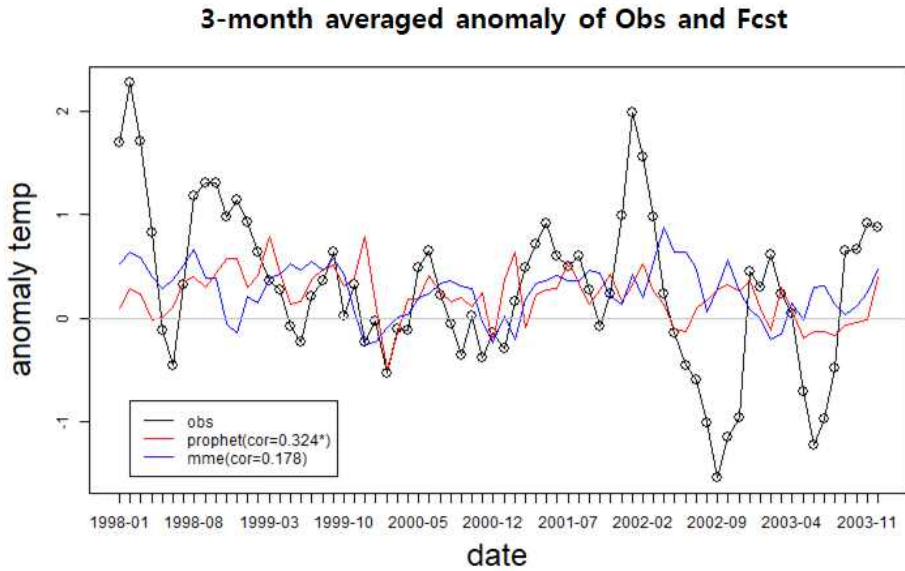


Figure 108. Comparison of anomaly temperature between Prophet model and MME(3-month Lead forecast)

Prophet 3개월 예측 평균과 MME hind cast기간의 3개월 예측 평균을 비교하였다. 그 결과 Prophet 모델 예측값이 관측과 상관관계가 0.324로 유의한 것을 알 수 있다.

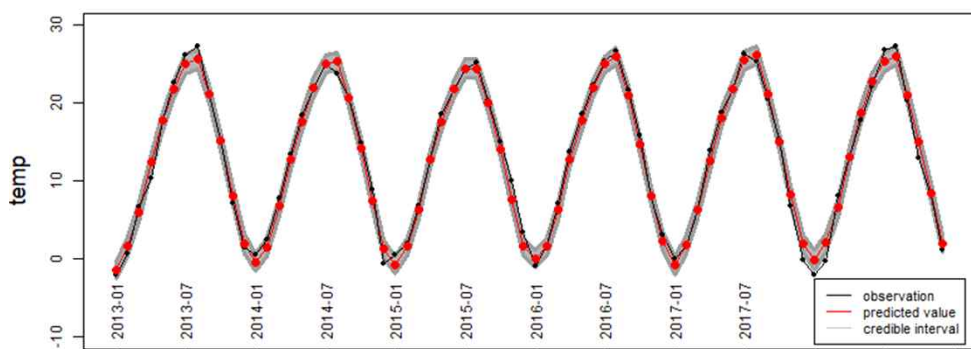


Figure 109. Result of temperature Prediction with trends and seasonality in south Korea

Prophet 모델에서 계절성과 트렌드가 반영되어 예측된 시계열 그림이다. 73%의 확률로 신용구간 평균 범위 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 내에서 관측값이 분포한다.

(나) 시계열 모델을 이용한 겨울철 한반도 기온 예측

랜덤포레스트에서 얻은 변수 중요도(IncNodePurity)는 변수선택방법 중 하나로 사용될 수 있다. IncNodePurity는 node purity 증가 정도를 나타내며 변수가 포함되지 않았을 때 예측오차가 얼마나 줄어드는지를 보여준다. 이 연구에서는 랜덤포레스트 변수중요도를 통해 월별 기온에 영향을 미치는 기후지수를 알아보았다.

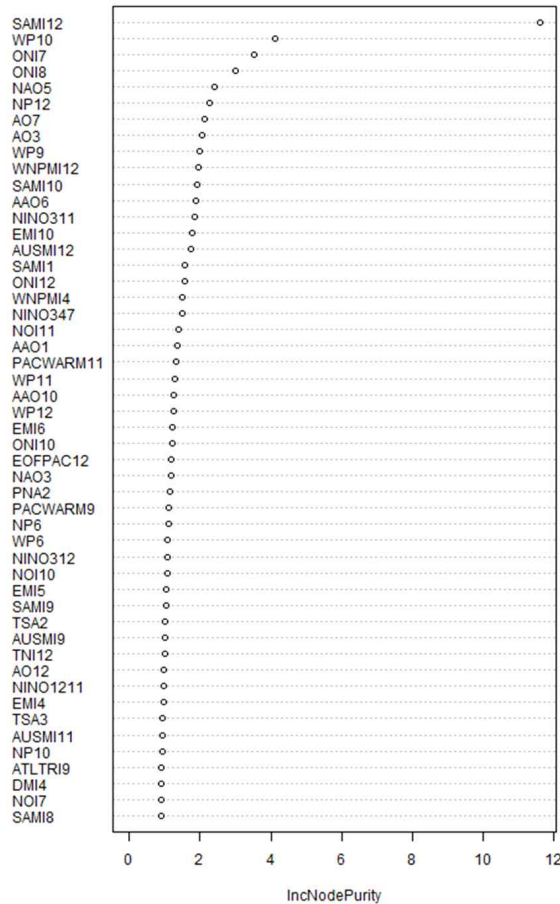


Figure 110. 50 climate indices affecting Korea December temperature in variable importance of random forest

Figure 110은 12월 기온에 영향을 미치는 기후지수 50개이다. 50개 변수 중 다중공선성이 존재하는 변수를 제거하고 최종 선택된 기후지수는 Table 8이다. 한반도 12월 기온에 영향을 미치는 13개의 기후지수를 Prophet 시계열 모델에 적용하였다.

Table 8. Selected indices without multi collinearity among December 50 indices

No.	indices	IncNodePurity
1	WP Oct	4.112
2	NAO May	2.420
3	NINO3 Nov	1.856
4	WNPMI Apr	1.512
5	NINO34 Jul	1.483
6	PACWARM Nov	1.309
7	WP 11	1.293
8	AAO Oct	1.266
9	PNA Feb	1.149
10	TSA Feb	1.024
11	AUSMI Sep	1.018
12	TSA Mar	0.951
13	DMI Apr	0.908

Table 9는 Prophet 모델을 이용한 12월 기온 모수추정 결과표이다. 10월 WP, 5월 NAO, 11월 NINO3, 11월 WP, 2월 PNA, 3월 TSA는 한반도 기온과 양의 상관관계를 가지고, 4월 WNPMI, 7월 NINO34, 11월 PACWARM, 10월 AAO, 2월 TSA, 9월 AUSMI, 4D월 DMI는 한반도 기온과 음의 상관관계를 가진다.

Table 9. Parameter estimation of south Korea December temperature

indices	Estimate	indices	Estimate
WP Oct	0.0803	AAO Oct	-0.070
NAO May	0.0573	PNA Feb	0.0822
NINO3 Nov	0.158	TSA Feb	-0.173
WNPMI Apr	-0.0283	AUSMI Sep	-0.047
NINO34 Jul	-0.091	TSA Mar	0.160
PACWARM Nov	-0.117	DMI Apr	-0.075
WP 11	0.0528		

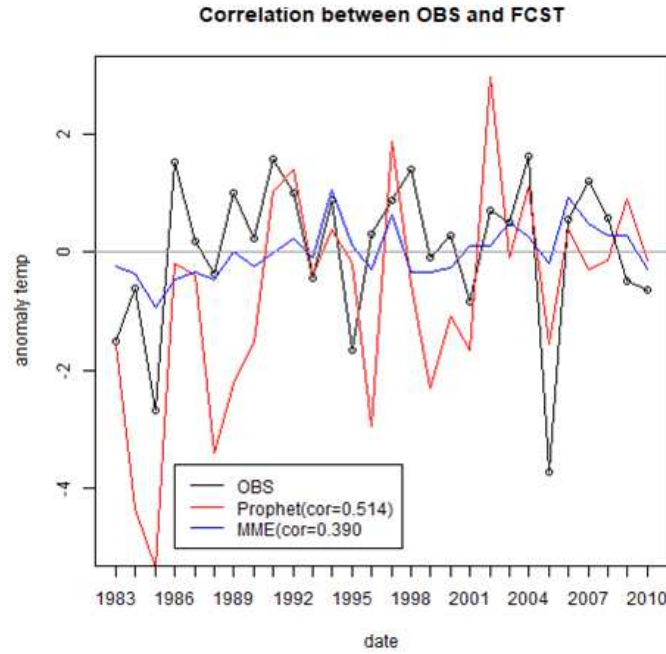


Figure 111. Correlation between OBS and FCST in December prediction

Figure 111은 1983~2010년 한반도 12월 기온 관측값과, Prophet 모델 예측값, MME 예측값의 아노말리 비교결과이다. 상관계수는 Prophet 모델이 0.514, MME가 0.390으로 나타났다. Prophet 모델의 상관계수가 더 높은 것을 알 수 있다.

Table 10. Hit rate and hss in December temperature forecast

	Hit rate	hss
Prophet	0.464	0.196
MME	0.464	0.196

12월 기온예측에 대한 Prophet 모델과 MME의 Hit rate와 HSS를 비교하였다. 그 결과 Prophet 모델과 MME의 Hit rate가 0.464, hss가 0.196으로 같다. 기후지수로 간단히 모의한 prophet 모델에서 MME와 비슷한 결과를 주는 것에 의미가 있다.

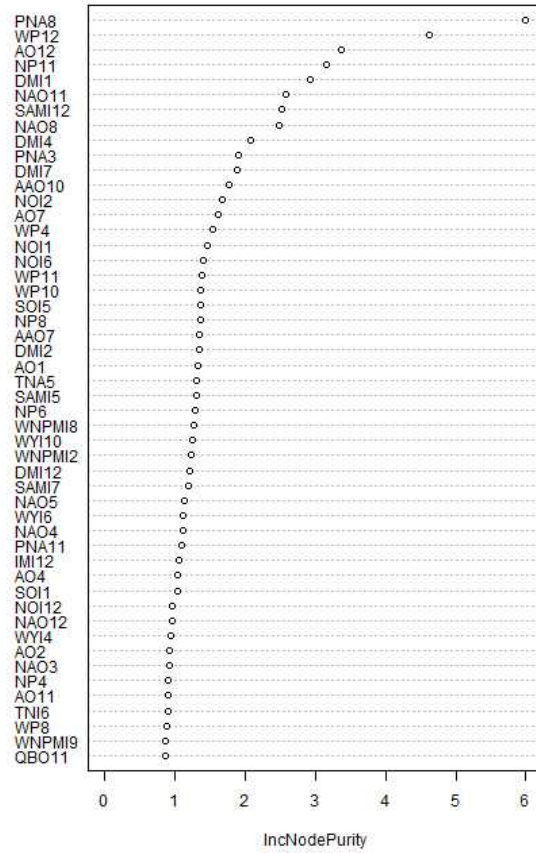


Figure 112. 50 climate indices affecting Korea January temperature in variable importance of random forest

Figure 112는 1월 기온에 영향을 미치는 기후지수 50개이다. 50개 변수 중 다중공선성이 존재하는 변수를 제거하고 최종 선택된 기후지수는 Table 11이다. 한반도 1월 기온에 영향을 미치는 15개의 기후지수를 Prophet 시계열 모델에 적용하였다.

Table 11. Selected indices without multi collinearity among January 50 indices

No.	indices	IncNodePurity
1	PNA Aug	5.990
2	WP Dec	4.615
3	AO Dec	3.365
4	NAO Nov	2.585
5	DMI Jul	1.875
6	NOI Feb	1.667
7	AO Jul	1.606
8	WP Nov	1.376
9	WP Oct	1.355
10	AAO Jul	1.352
11	TNA May	1.305
12	WNPMI Aug	1.275
13	NAO Apr	1.110
14	NAO Dec	0.952
15	NP Apr	0.904

Table 12. Parameter estimation of south Korea January temperature

indices	Estimate	indices	Estimate
PNA Aug	0.086	WP Oct	0.065
WP Dec	0.082	AAO Jul	-0.075
AO Dec	0.202	TNA May	-0.048
NAO Nov	0.102	WNPMI Aug	-0.045
DMI Jul	-0.064	NAO Apr	-0.064
NOI Feb	0.065	NAO Dec	-0.132
AO Jul	-0.064	NP Apr	-0.060
WP Nov	-0.134		

Table 12는 Prophet 모델을 이용한 1월 기온 모수추정 결과표이다. 8월 PNA, 12월 WP,

12월 AO, 11월 NAO, 2월 NOI, 10월 WP는 한반도 1월기온과 양의 상관관계를 가지고 7월 DMI, 7월 AO, 11월 WP, 7월 AAO, 5월 TNA, 8월 WNPMI, 4월 NAO, 12월 NAO, 4월 NP는 한반도 1월 기온과 음의 상관관계를 가진다.

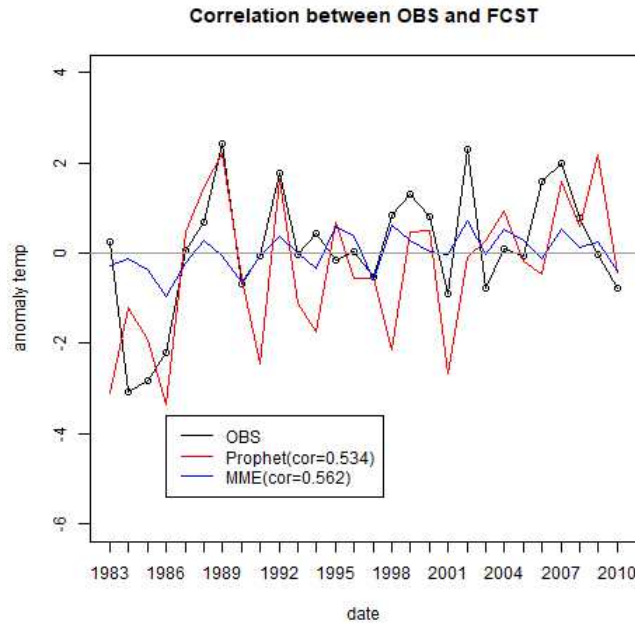


Figure 113. Correlation between OBS and FCST in january prediction

Figure 113은 1983~2010년 한반도 1월 기온 관측값과, Prophet 모델 예측값, MME 예측값의 아노말리 비교결과이다. 상관계수는 Prophet 모델이 0.534, MME가 0.562로 MME가 더 높게 나타났다. 그러나 극값을 Prophet 모델이 더 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

Table 13. Hit rate and hss in January temperature forecast

	Hit rate	hss
Prophet	0.429	0.143
MME	0.357	0.036

1월 기온예측에 대한 Prophet 모델과 MME의 Hit rate와 hss를 비교하였다. 그 결과 Prophet 모델의 Hit rate가 0.429, hss가 0.143으로 나타났고, MME의 Hit rate가 0.357, hss가 0.036으로 나타났다. 기후지수로 간단히 모의한 prophet 모델이 MME보다 더 우수한 결과를 주는 것을 알 수 있다.

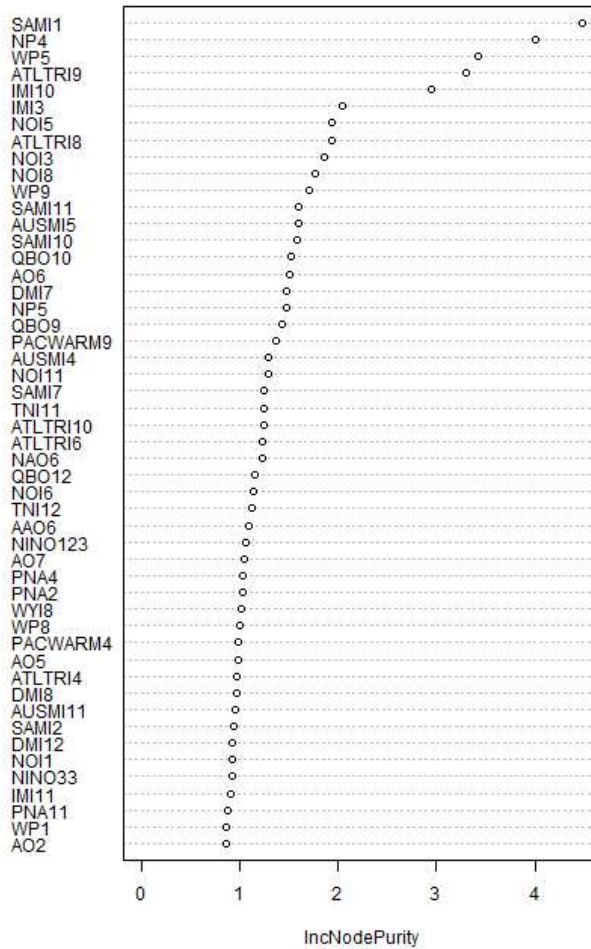


Figure 114. 50 climate indices affecting Korea February temperature in variable importance of random forest

Figure 114는 2월 기온에 영향을 미치는 기후지수 50개이다. 50개 변수 중 다중공선성이 존재하는 변수를 제거하고 최종 선택된 기후지수는 Table 13이다. 한반도 1월 기온에 영향을 미치는 13개의 기후지수를 Prophet 시계열 모델에 적용하였다.

Table 14. Selected indices without multi collinearity among February 50 indices

No.	indices	IncNodePurity
1	SAMI1	4.4761
2	NP4	4.0028
3	IMI10	2.9435
4	IMI3	2.0493
5	NOI3	1.8658
6	QBO12	1.1481
7	NOI6	1.1454
8	TNI12	1.1244
9	AAO6	1.0930
10	AO5	0.9884
11	AUSMI11	0.9533
12	IMI11	0.9147
13	WP1	0.8627

Table 15. Parameter estimation of south Korea February temperature

indices	Estimate	indices	Estimate
SAMI1	0.110	TNI12	-0.148
NP4	-0.101	AAO6	-0.158
IMI10	0.081	AO5	-0.083
IMI3	0.109	AUSMI11	0.049
NOI3	0.123	IMI11	0.110
QBO12	-0.090	WP1	-0.087
NOI6	-0.066		

Table 15는 Prophet 모델을 이용한 2월 기온 모수추정 결과표이다. 1월 SAMI, 10월 IMI, 3월 IMI, 3월 NOI, 11월 AUSMI, 11월 IMI는 한반도 2월기온과 양의 상관관계를 가지고 4월 NP, 12월 QBO, 6월 NOI, 12월 TNI, 6월 AAO, 5월 AO, 1월 WP는 한반도 2월 기온과 음의 상관관계를 가진다.

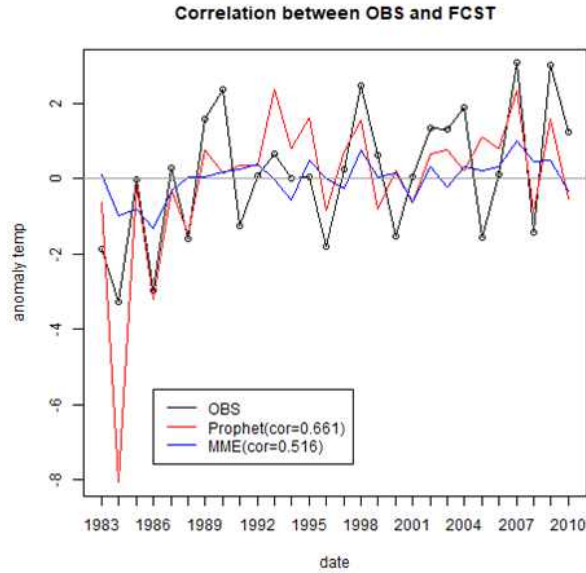


Figure 115. Correlation between OBS and FCST in February prediction

Figure 115는 1983~2010년 한반도 2월 기온 관측값과, Prophet 모델 예측값, MME 예측값의 아노말리 비교결과이다. 상관계수는 Prophet 모델이 0.661, MME가 0.516으로 Prophet 모델의 상관관계가 더 높게 나타났다. 또한 극값을 Prophet 모델이 더 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

Table 16. Hit rate and hss in February temperature forecast

	Hit rate	hss
Prophet	0.500	0.250
MME	0.464	0.196

2월 기온예측에 대한 Prophet 모델과 MME의 Hit rate와 HSS를 비교하였다. 그 결과 Prophet 모형의 Hit rate가 0.500, HSS가 0.250으로 나타났고, MME의 Hit rate가 0.464, HSS가 0.196으로 나타났다. 기후지수로 간단히 모의한 prophet 모델이 MME보다 더 우수한 결과를 주는 것을 알 수 있다.

(5) 요약 및 결론

한반도 기후는 계절성과 트렌드가 있는 대표적인 시계열 자료이다. 이 연구에서 Prophet 모델과 기후지수를 이용하여 한반도 3개월 기온 예측과 겨울철 기온예측을 수행하였다. Prophet 모델은 시계열 데이터의 트렌드와 계절성을 반영하여 예측하는 것에 초점이 맞추어진

모델이다. Prophet 모델로 한반도 기온 트렌드 변화점을 분석한 결과 1979년부터 2018년까지 한반도 기온은 약 1.2°C 증가했으며 1992년 5월을 기점으로 트렌드가 변화했다.

한반도 기온 3개월 예측을 위해 사용한 데이터는 1979년부터 2018년까지 45개 ASOS 기상관측소 기상정보와 AO, SOI, TSA, PACWARM 기후지수이다. 한반도 기온과 기후지수의 상관관계를 파악하기 위해 교차상관분석을 수행하였다. 교차상관분석 결과 지연시차 4개월의 AO, 지연시차 3개월의 SOI, 지연시차 9개월의 TSA, 지연시차 5개월의 PACWARM이 한반도 기온과 유의수준 0.1에서 통계적으로 유의미한 상관관계가 있었다. Prophet 모델에서 AO, TSA, PACWARM은 한반도 연 기온과 양의 상관관계를 가지고, SOI는 한반도 연 기온과 음의 상관을 가진다. 모델평가를 위한 척도로 MSE(Mean Squared Error), RMSE(ROOT Mean Squared Error), bias, Hit rate, hss(heidke skill score)를 사용하였다. 2013년부터 2018년 기간에 대한 교차검증 결과 Prophet 시계열 모델의 RMSE가 0.968, bias가 -0.175로 나타났고 MME는 RMSE가 1.034, bias가 0.216으로 나타났다. Prophet은 기온을 낮게 예측하는 경향이 있고 MME는 기온을 높게 예측하는 경향이 있다. 2017년부터 2018년 기간에 대한 Prophet 모델의 Hit rate는 0.625로 나타났고 HSS는 0.438로 나타났다. 같은 기간 MME는 Hit rate가 0.521, HSS가 0.313으로 나타났다. Prophet 모델이 MME보다 예측성능이 개선됨을 보였다.

겨울철 월별 기온예측을 위해 사용한 데이터는 1979년부터 2018년까지 45개 ASOS 기상관측소 기상정보와 27개의 기후지수이다. 월 기온에 영향을 미치는 기후지수를 선택하기 위해 랜덤포레스트의 변수중요도를 이용하였다. 한반도 12월 기온에 영향을 미치는 13개의 기후지수를 선택하여 Prophet 시계열 모델에 적용하였다. 1983~2010년 한반도 기온 관측값과, Prophet 모델과 MME 예측값의 아노말리 상관관계를 비교한 결과 Prophet 모델이 0.514, MME가 0.390으로 나타났다. Prophet 모델의 상관계수가 더 높은 것을 알 수 있다. Hit rate와 HSS는 Prophet 모델과 MME 모두 0.464, 0.196으로 같게 나왔다. 랜덤포레스트를 이용하여 한반도 1월 기온에 영향을 미치는 15개의 기후지수를 선택하여 Prophet 시계열 모델에 적용하였다. 1983~2010년 한반도 기온 관측값과, Prophet 모델과 MME 예측값의 아노말리 상관관계를 비교한 결과 Prophet 모델이 0.534, MME가 0.562로 MME가 더 높게 나타났다. Prophet 모델의 상관계수가 더 낮지만 Prophet 모델이 극값을 더 잘 모의하였다. Hit rate와 HSS는 Prophet 모델이 0.429, 0.143으로 나타났고, MME가 0.357, 0.036으로 나타나 Prophet 모델이 한반도 기온을 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 2월 기온에 영향을 미치는 13개의 기후지수를 Prophet 시계열 모델에 적용하였다. 1983~2010년 한반도 기온 관측값과, Prophet 모델과 MME 예측값의 아노말리 상관관계를 비교한 결과 Prophet 모델이 0.661, MME가 0.515로 Prophet 모델의 상관관계가 더 높게 나타났다. Hit rate와 HSS는 Prophet 모델이 0.500, 0.250으로 나타났고, MME가 0.464, 0.196으로 나타나 Prophet 모델이 한반도 기온을 더 잘 모의하는 것으로 나타났다.

Prophet 시계열 모델과 기후지수를 이용하여 한반도 기온을 간단히 예측할 수 있다. 그러나 시계열 모델을 이용한 한반도 기온 3개월 예측 모수추정 결과 기후지수의 회귀계수가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 한반도 기온의 대부분이 계절성에 의해 설명이 되기 때문에 기후지수에 의해 설명되어 지는 부분이 상대적으로 낮게 나타나는 것이다. 또한 네 개의 기후지수만으로 한반도 연기온을 모의하는데 한계가 있다. 따라서 한반도 연기온을

예측하기 위해 상관성이 높은 기후지수나 인자를 추가함으로 예측성 향상을 기대해볼 수 있다.

3. 역학 모델 분석 및 예측 기술 개발

가. 월별 강수 전망을 위한 역학 모형의 서태평양 순환 모의 특성 분석

(1) 우리나라 현업 월별/3개월 예측 지원을 위한 APCC MME 스킬 (TCC, HSS) 비교

지난 2017년부터 APCC에서는 우리나라 3개월 계절예측에서 예보관의 객관적 판단에 도움을 주고자 APCC Multi Model Ensemble(MME)에 대한 예보 분석표를 제공하고 있다. 다음 Figure 116은 실제 2019년 2월 기상청 예보토의에 쓰인 예보 분석표이다. 이는 봄철인 3, 4, 5월 예보를 위한 분석이다.

APCC MME FORECAST TABLE

201903		TEMP			PREC		
		03	04	05	03	04	05
Forecast	SCM ANO(NNR)	0.97[0.24]	0.56[0.17]	0.59[0.15]	13.23[3.62]	9.90[3.14]	-13.12[2.62]
	PMME(B/N/A)	06/26/67	15/28/57	17/29/54	24/31/45	30/32/38	39/34/27
TCC	OBS vs SCM	0.63*	0.29	0.32*	0.09	0.22	0.10
ROC(B/N/A)	OBS vs PMME	0.79/0.66/0.92	0.60/0.53/0.71	0.63/0.62/0.64	0.75/0.56/0.45	0.65/0.51/0.60	0.46/0.47/0.48
HSS	OBS vs PMME	0.29*	0.20*	0.13*	-0.00	0.00	-0.04
Trend	OBS	1.63*	0.64	1.20*	-6.49	25.00	-8.15
	SCM T850	0.83*	0.80*	0.90*	-1.71	6.30	6.23
Cor TvsP	OBS	0.12	0.23	-0.15	0.12	0.23	-0.15
	SCM	0.49*	0.59*	0.05	0.49*	0.59*	0.05
NINO3.4	C:OBS/SCM	0.06/0.13	0.05/0.01	-0.31/-0.36*	0.04/0.08	0.49*/0.42*	0.06/0.05
	TCC/ANO	0.98*/1.03*	0.94*/0.75*	0.92*/0.42*	0.98*/1.03*	0.94*/0.75*	0.92*/0.42*
WPC	C:OBS/SCM				-0.19/-0.10	-0.41*/-0.43*	-0.16/0.00
	TCC/ANO				0.68*/2.29	0.85*/2.18	0.24/0.27
	Total Forecast						

NN
 EC
 COLD
 WARM
 WARNING
 DRY
 WET

*:Significnat at 90% level, Above/Below 0.43sigma [1983-2010] Glob OBS.: OISSTv.2, CAMS-OP1
 SCM: Simple Composite Mean MME
 NNR: Near Normal Range (0.43sigma) [1983-2010]
 TCC: Temporal Correlation Coefficient [1983-2010]
 Linear Trend T & P [1983-2017]
 Correlation T vs P [1983-2017]
 C:OBS/SCM: TCC between OBS/SCM index & Korean T/P
 TCC/ANO: TCC between OBS index & SCM index / Forecasted Anomaly
 NINO 3.4 index [190E-240E, 5S-5N]
 Western Pacific Convection area M4 [110E-180E, 00S-20N]

Figure 116. APCC MME forecast table for Mar-May 2019. Issued in Feb 2019.

예보 분석표의 큰 틀은 본 과제 1-2차 년도에서의 내용과 크게 다르지 않다. 먼저 APCC MME의 Deterministic MME (DMME), Probabilistic MME (PMME) 한반도 온도, 강수 예측 정보를 표시하고, 이들의 예측 스킬 Temporal Correlation Coefficient (TCC), Relative Operation Characteristic (ROC)을 보여준다. 다만 MME의 hindcast 기간이 2016-2017년에는 1983-2005년, 23년으로 고정되어 있었으나 2018년 11월부터 hindcast 기간이 확장됨에 따라 이를 반영하여 매월 생산되는 hindcast를 이용하도록 수정하였다. 2019년에는 주로 hindcast 기간이 1983-2010으로 28년으로 확장되었다.

올해 과제에서는 PMME 예측 스킬 중 하나인 Heidke Skill Score (HSS)를 추가하여 TCC 스킬과 비교해보고자 한다. HSS는 가장 높은 확률로 예측되는 카테고리를 맞추었을 때(1점),

혹은 동물의 확률로 예측된 카테고리를 맞추었을 때(0.5점) 점수를 주어 횡수별 승률을 추적하여 점수화 시킨다. 이 때 전체 예측횡수를 고려하고 우연히 예측이 맞은 경우를 제외하여 점수를 산정하며 0 이하이면 예측은 의미가 없고, 항상 예측이 맞은 경우는 1이 된다.

Table 17. TCC and HSS hindcast forecast skill for temperature/precipitation of South Korea for different lead times. Hindcast period is 1983-2005 for Jan-Oct and 1983-2010 for Nov-Dec. Red shading indicates 90% confidence level in TCC and positive value in HSS.

T2m		1	2	3	4	5	6
TCC	1-mon-lead	0.62*	0.47*	0.59*	0.45*	-0.02	0.21
	2-mon-lead	0.22	0.50*	0.35*	0.28	0.06	0.15
	3-mon-lead	0.20	0.24	0.51*	0.25	0.19	0.21
HSS	1-mon-lead	0.08*	0.09*	0.24*	0.36*	-0.11	0.20*
	2-mon-lead	-0.02	0.07*	0.08*	0.21*	-0.08	-0.03
	3-mon-lead	-0.01	0.07*	0.26*	0.21*	-0.01	0.18*
PREC		1	2	3	4	5	6
TCC	1-mon-lead	0.28	-0.05	0.03	0.37*	-0.02	0.08
	2-mon-lead	-0.06	-0.13	0.27	0.37*	0.15	-0.10
	3-mon-lead	0.19	0.16	0.01	0.01	-0.04	0.05
HSS	1-mon-lead	0.05*	0.03*	0.01*	0.02*	-0.09	-0.10
	2-mon-lead	-0.05	0.08*	-0.02	0.06*	-0.08	-0.10
	3-mon-lead	-0.02	0.03*	-0.03	-0.10	-0.02	-0.09
T2m		7	8	9	10	11	12
TCC	1-mon-lead	0.13	0.27	0.41*	0.35	0.33*	0.39*
	2-mon-lead	0.18	0.07	0.48*	0.19	0.11	0.30
	3-mon-lead	0.17	0.05	0.60*	0.20	0.20	0.24
HSS	1-mon-lead	0.04*	-0.08	0.05*	0.02*	0.04*	-0.01
	2-mon-lead	0.13*	-0.24	0.17*	-0.01	0.21*	0.15*
	3-mon-lead	0.17*	-0.12	0.26*	0.10*	0.28*	0.16*
PREC		7	8	9	10	11	12
TCC	1-mon-lead	-0.04	0.06	0.46*	0.00	0.48*	0.38*
	2-mon-lead	0.15	-0.11	0.47*	-0.07	0.43*	0.40*
	3-mon-lead	-0.20	0.17	0.55*	-0.21	0.40*	0.65*
HSS	1-mon-lead	-0.08	-0.12	0.14*	-0.14	0.01*	0.07*
	2-mon-lead	-0.15	-0.09	0.11*	-0.10	0.06*	-0.03
	3-mon-lead	-0.08	-0.04	-0.04	-0.08	0.07*	0.21*

2018년 hindcast 자료를 이용하여 월별로 TCC와 HSS를 Table 17에 정리하였다. 월별로 살펴보면 HSS가 TCC보다 유의미한 경우가 더 많긴 하지만 대체적으로 TCC가 유의미할 때는 HSS 또한 양수로, 유의미하다. 따라서 월별 예측의 신빙성은 결정론적 예보나 확률론적 예보나 비슷하나 확률론적 예보가 다소 더 신뢰할 만하다. 월별로 살펴보았을 때 특히 4월, 9월의 예측성이 탁월하다. 1-mon-lead의 기준으로 온도의 경우, 1-4월, 9월, 11-12월에 어느 정도 유의미한 예측스킬이 나타난다. 강수의 경우는, 4월, 9월, 11-12월에 어느 정도 유의미한 예측스킬이 나타나 온도 보다는 상대적으로 예측성이 유의미한 달이 적다.

(2) 4월 서태평양 대류활동과 우리나라 강수 상관관계

지난 2017년에 우리나라 월별 강수에 영향을 주는 서태평양 대류활동을 제시한 이래로 관련성이 뚜렷한 달에는 그에 대한 자료를 계절예보에 제공하고 있다. 여기서는 서태평양 대류활동에 의한 순환장을 가능하기 위해 강수를 활용한다. 2018년에는 이 중 특히 관련성이 뚜렷한 9월 서태평양 순환장과 우리나라 강수와의 상관성을 개별모델별, GloSea5를 바탕으로 정리하고 이에 대한 역학을 정리하였다. 2019년에는 이에 더해 4, 11, 12월에 서태평양 대류활동과 우리나라 강수의 선형관계에 대해 정리하고 역학을 밝히고자 한다.

(가) 한 달 선행 계절예보 (4월)

① 4월 우리나라 강수 직접 예측과 기후인자를 고려한 간접 예측

4월 우리나라 강수와 선형관계가 높게 나타나는 서태평양 강수 지역은 [110E° -180° E, 0° -20° N]이다. 우리나라와 강수와 서태평양 강수 지역 실제 관측장(CAMS-OPD)의 상관관계는 -0.41로 유의미하였고(1983-2010), APCC MME의 서태평양 강수 지역 상관관계 역시 -0.41로 유의미하였다. 주어진 서태평양 지역 강수의 TCC 예측 스킬은 0.86으로 매우 높다. 2019년 4월 한 달 선행 예측장에서 이 지역 강수량은 -7.93 mm/mon로 평년 비슷 수준으로 (0.43σ 이내) 예측되어 예측값과 우리나라 강수와의 반상관관계(-0.41)를 고려하면, 우리나라 강수는 평년 비슷 수준일 것이라 할 수 있다. 이러한 내용은 2019년 4월 예보 분석표로 제공하였다 (Figure 117).

우리나라 강수에 대한 직접적인 예측은 결정론적 예보의 경우 평년 비슷 수준, 확률 예보의 경우 Equal Chance이다. 또한 4월 우리나라 강수는 Niño 3.4 지수와 양의 상관관계가 있다고 알려져 있는데, 실제로 관측에서는 0.49, MME 모델에서는 0.39의 유의미한 상관관계가 나타난다. Niño 3.4 지수에 대한 APCC MME의 TCC 예측 스킬은 0.91로 매우 높은데, 4월 Niño 3.4 지수 예측값은 0.78로 평년보다 많다고 나타나 Niño 3.4 지수로 우리나라 강수를 간접 예측하면, 평년보다 많을 확률이 높다고 할 수 있다. 따라서 우리나라 강수에 대한 직접적인 예측 뿐 아니라 Niño 3.4 지수, 서태평양 대류활동 지수 등 여러 기후인자들을 활용하여 좀 더 다양한 예측 정보를 얻을 수 있다.

APCC MME FORECAST TABLE

201904		TEMP			PREC		
		04	05	06	04	05	06
Forecast	SCM ANO(NNR)	0.68[0.22]	0.55[0.19]	0.51[0.18]	3.94[4.26]	3.72[3.77]	-14.37[3.04]
	PMME(B/N/A)	11/27/62	15/25/60	17/30/53	30/34/36	28/34/38	39/37/24
TCC	OBS vs SCM	0.41*	0.20	0.17	0.22	-0.02	-0.18
ROC(B/N/A)	OBS vs PMME	0.71/0.68/0.71	0.67/0.46/0.63	0.56/0.57/0.74	0.55/0.49/0.61	0.47/0.47/0.48	0.56/0.47/0.31
HSS	OBS vs PMME	0.25*	0.06*	0.12*	0.06*	-0.18	-0.04
Trend	OBS	0.64	1.20*	1.23*	25.00	-8.15	-77.29*
	SCM T850	1.14*	1.11*	1.00*	2.16	8.97*	-0.47
Cor TvsP	OBS	0.23	-0.15	-0.22	0.23	-0.15	-0.22
	SCM	0.56*	0.30*	0.06	0.56*	0.30*	0.06
NINO3.4	C:OBS/SCM	0.05/0.02	-0.31/-0.28	-0.05/-0.00	0.49*/0.39*	0.06/0.10	-0.15/0.04
	TCC/ANO	0.91*/0.78*	0.91*/0.35*	0.86*/-0.06	0.91*/0.78*	0.91*/0.35*	0.86*/-0.06
WPC	C:OBS/SCM				-0.41*/-0.41*	-0.16/-0.06	0.34*/0.03
	TCC/ANO				0.86*/-7.93	0.52*/-12.26*	0.37*/-9.46*
Total							
Forecast							

NN EC COLD WARM WARNING DRY WET
 *:Significant at 90% level, Above/Below 0.43sigma [1983-2010] Glob OBS.: OISSTv2, CAMS-OP1
 SCM: Simple Composite Mean MME
 NNR: Near Normal Range (0.43sigma) [1983-2010]
 TCC: Temporal Correlation Coefficient [1983-2010]
 Linear Trend T & P [1983-2017]
 Correlation T vs P [1983-2017]
 C:OBS/SCM: TCC between OBS/SCM index & Korean T/P
 TCC/ANO: TCC between OBS index & SCM index / Forecasted Anomaly
 NINO 3.4 index [190E-240E, 5S-5N]
 Western Pacific Convection area M4 [110E-180E, 00S-20N]

Figure 117. APCC MME forecast table for Apr-Jun 2019. An asterisk indicates significance at 90% level or above/below the climatological value.

Figure 118은 APCC MME 2019년 4월 강수 예측장이다. 한 달 선행 4월 APCC MME 예측장에서는 서태평양 지역에서는 건조 신호가, 열대 중태평양에서는 습윤 신호가 예측된다. 이는 엘니뇨가 예측되면서 이에 대한 대기 반응으로 해석할 수 있다. 하지만 서태평양 건조 신호가 유의미하게 강하지 않게 예측되기 때문에, 서태평양 기후인자를 이용하면 우리나라 강수는 평년 수준일 확률이 높다. 이를 요약한 것이 Figure 117의 예보표이다.

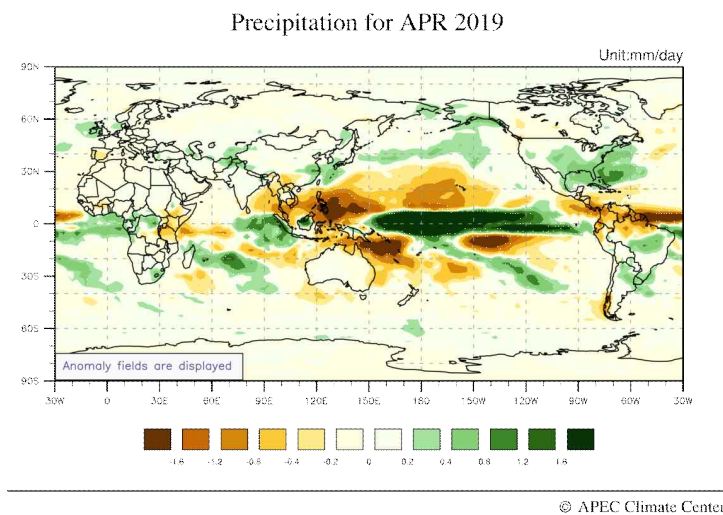


Figure 118. 1-month lead APCC MME precipitation forecast for Apr 2019.

② 4월 APCC MME 및 개별 모델 강수 예측 스킬

4월 서태평양 지역 대류활동과 우리나라 강수가 높은 상관관계를 가진다고 밝혀진 바, 우리나라 강수 예측 스킬, 서태평양 지역 강수의 예측 스킬, 상관관계 등을 APCC MME, 개별 모델, GloSea5를 적용하여 계산하였다. 예측 스킬은 TCC와 Pattern Correlation Coefficient (PCC)를 함께 계산하였다. Figure 119는 2019년 4월 한 달 선행 강수 예측 스킬 표로, 우리나라(KOR), 동아시아(EA) 지역 [110° E-150° E, 25° N-50° N], 서태평양(WP) 지역에서 APCC MME, GloSea5, SCoPs, 그리고 GloSea5와 SCoPs를 제외한 APCC MME 개별 모델 중 가장 높은 값이 나오는 best 모델의 TCC, PCC를 계산하였다. 우리나라 강수와 서태평양 지역 강수(K/WP)의 선형관계(Relationship) 또한 5번째 줄에 명시하였다. 여기서 전구 강수 관측 자료로 사용한 것은 GPCP v.2로, Figure 117에서는 CAMS-OPI가 사용된 것과 다르다. 90% 수준에서 유의미한 경우 *를 표시했다.

[201904 L1] Prec. Forecast Skill Table

		GPCP	MME	GLOSEA	SCoPS	BEST	name
KOR	TCC	0.99*	0.22	0.57*	0.23	0.49*	NCEP
EA	PCC		0.17*	0.19*	0.12*	0.24*	POAMA
EA	TCC		0.16	0.17	0.14	0.16	MSC
K/WP	R	-0.28	-0.41*	-0.40*	-0.43*	-0.43*	JMA
WP	PCC		0.56*	0.08	0.37*	0.51*	POAMA
WP	TCC		0.52*	0.40*	0.37	0.48*	POAMA

*:Significant at 90% level

Western Pacific Convection Area [110E-180E, 0N-20N]

KOR: Korea, EA: East Asia, WP: Western Pacific

TCC: Temporal Corr. Coeff., PCC: Pattern Corr. Coeff., R: Relationship (TCC)

Figure 119. 1-month lead precipitation forecast skill table for Apr 2019. An asterisk indicates significance at 90% level.

우리나라 강수의 예측 스킬은 APCC MME를 비롯하여 개별 모델들이 유의미한 수준이다. 특히 GloSea5의 TCC 예측 스킬이 0.57로 매우 높고, APCC MME 개별 모델 중 NCEP 모델이 0.49의 높은 상관관계를 보여 4월의 경우 우리나라 강수의 직접 예측 정보도 어느 정도 신뢰성이 있다. 다만 우리나라 강수는 격자 2개만 사용하기 때문에 이 격자에 대한 TCC 예측 스킬로 모델의 우리나라 강수에 대한 신뢰성을 판별하는 것은 한계가 있다고 판단되어 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 예측 스킬을 판별하였는데, 동아시아 지역의 예측 스킬은 유의미하게 높지 않았다. 동아시아 지역은 우리나라 강수 변동성과 상관관계가 높은 [110° E-150° E, 25° N-50° N]로 선정한다. 동아시아 지역은 전 월 동일하다.

③ 4월 서태평양 지역 강수 기후인자의 역학적 배경

모델 및 실제 서태평양 지역 강수와 우리나라 강수와의 상관관계는 Figure 120의 상관관계 지도를 통해 명확하게 알 수 있다. 실제 관측 강수자료(GPCP v.2)와 우리나라 강수와의 상관관계 지도에서는 동아시아 지역과 우리나라 강수의 상관관계가 뚜렷하게 나타나나, APCC MME와 GloSea5 역학모델에서는 상관관계가 다소 약하다. 서태평양 지역 강수와의 반상관관계는 역학모델에서도 모의하나 다소 과대 모의하는 경향이 있다. 특히 대부분의 역학모델에서 180° E 부근의 중태평양 열대-중위도 부근에서 건조-습윤 패턴이 나타나는데, 이는 관측에서는 유의미하지 않다. 즉, 모델의 편향이 있는 것으로 파악된다. GloSea5는 이에 더해 벵갈만과 Maritime Continent에서 건조 패턴이 관측에 비해 과하게 나타나는 편향이 있다.

CORR PRCP. KOREA vs. W. Pacific APR L1

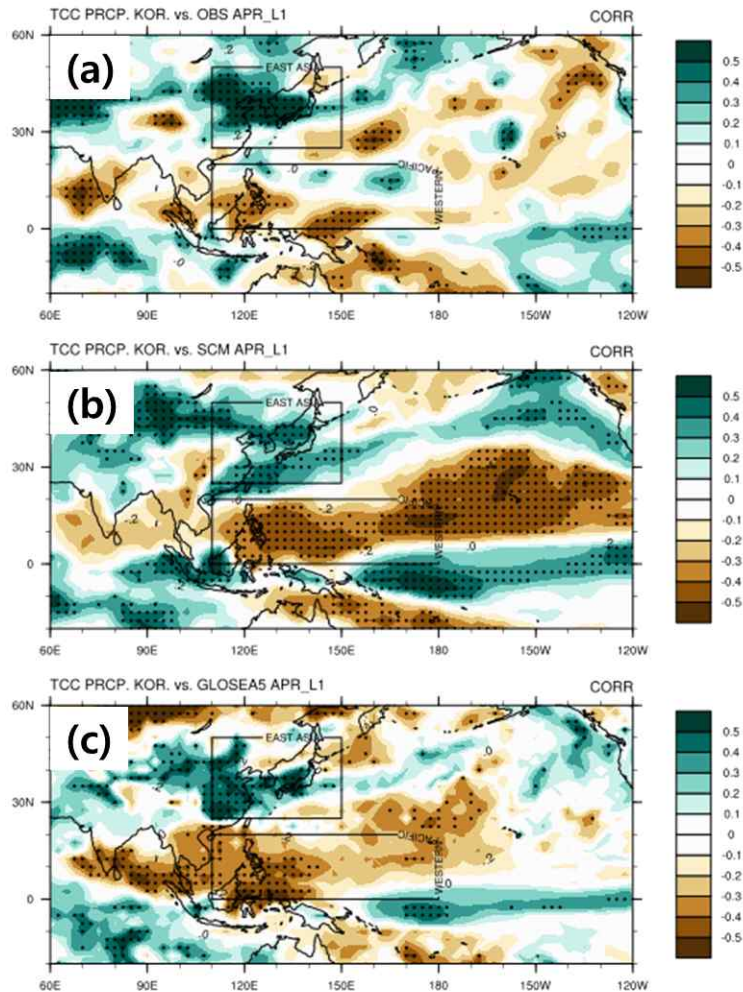


Figure 120. Correlation maps for the (a) GPCPv.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 precipitation on the South Korea precipitation in Apr. Box area indicate East Asia [110° E-150° E, 25° N-50° N] and western Pacific [110° E-180° E, 0° N-20° N] region.

해수면 온도와 순환장은 열대/아열대 지역 대류활동, 강수를 설명할 수 있는 중요한 인자이다. 해수면 온도 상관관계 패턴 (Figure 121)과 850-hPa 바람장 상관관계 패턴 (Figure 122), 500-hPa 지위고도와 200-hPa 바람장 상관관계 패턴 (Figure 123)을 보면, 열대 서태평양의 해수면 온도 냉각화는 이 지역 하층 동풍의 강화와 연관 있다(평균류 동풍). 이로 인해 하층 바람장이 발산하고, 대류활동의 억제, 건조 지역이 발생하는 것을 설명할 수 있다. 상층에서는 서태평양 열대지역에서 서풍이 발달, 이의 북서쪽에 저기압성 순환이 발생, 중위도에서 다시 고기압성 순환이 발생하는 Gill-type 반응으로 한국은 동남쪽 고기압성 순환의 영향으로 습윤 온난한 남풍의 영향을 받는다.

관측과 모델 모두 이와 같은 역학을 보여주나, 모델에서는 열대 지역 동풍의 강화를 좀 더 강하게 모의하는 경향이 있는데, 이는 실제보다 건조 패턴이 강하게 모의되는 경향을 설명할 수 있다. 특히 중위도 북태평양에서 해수면 온도는 실제와 유사하게 모의하나, 해수면

온도-바람장의 상관관계를 실제보다 과하게 모의하는 경향이 있다 보니, 강수 패턴에서도 북태평양 중위도의 건조패턴을 과하게 모의하는 경향을 보여준다. 상층에서는 북서태평양 중위도까지의 바람장은 모델과 실체가 상당히 유사하나 중태평양에서의 기압계 패턴이나 바람장은 모델에서 유사하게 모의하지 못해 괴리감이 있다.

모델 상층장의 편향에도 불구하고 하층 순환장과 해수면 온도는 관측과 유사하여, 열대/아열대 서태평양 지역에서 동풍이 강화되면서 Maritime Continent, 남동아시아 지역에서는 고기압성 순환이 나타나고, 중위도 동아시아에서는 습윤한 남풍이 강화되어 강수 밴드가 형성되고 한국은 강수가 증가하는 패턴은 잘 모의한다.

기상청 기후 모델인 GloSea5는 중위도 북태평양에서 해수면온도의 냉각화를 다른 모델들에 비해 약하게 모의하는데, 이는 북태평양 순환장이 약하게 모의되는 것과 연관 있다. 북태평양 지역에서와는 달리, GloSea5 모델은 인도양에서의 강수, 순환장, 해수면 온도와 우리나라 강수의 상관관계를 강하게 모의하는 경향이 있는데, 이는 우리나라 강수의 예측성 향상에도 영향을 끼치는 것으로 보인다. GloSea5는 비록 동아시아 전체적으로는 강수 예측성이 다른 모델들에 비해 낮지만, 우리나라 강수의 예측성은 다른 모델들에 비해 우수하다. 따라서 역학 모델이 4월 우리나라 강수를 예측하는데 있어 인도양 지역이 중요한 역할을 하는 것으로 보인다.

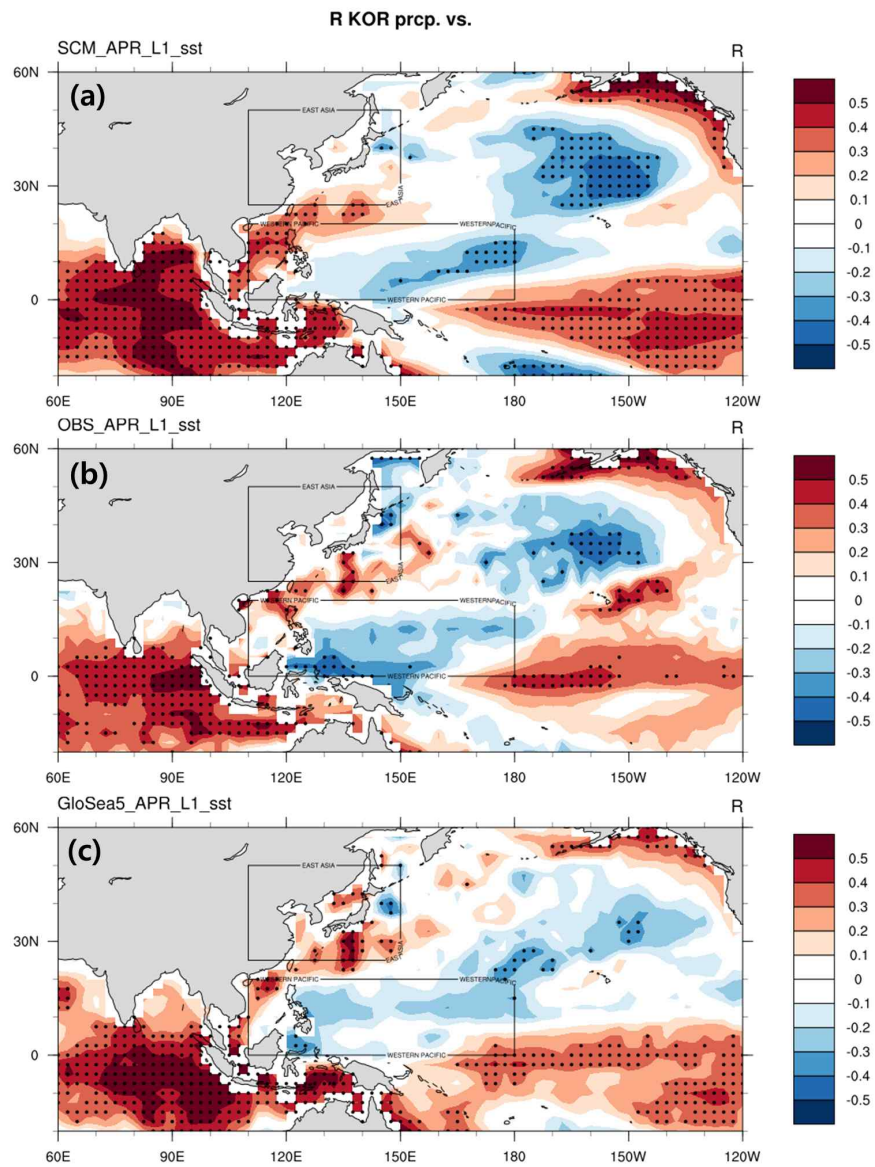


Figure 121. Correlation maps for the (a) NOAA OISST v.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 sea surface temperature on the South Korea precipitation in Apr.

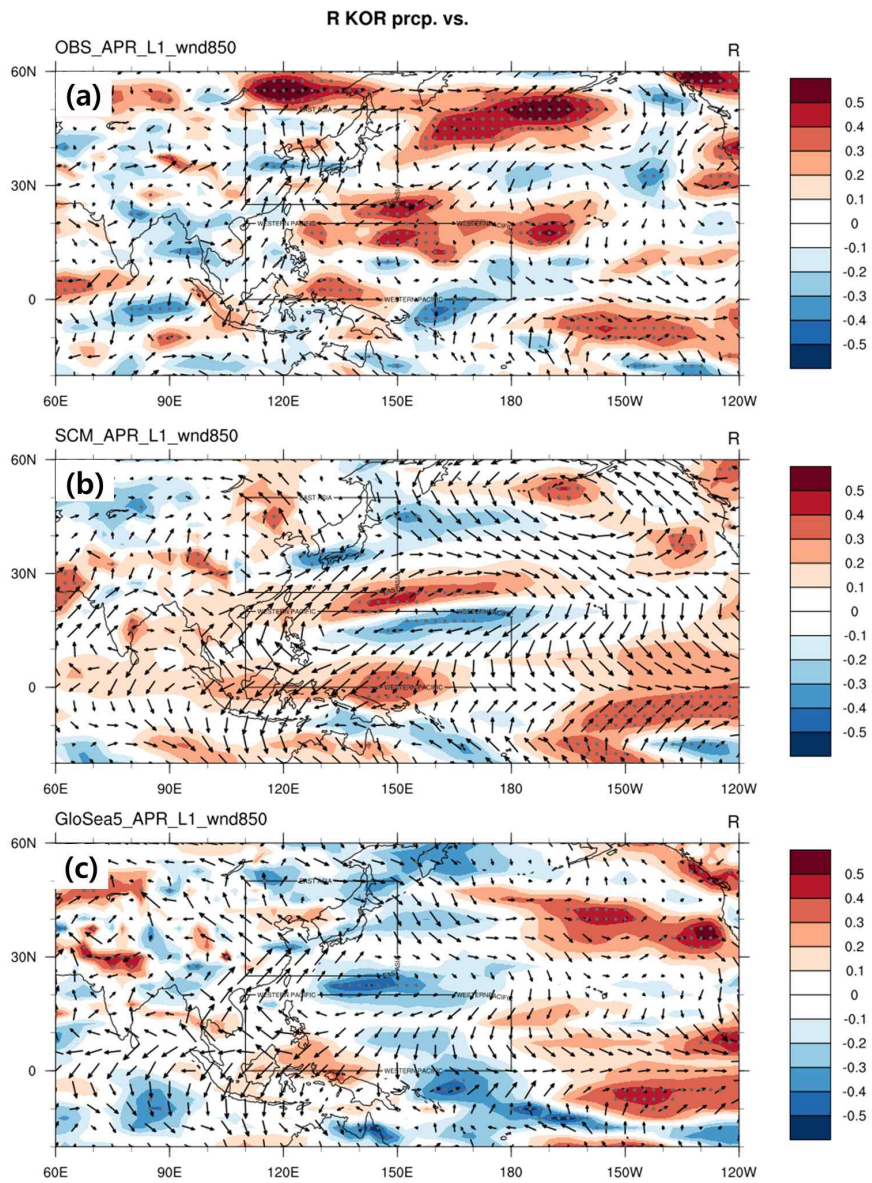


Figure 122. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 850hPa wind (vector) and wind speed (shading) on the South Korea precipitation in Apr.

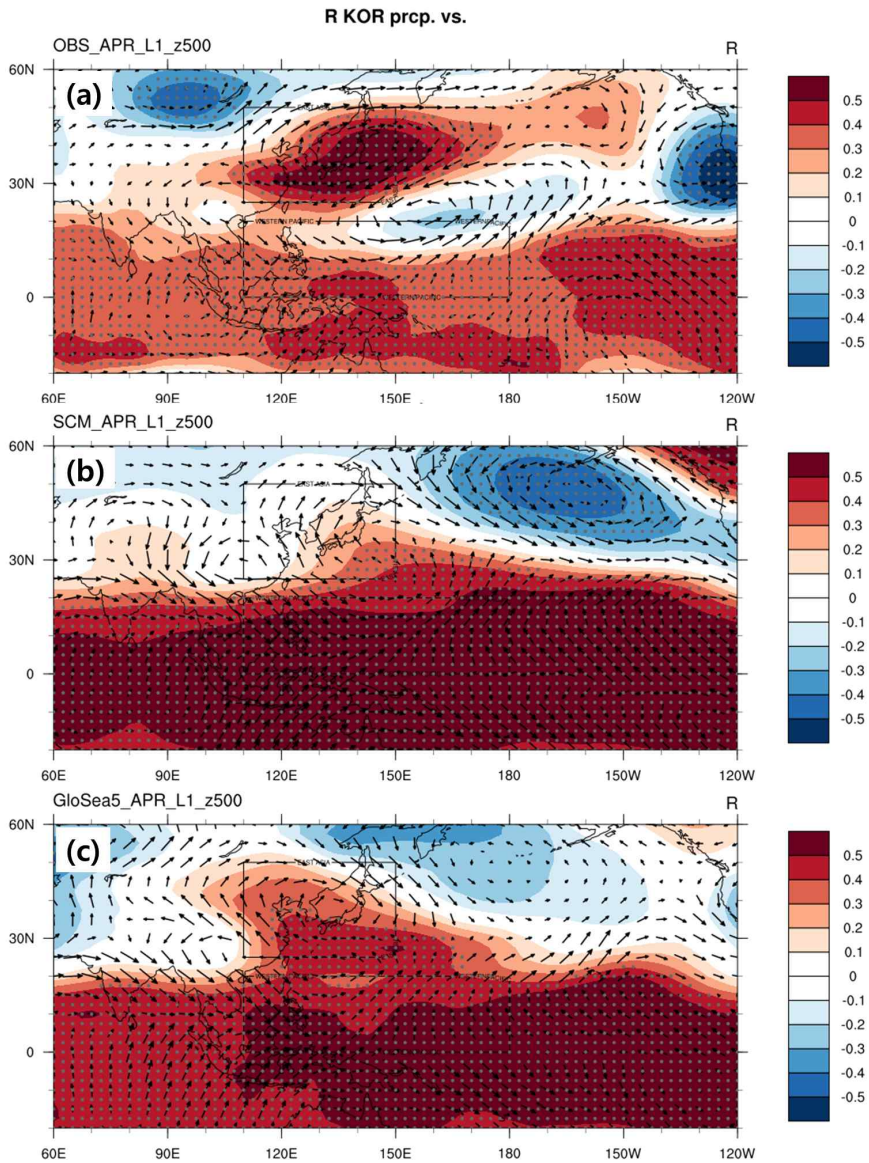


Figure 123. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 500hPa geopotential height (shading) and 200hPa wind (vector) on the South Korea precipitation in Apr.

④ Best model

4월 서태평양 지역 강수의 예측성은 MME가 가장 좋지만, 개별 모델 중에서는 POAMA가 우수하다(TCC=0.48). 우리나라 강수와 상관계 지도를 보면 (Figure 124), 열대 태평양 지역, 중위도 동태평양 지역에서의 해수면 온도와 순환장이 관측장과 상당히 유사하다. 특히 해수면 온도의 패턴은 거의 관측과 비슷하다는 것을 볼 수 있다. 하지만 인도양에서의 순환장을 관측과는 다르게 모의하고, 이로 인해 한반도 근처의 순환장이 상당히 괴리가 생기는 것을 볼 수 있다. 우리나라 근처에서는 상층 고기압과 남풍의 영향을 받는데, POAMA는 이와 반대로

상층 저기압과 북서풍이 발달할 때 우리나라 강수가 많다.

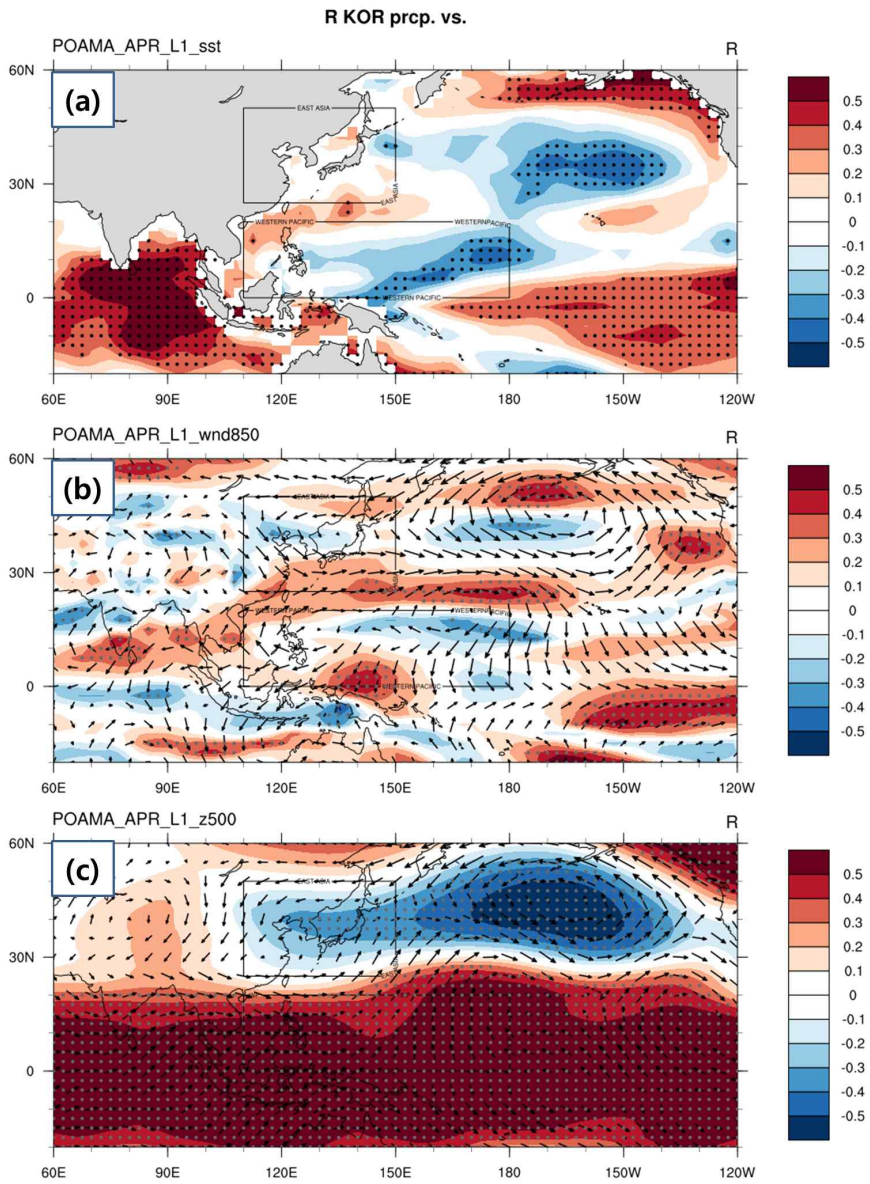


Figure 124. Correlation maps for the (a) SST, (b) 850hPa wind (vector) and wind speed (shading), (c) 200hPa wind (vector) and 500hPa geopotential height (shading) in POAMA model on the South Korea precipitation in Apr.

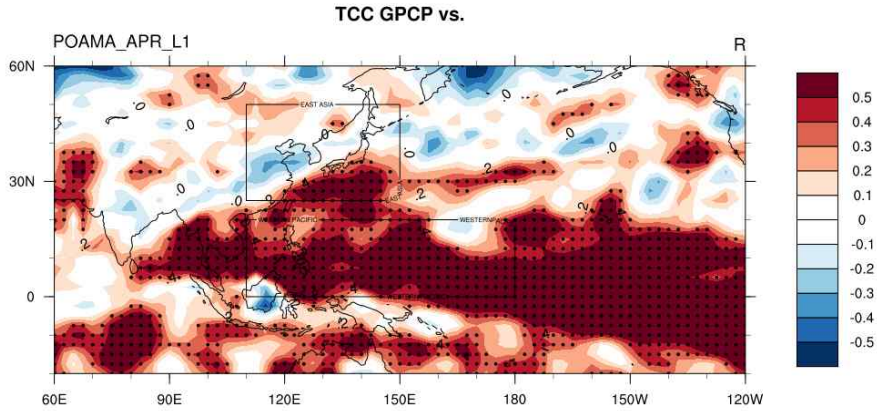


Figure 125. TCC skill map of POAMA compared with GPCP v.2 in Apr.

이와 같은 중위도 동아시아 지역에서의 차이점에도 불구하고, POAMA의 전반적인 예측 스킬은 상당히 우수하다. Figure 125의 TCC 스킬 지도에서 아열대/열대 서태평양과 동태평양 전반적으로 예측 스킬이 높고, 동아시아에서도 일본 남부 지역에서는 예측 스킬이 상당히 우수하다. 다만 중국 동부와 한반도 지역에서는 예측 스킬이 유의미하지 않은 패턴을 보인다.

우리나라 예측 스킬이 우수하였던 GloSea5와 서태평양 지역에서 예측 스킬이 우수하였던 POAMA를 비교해 볼 때 4월 우리나라 강수 예측성은 특히 인도양에서의 순환장 예측이 중요한 역할을 하는 것을 볼 수 있다. 이에 대해서는 추후 분석이 더 필요한 것으로 보인다.

(나) 4월 검증 (직접 예측과 간접 예측 비교)

2019년 4월 우리나라 누적 강수는 79.3 mm/mon로 57.7 percentile을 기록하여 평년 수준이었다 (Figure 126).

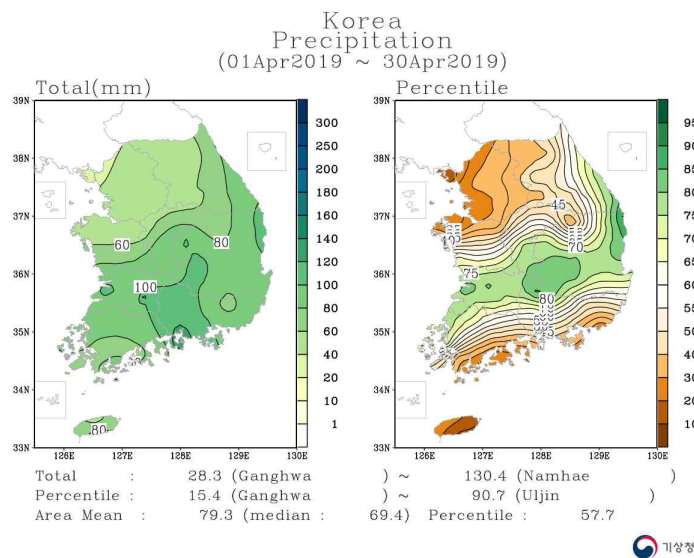


Figure 126. Distributions of total precipitation and precipitation percentile in Apr 2019.

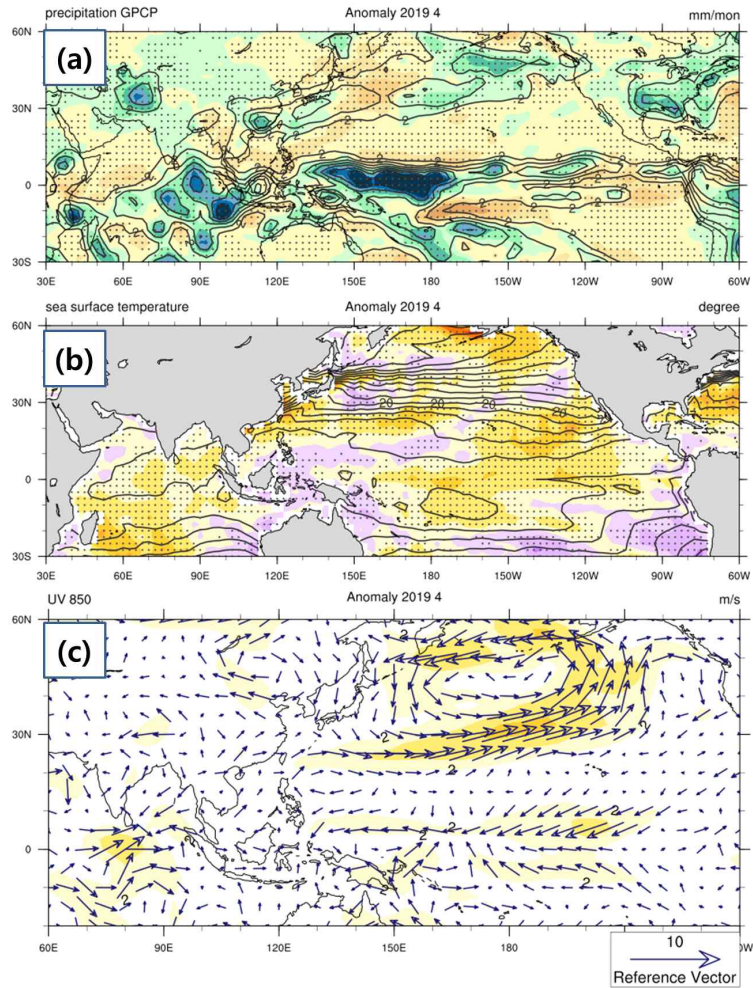


Figure 127. Distributions of (a) GPCP v.2 total (contour) and anomalous (shading) precipitation, (b) NOAA OISST v.2 total (contour) and anomalous (shading) SST, (c) NCEP R2 850hPa wind anomalies (vector) and wind speed anomalies (shading) in Apr 2019. Climatological period is 1983-2010.

Figure 127은 실제 2019년 여러 변수들의 편차장이다. 전지구 강수 분포도에서 2019년 4월 우리나라에 평년 비슷 수준의 강수가 발생하였고 서태평양 지역은 열대-중위도에서 습윤-건조 패턴이 유의미하게 나타났다. 서태평양 기후인자로 쓰인 $[110^{\circ} \text{ E}-180^{\circ} \text{ E}, 0^{\circ} -20^{\circ} \text{ N}]$ 지역에서의 강수는 17.1 mm/month 편차로, 평년 비슷(± 27.3 이내) 범위이다. 따라서 4월 APCC MME에 의한 한반도에 대한 직접예측(평년 비슷)과 서태평양 기후인자에 의한 간접예측(평년 비슷) 모두 맞았다. 다만, 엘니뇨가 모델 예측과 같이 강하지 않아서 Niño 3.4 index는 0.61° C 였는데, 이는 평년 비슷 이내(0.76° C)여서, APCC MME의 예측(0.78° C , 평년 비슷)이 틀리고, 따라서 이에 의한 ENSO와의 상관관계($CC=0.39^*$)를 이용한 우리나라 강수 간접 예측이 맞지 않았다. 우리나라 강수에 대한 3분위 예측과 검증은 다음 Table 18에 정리하였다. 열대 서태평양의 순환장, 동태평양의 ENSO 관련된 패턴이 활성화되지 않으면서 중위도 한반도 근처에서는 북동풍이 우세하였고, 이로 인해 우리나라 강수는 발달하지 않아 평년 비슷 수준이 되었다.

Table 18. Forecast and verification of South Korea precipitation in Apr 2019. AN, NN, and BN indicate Above Normal, Near Normal, and Below Normal.

	Index forecast	Correlation	Forecast for Korea	Observation		
Korea grid	3.94(NN)			79.3(NN)	correct	
Climate index	Nino 3.4 index	0.78(AN)	0.39*	AN	0.61(NN)	incorrect
	Western Pacific convection index	-7.93(NN)	-0.41*	NN	17.1(NN)	correct

(3) 11월 서태평양 대류활동과 우리나라 강수 상관관계

(가) 한 달 선행 계절예보 (11월)

① 11월 우리나라 강수 직접 예측과 기후인자 고려한 간접 예측

11월 우리나라 강수와 선형관계가 높게 나타나는 서태평양 강수 지역은 [70° E-150° E, 20° S-20° N]이다. 인도양 일부 부분까지 포함하는 상당히 광범위한 지역이다. 우리나라 11월 강수와 주어진 서태평양 지역 강수 실제 관측장(CAMS-OPI)의 반상관관계는 -0.68로 상당히 높고(1983-2010), APCC MME의 강수와의 반상관관계도 -0.42로 유의미하다. 주어진 서태평양 지역 강수 TCC 예측 스킬은 0.80으로 상당히 높다. 2018년 11월 이 지역 강수 예측은 -13.96 mm/mon으로, 평년보다 높게 예측되었고, 예측값과 우리나라 강수와의 반상관관계(-0.42)를 고려하면, 우리나라 강수는 평년보다 많을 것이라고 예측할 수 있다. 이러한 내용은 2018년 11월 예보 분석표로 제공하였다 (Figure 128).

우리나라 강수의 직접적인 예측은 결정론적 예보의 경우 평년 비슷 수준, 확률 예보의 경우 Equal Chance이다. 11월 우리나라 강수는 ENSO와 유의미한 상관관계가 있는데, 관측의 Niño 3.4 지수와 0.53, 모델 예측장의 Niño 3.4 지수와는 0.55의 상관관계가 있다. 2018년 11월 Niño 3.4 지수는 0.99(평년보다 높음)예측되어 ENSO와의 상관관계를 통해 우리나라 강수를 간접 예측하면 평년보다 많을 확률이 높다.

APCC MME FORECAST TABLE

201811		TEMP			PREC		
		11	12	01	11	12	01
Forecast	SCM ANO[NNR]	0.48[0.17]	0.35[0.15]	0.57[0.12]	0.24[3.69]	2.90[2.86]	1.61[1.90]
	PMME(B/N/A)	23/30/47	23/32/45	21/30/50	34/37/30	29/33/38	28/35/36
TCC	OBS vs SCM	0.33*	0.30	0.20	0.48*	0.40*	0.19
ROC(B/N/A)	OBS vs PMME	0.70/0.46/0.73	0.56/0.51/0.61	0.56/0.48/0.56	0.67/0.55/0.62	0.67/0.55/0.76	0.49/0.50/0.54
HSS	OBS vs PMME	0.04*	0.15*	-0.01	0.01	-0.03	-0.02
Trend	OBS[utd]	0.64[1.22]	0.32[-0.04]	1.63*[0.83]	-18.86[2.85]	0.97[13.15]	-2.81[-10.22]
	SCM[utd]	0.79*[1.10*]	0.71*[0.91*]	0.42*[0.74*]	-2.90[-4.21]	3.98[2.49]	0.88[4.55*]
Cor TvsP	OBS[utd]	0.53*[0.57*]	0.36*[0.22]	0.43*[0.41*]	0.53*[0.57*]	0.36*[0.22]	0.43*[0.41*]
	SCM[utd]	0.41*[0.30*]	0.56*[0.49*]	0.43*[0.54*]	0.41*[0.30*]	0.56*[0.49*]	0.43*[0.54*]
NINO3.4	C:OBS/SCM	0.30/0.27	0.31/0.32*	0.08/-0.07	0.53*/0.55*	0.50*/0.55*	-0.25/0.10
	TCC/ANO	0.99*/0.99*	0.98*/1.04*	-0.35*/1.04*	0.99*/0.99*	0.98*/1.04*	-0.35*/1.04*
WPC	C:OBS/SCM				-0.68*/-0.42*	-0.63*/-0.61*	-0.00/0.18
	TCC/ANO				0.80*/-13.96*	0.75*/-7.47*	-0.29/-12.88*
Total Forecast							

NN EC COLD WARM WARNING DRY WET
 *:Significant at 90% level, Above/Below 0.43sigma [1983-2010] Glob OBS.: OISSTv.2, CAMS-OPI
 SCM: Simple Composite Mean MME
 NNR: Near Normal Range (0.43sigma) [1983-2010]
 TCC: Temporal Correlation Coefficient [1983-2010]
 Linear Trend T850 & P [1983-2010] / up-to-date [1983-2016]
 Correlation T850 vs P [1983-2010] / up-to-date [1983-2016]
 C:OBS/SCM: TCC between OBS/SCM index & Korean T/P
 TCC/ANO: TCC between OBS index & SCM index / Forecasted Anomaly
 NINO 3.4 index [190E-240E, 5S-5N]
 Western Pacific Convection area M11 [70E-150E, 20S-20N] M12 [70E-160E, 20S-20N]

Figure 128. APCC MME forecast table for Nov-Jan 2018/2019. An asterisk indicates significance at 90% level or above/below the climatological value.

다음 Figure 129는 APCC MME 2018년 11월 강수 예측장이다. 예측장에서는 서태평양 지역에서는 건조 신호가, 열대 중태평양에서는 습윤 신호가 예측되어 엘니뇨에 의한 대기반응이 나타난다. 비록 이러한 신호가 평년 비슷 수준을 넘기는 하지만 그다지 강하지는 않기 때문에 서태평양이나 엘니뇨를 이용한 우리나라 강수 예측에서 주의해야 하는 것으로 보인다. 실제로 APCC에서는 이를 고려하여 11월 강수 종합 예보를 평년 비슷 수준으로 발표하였다.

Precipitation for NOV 2018

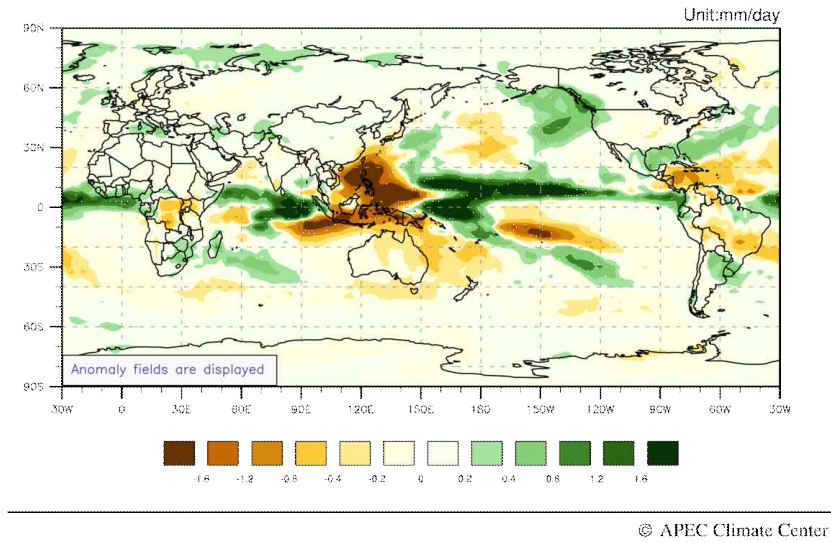


Figure 129. 1-month lead APCC MME precipitation forecast for Nov 2018.

② 11월 APCC MME 및 개별 모델 강수 예측 스킬

11월 서태평양 지역 대류활동과 우리나라 강수가 높은 반상관관계를 가지기에 APCC MME 뿐 아니라 개별모델과 GloSea5의 우리나라 강수 예측 스킬, 동아시아, 서태평양 예측 스킬을 비교하고 서태평양 대류와 우리나라 강수의 상관관계를 비교 분석하였다 (Figure 130). 11월 서태평양(WP) 강수 지역은 [70° E-150° E, 20° S-20° N], 동아시아(EA) 지역은 4월과 같은 [110° E-150° E, 25° N-50° N] 이다.

[201811 L1] Prec. Forecast Skill Table

		GPCP	MME	GLOSEA	SCoPS	BEST	name
KOR	TCC	0.99*	0.48*	0.60*	0.39*	0.54*	CWB
EA	PCC		0.09	0.04	-0.01	0.12*	NCEP
EA	TCC		0.18	0.07	0.08	0.13	JMA
K/WP	R	-0.59*	-0.42*	-0.55*	-0.33*	-0.55*	CWB
WP	PCC		0.31*	-0.07*	0.18*	0.31*	POAMA
WP	TCC		0.38*	0.38*	0.27	0.37*	POAMA

*:Significant at 90% level

Western Pacific Convection Area [70E-150E, 20S-20N]

KOR: Korea, EA: East Asia, WP: Western Pacific

TCC: Temporal Corr. Coeff., PCC: Pattern Corr. Coeff., R: Relationship (TCC)

Figure 130. 1-month lead precipitation forecast skill table for Nov 2018. An asterisk indicates significance at 90% level.

우리나라 강수 예측 스킬은 APCC MME가 0.48로 유의미하고, 이 중 best model은 CWB로, 0.54이다. 이보다 GloSea5의 강수 예측 스킬이 높아서 0.60으로, 이 시기 우리나라 강수의 직접 예측은 어느 정도 신뢰성이 확보된다. 하지만 동아시아 지역의 강수 예측 스킬은 유의미하지 않기 때문에 이에 주의해야 한다. 서태평양 지역 강수와 우리나라 강수의 반상관관계는 관측/모델에서 유의미한데 특히 GloSea5, CWB 모델이 높고, MME는 안정적인 관계를 보인다. 또한 서태평양 지역 강수는 예측 스킬이 우수한데, 특히 POAMA 모델이 좋은 스킬을 보여주고, MME는 안정적 스킬을 보인다.

③ 11월 서태평양 지역 강수 기후인자의 역학적 배경

모델 및 관측에서 우리나라 강수와 서태평양 지역 강수의 상관관계는 다음 Figure 131로 파악할 수 있다. 실제로 열대/아열대 서태평양 지역과 우리나라를 포함한 동아시아 지역 강수는 서로 반상관관계가 있으며 역학 모델에서도 이러한 관계를 대체적으로 잘 모의한다. 이 상관관계는 특히 동태평양에서 나타나는 ENSO 신호와도 상관이 있다(열대 동태평양 습윤 밴드). 모델과 관측을 비교하자면, 모델의 경우 동아시아 강수와 우리나라 강수의 동시상관성을 충분히 모의하지 못하며, 북태평양에서의 건조 신호, 열대 동태평양의 습윤 신호는 과대 모의한다. 즉 ENSO와 우리나라 강수의 상관관계를 과대 모의하는 경향이 있다. GloSea5는 특히 인도양에서의 건조 신호를 다른 역학모델들보다 과대 모의하는 경향이 있다.

CORR PRCP. KOREA vs. W. Pacific NOV L1

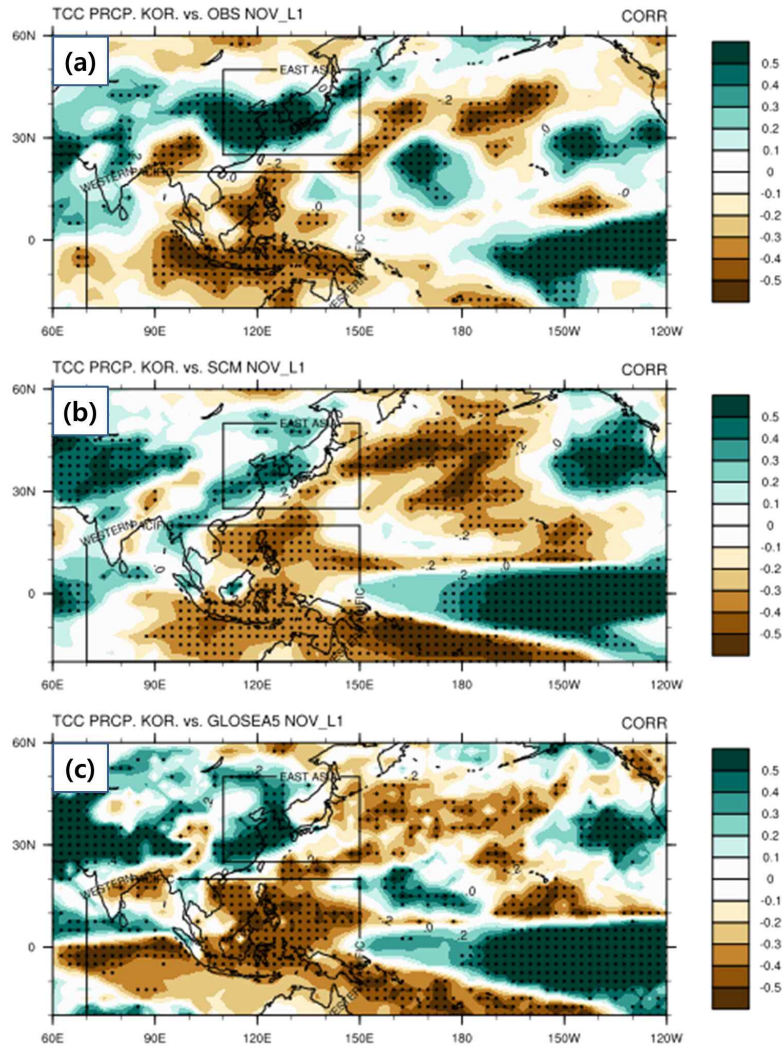


Figure 131. Correlation maps for the (a) GPCPv.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 precipitation on the South Korea precipitation in Nov. Box area indicate East Asia [110° E-150° E, 25° N-50° N] and western Pacific [70° E-150° E, 20° S-20° N] region.

해수면 온도 (Figure 132), 하층(850-hPa) 순환장 (Figure 133), 상층 순환장(200-hPa)과 중층(500-hPa) 지위고도 (Figure 135)은 서태평양 대류활동과 우리나라 강수의 상관관계를 설명할 수 있는 역학적 관계를 보여준다. 열대/아열대 서태평양 해수면 온도가 냉각화를 보이고, 열대 동태평양에서 해수면 온도가 온난화를 보일 때, 즉 엘니뇨가 발생할 때 저위도 서태평양에서는 상대적으로 대류활동이 약해져서 고기압성 순환이 나타나고 건조해진다. 상층에서는 열대/아열대 서태평양에서 서풍이 강해지고 서풍은 아열대 북태평양의 저기압성 순환, 북쪽으로 중위도 서태평양에서는 고기압성 순환을 야기한다. 이러한 역학관계는 4월과도 상당히 유사하지만 인도양에서의 패턴이 다르고, 태평양에서는 상관관계의 정도가 4월보다 강하다.

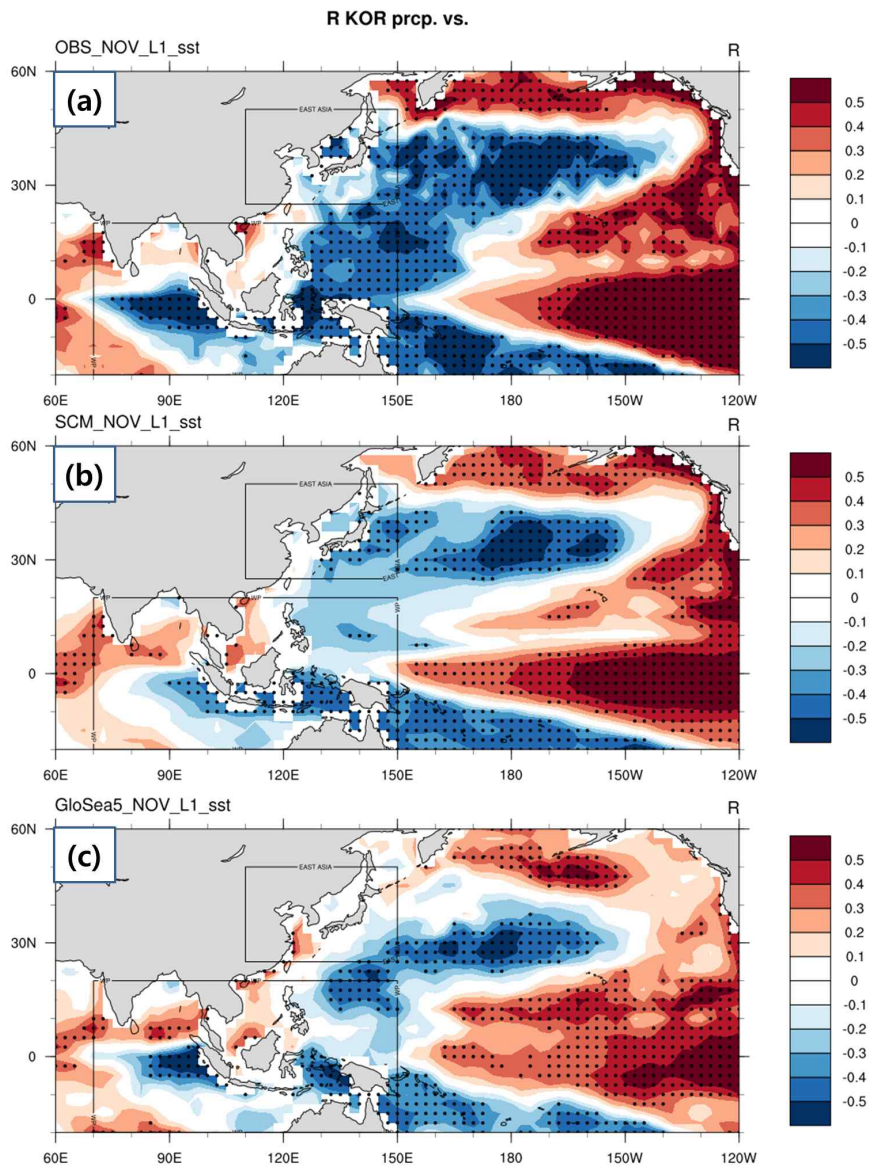


Figure 132. Correlation maps for the (a) NOAA OISST v.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 sea surface temperature on the South Korea precipitation in Nov.

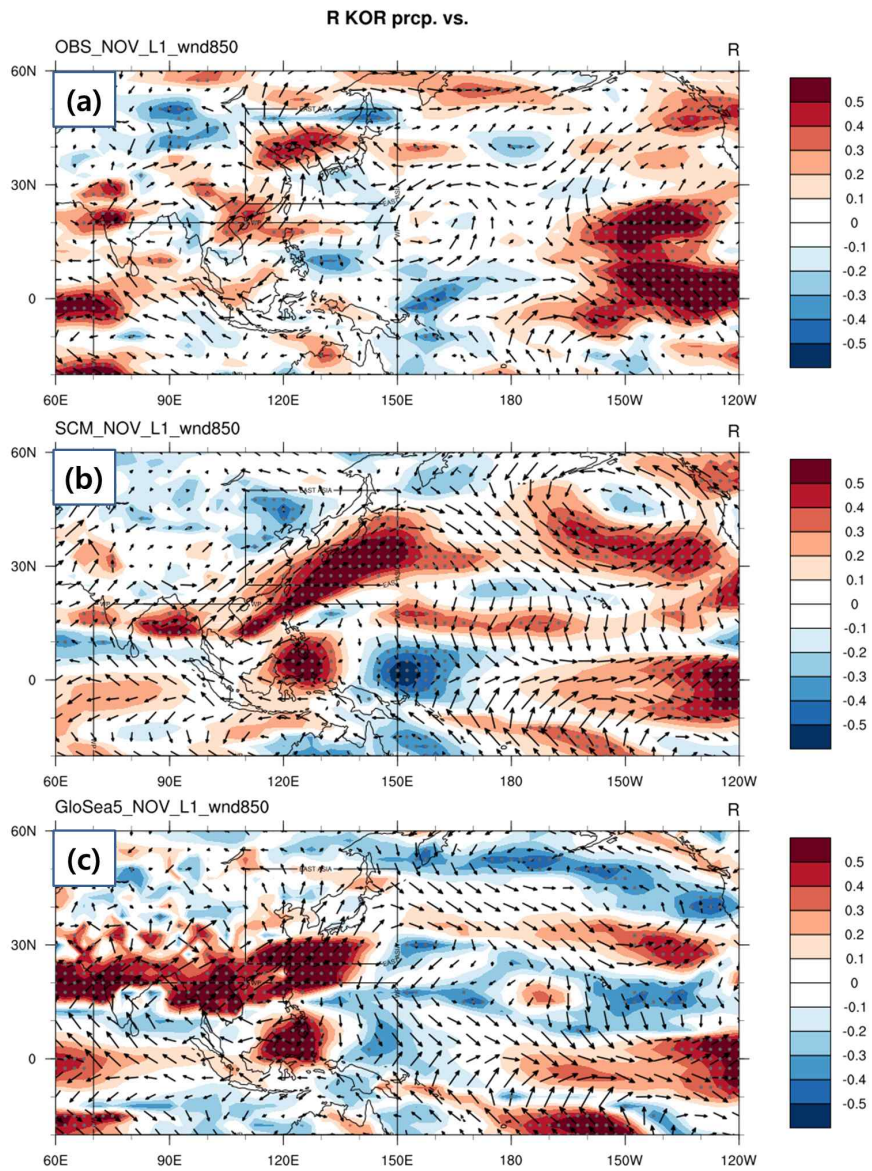


Figure 133. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 850hPa wind (vector) and wind speed (shading) on the South Korea precipitation in Nov.

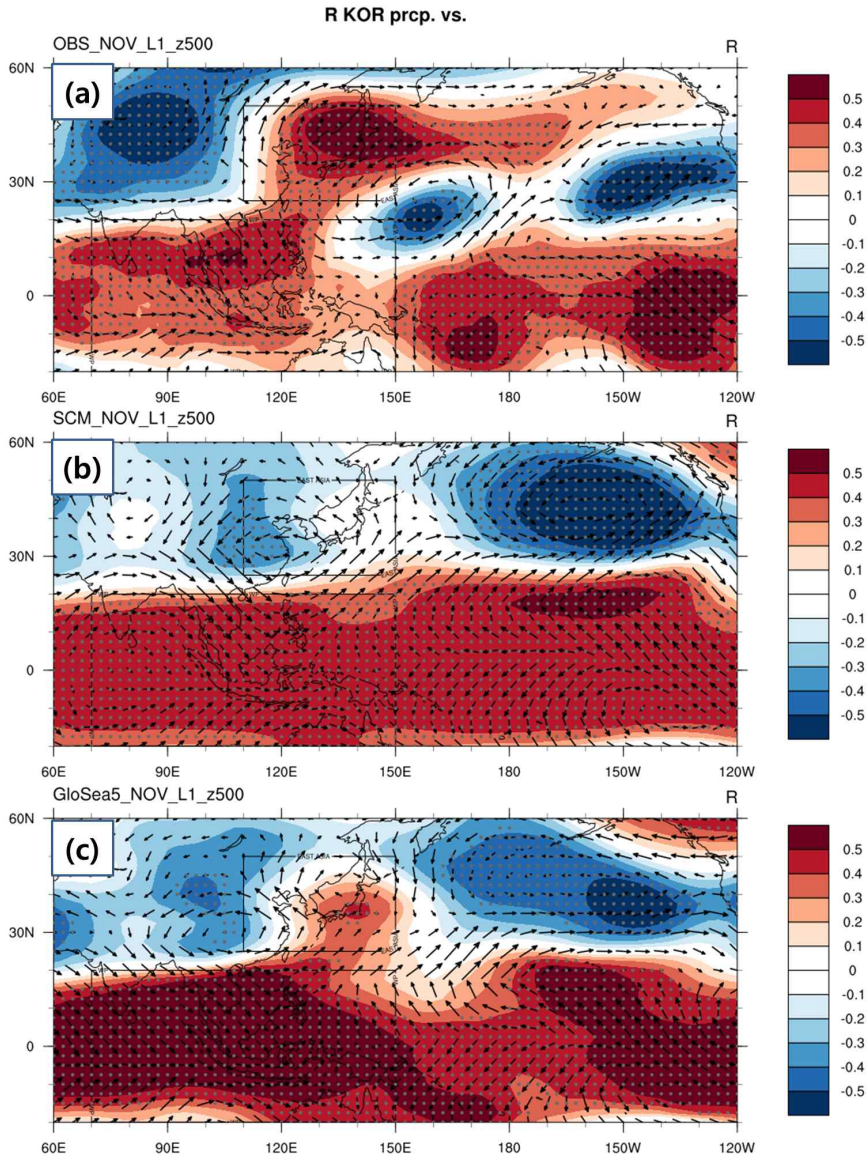


Figure 134. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 500hPa geopotential height (shading) and 200hPa wind (vector) on the South Korea precipitation in Nov.

관측과 모델을 비교하자면, 해수면 온도의 경우 모델이 관측을 상당히 잘 모의하나, 서태평양에서의 상관성의 정도는 약하다. 하지만 GloSea5는 평균적인 모델에 비해 상당히 잘 모의하는 것으로 나타난다. 하층 바람장의 경우, 모델은 비록 북태평양에서의 상관관계는 잘 모의하지 못하지만, 우리나라에 영향을 미치는 동남아시아 지역의 남서풍의 경향은 잘 모의하는 것으로 나타난다. 다만 그 정도가 강해서 편향이 있는 것으로 보이고 특히 GloSea5가 동남아시아 지역의 남서풍의 영향을 강하게 모의한다. 이는 GloSea5의 비교적 우수한 우리나라 강수 예측 스킬에도 영향을 주는 것으로 파악된다. 11월 하층 바람장의 온난 습윤한 남서풍은 우리나라에 영향을 끼치어 온난 습윤한 기후를 가지게 한다.

상층에서는 모델이 저위도 서태평양으로부터의 파동 전파를 잘 설명하지 못한다. 특히

평균적인 역학 모델은 오히려 한반도 근처에서 저기압성 순환을 보여주고 있다. 하지만 GloSea5는 한반도 동쪽의 고기압성 순환을 모의하고 이로 인해 한반도 방향으로 증가하는 동남풍을 어느 정도 실제와 유사하게 모의한다. 특히 인도양의 중층 지위고도와의 상관관계는 과대 모의하는 경향이 있는데 오히려 이러한 역학관계가 GloSea5의 비교적 우수한 우리나라 강수 예측 스킬에 영향을 준 것으로 파악된다.

④ Best model

우리나라 강수와는 별개로, 서태평양 지역에서 11월 강수 예측성이 가장 높은 모델은 POAMA이다(TCC=0.37). APCC MME도 이와 비슷하게 안정적인 예측 스킬을 보인다(TCC=0.38). POAMA의 우수한 서태평양 지역 강수 예측성은 이 지역 역학을 잘 모의하는 데서 비롯한다(Figure 135). 특히 해수면 온도와 하층 바람장과 우리나라 강수와의 상관관계는 다른 역학 모델들에 비해 우수하게 모의하는 것으로 보인다. 다만, 우리나라 강수에 중요한 하층 남서풍을 한반도 남쪽에서만 강하게 모의하고, 상층 중위도로의 파동 전파를 충분히 모의하지 못하여, 오히려 한반도 상층에서 저기압성 순환을 만들어낸다. 이러한 POAMA 모델의 특성이 서태평양 강수 예측의 우수성에도 불구하고, 우리나라 강수의 낮은 예측 스킬을 야기하는 것으로 사료된다.

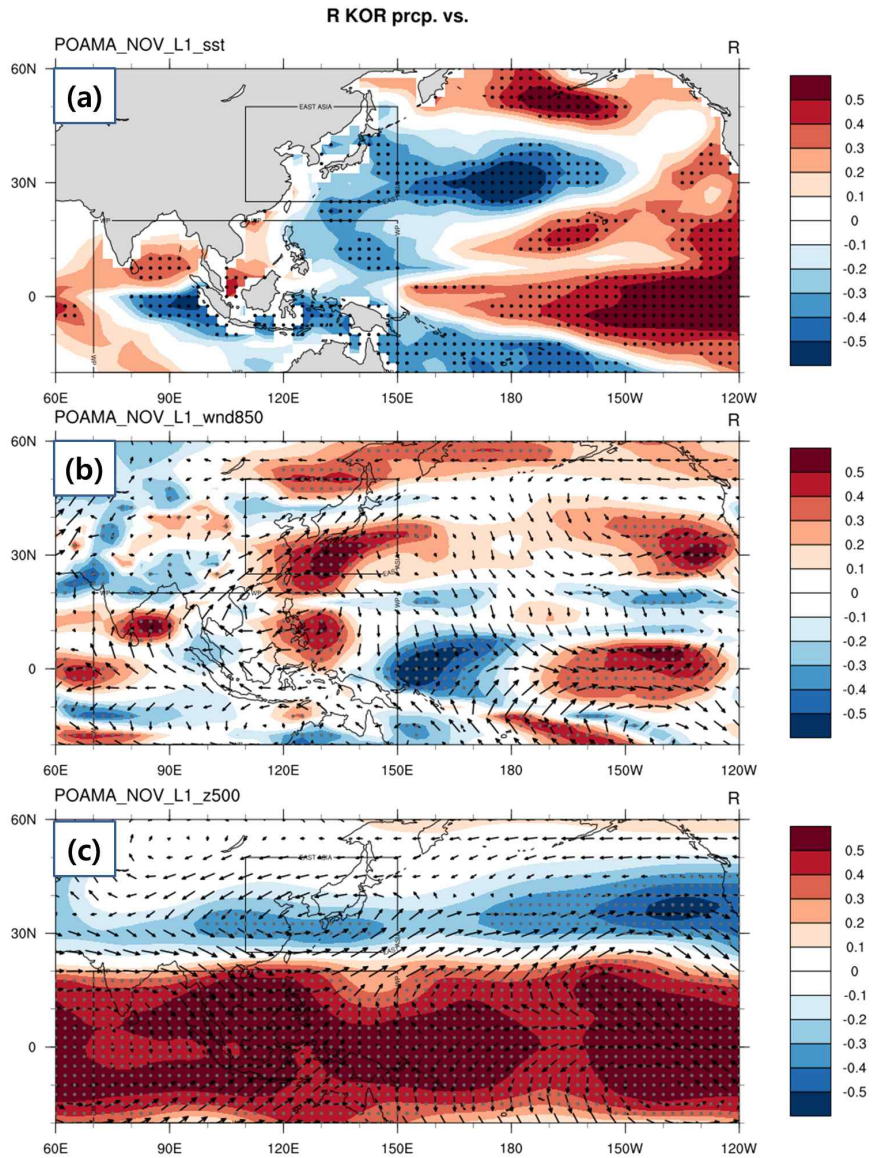


Figure 135. Correlation maps for the (a) SST, (b) 850hPa wind (vector) and wind speed (shading), (c) 200hPa wind (vector) and 500hPa geopotential height (shading) in POAMA model on the South Korea precipitation in Nov.

POAMA 모델의 TCC 예측 스킬은 열대/아열대 인도양 태평양에 걸쳐 매우 뛰어난 것으로 보이지만, 중위도에서는, 특히 동아시아에서는 확연히 떨어진다(Figure 136). 우리나라 강수의 예측 스킬이 우수하였던 GloSea5와 비교하자면, 서태평양 지역 예측 스킬 뿐 아니라 오히려 인도양에서의 순환장과 우리나라 강수의 상관관계를 과대 모의하는 GloSea5가 우리나라 강수 예측에는 더 유리한 것으로 보인다.

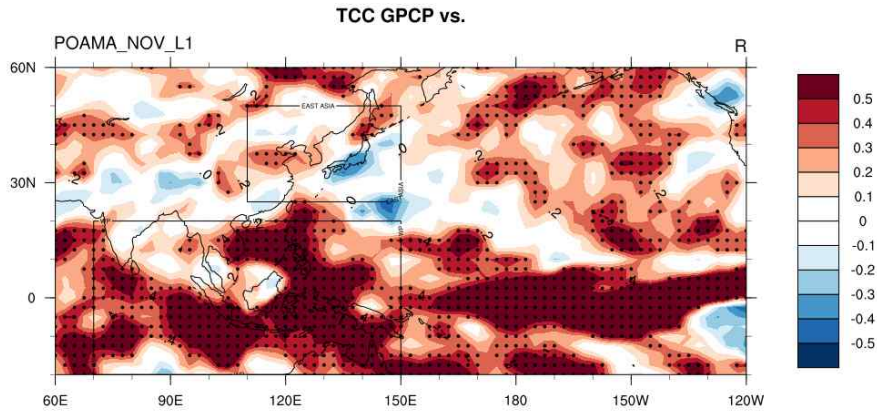


Figure 136. TCC skill map of POAMA compared with GPCP v.2 in Nov.

(나) 11월 검증 (직접 예측과 간접 예측 비교)

2018년 11월, 우리나라 누적 강수는 50.5 mm/mon으로 58.6 percentile을 기록하여 평년 수준이었다 (Figure 137).

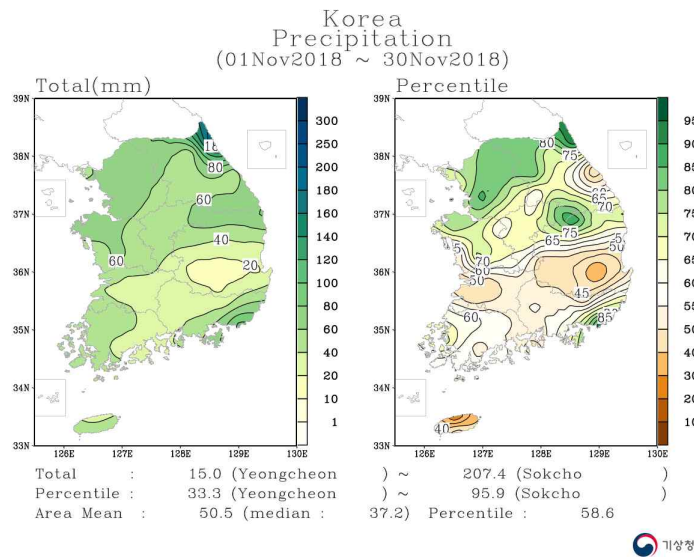


Figure 137. Distributions of total precipitation and precipitation percentile in Nov 2018.

Figure 138은 실제 2018년 11월 여러 변수들의 편차장이다. 우리나라에서는 평년 비슷 수준의 강수가 발생하였고, 열대-아열대 서태평양에서는 습윤-건조 신호가 나타났는데 기후인자로 쓰인 [70° E-150° E, 20° S-20° N] 지역 강수는 -16.8 mm/mon를 기록하였고 평년 비슷(28.5 mm/mon 이내) 수준이었다. 따라서 11월 우리나라 강수 직접 예측은 맞았지만 서태평양 기후인자에 의한 간접예측은 맞지 않았다. Niño 3.4 지수는 0.99°C로, 양의 값을 지니지만 강한 엘니뇨는 아니어서, 엘니뇨에 의한 강수 간접 예측(평년 이상) 또한 11월에는 맞지 않았다. 열대 태평양과 열대-아열대 서태평양 순환장이 크게 발달하지 않으면서 우리나라

강수에 중요한 남풍은 활성화되지 않았고, 이보다는 동풍 편차가 주풍이 되면서 강수는 평년 수준이었다. 이러한 결과는 Table 19에 정리되었다. 따라서 기후인자를 판별하여 우리나라 강수에 대한 간접 예측을 하는 것은 예측 정보를 다양화하는데 유용하지만, 기후인자와 관련된 예측장 패턴을 해석하여 이의 영향 정도를 따지는 것이 예측의 정확도를 높이는데 중요한 것으로 사료된다.

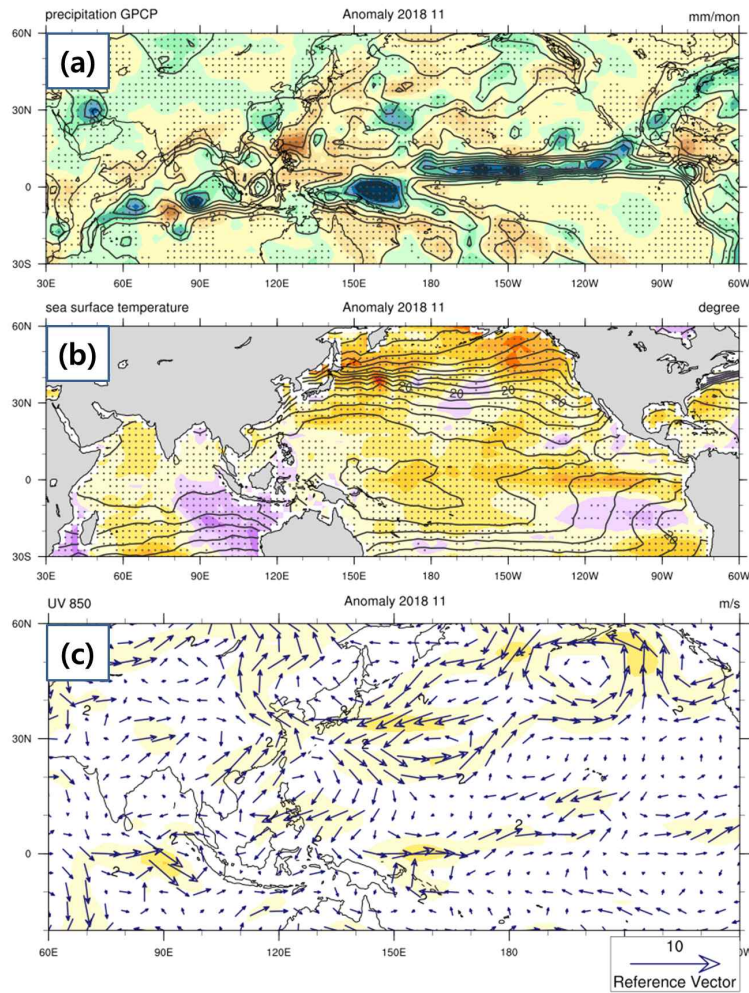


Figure 138. Distributions of (a) GPCP v.2 total (contour) and anomalous (shading) precipitation, (b) NOAA OISST v.2 total (contour) and anomalous (shading) SST, (c) NCEP R2 850hPa wind anomalies (vector) and wind speed anomalies (shading) in Nov 2018. Climatological period is 1983-2010.

Table 19. Forecast and verification of South Korea precipitation in Nov 2018. AN, NN, and BN indicate Above Normal, Near Normal, and Below Normal.

	Index forecast	Correlation	Forecast for Korea	Observation		
Korea grid	0.24(NN)			50.5(NN)	correct	
Climate index	Nino 3.4 index	0.99(AN)	0.55*	AN	0.99(NN)	incorrect
	Western Pacific convection index	-13.96*(BN)	-0.42*	AN	-16.8(NN)	incorrect

(4) 12월 서태평양 대류활동과 우리나라 강수 상관관계

(가) 한 달 선행 계절예보 (12월)

① 12월 우리나라 강수 직접 예측과 기후인자 고려한 간접 예측

12월 우리나라 강수와 상관관계가 높게 나타나는 서태평양 강수 지역은 [70° E-160° E, 20° S-20° N]이다. 11월과 마찬가지로 인도양까지 포함하는 상당히 광범위한 지역이다. 우리나라 강수와 주어진 서태평양 지역 강수 실제 관측장(CAMS-OPI)와의 반상관관계는 -0.63으로 높다(1983-2010). 모델의 서태평양 지역 강수 예측장과의 반상관관계 또한 -0.62로 높고, 이 때 서태평양 지역 강수의 예측 TCC 스킬은 0.77로 높다. 서태평양 지역 2018년 12월 강수 예측은 -9.57 mm/mon로 평년보다 적었고, 예측값과 우리나라 강수와의 반상관관계(-0.62)를 고려하면, 우리나라 강수는 평년보다 많을 것이라 예측할 수 있다. 이러한 내용은 2018년 12월 예보 분석표에 제공하였다(Figure 139).

또한 엘니뇨의 우리나라 강수에 대한 영향을 고려하여 예측할 수 있는데, 모델의 Niño 3.4 지수와 우리나라 강수는 0.55의 유의미한 상관관계가 있고, 모델 Niño 3.4 예측값은 1.16°C으로 평년보다 높아 엘니뇨가 예측되기에, 이를 고려하면 우리나라 강수는 평년보다 많을 것이라고 예측할 수 있다 (Figure 139). 참고로 Niño 3.4 지수 예측 TCC 스킬은 0.99로 매우 높다. 한편, 우리나라 강수의 직접적인 예측은 결정론적 예보의 경우 평년 수준, 확률 예측은 Equal chance로 대규모 순환장이나 해수면 온도의 원격상관관계에 의한 간접 예측과는 다른 예측값을 보인다.

APCC MME FORECAST TABLE

201812		TEMP			PREC		
		12	01	02	12	01	02
Forecast	SCM ANO[NNR]	0.41[0.19]	0.82[0.15]	0.53[0.13]	0.50[4.03]	14.21[2.20]	3.59[2.92]
	PMME(B/N/A)	19/35/46	19/28/54	23/31/45	34/31/35	23/31/46	30/34/36
TCC	OBS vs SCM	0.39*	0.22	0.24	0.38*	-0.06	0.16
ROC(B/N/A)	OBS vs PMME	0.57/0.47/0.73	0.61/0.63/0.46	0.69/0.47/0.67	0.61/0.44/0.75	0.52/0.44/0.43	0.70/0.45/0.61
HSS	OBS vs PMME	-0.01	-0.02	0.07*	0.07*	-0.05	0.03*
Trend	OBS[utd]	0.32[-0.04]	1.63*[0.83]	2.64*[1.95*]	0.97[13.15]	-2.81[-10.22]	1.33[1.19]
	SCM[utd]	0.76*[1.04*]	0.48*[0.79*]	0.67*[0.91*]	0.11[3.12]	1.09[0.56]	5.87[3.30]
Cor TvsP	OBS[utd]	0.36*[0.22]	0.43*[0.41*]	0.55*[0.54*]	0.36*[0.22]	0.43*[0.41*]	0.55*[0.54*]
	SCM[utd]	0.65*[0.56*]	0.57*[0.44*]	0.57*[0.43*]	0.65*[0.56*]	0.57*[0.44*]	0.57*[0.43*]
NINO3.4	C:OBS/SCM	0.31/0.32*	0.08/-0.07	0.15/0.09	0.50*/0.55*	-0.25/0.07	0.19/-0.01
	TCC/ANO	0.99*/1.16*	-0.31/1.13*	-0.32*/0.99*	0.99*/1.16*	-0.31/1.13*	-0.32*/0.99*
WPC	C:OBS/SCM				-0.63*/-0.62*	-0.00/0.13	-0.34*/0.07
	TCC/ANO				0.77*/-9.57*	-0.15/-11.07*	-0.53*/-10.84*
Total Forecast							

NN EC COLD WARM WARNING DRY WET
 *:Significant at 90% level, Above/Below 0.43sigma [1983-2010] Glob OBS.: OISSTv.2, CAMS-OPI
 SCM: Simple Composite Mean MME
 NNR: Near Normal Range (0.43sigma) [1983-2010]
 TCC: Temporal Correlation Coefficient [1983-2010]
 Linear Trend T850 & P [1983-2010] / up-to-date [1983-2016]
 Correlation T850 vs P [1983-2010] / up-to-date [1983-2016]
 C:OBS/SCM: TCC between OBS/SCM index & Korean T/P
 TCC/ANO: TCC between OBS index & SCM index / Forecasted Anomaly
 NINO 3.4 index [190E-240E, 5S-5N]
 Western Pacific Convection area M12 [70E-160E, 20S-20N]

Figure 139. APCC MME forecast table for Dec-Feb 2018/2019. An asterisk indicates significance at 90% level or above/below the climatological value.

Figure 140은 APCC MME 2018년 12월 강수 예측장이다. 예측장에서는 서태평양 지역에서 건조 신호가, 열대 중태평양에서는 습윤 신호가 예측되어 엘니뇨에 의한 열대 대기순환 반응을 보인다. 다만 대기반응이나 해수면 온도가 평년보다 활성화된 것으로 예측되긴 하지만 세기가 강하진 않기 때문에 우리나라 강수 예측에의 적용에 주의를 요해야 한다. 따라서 APCC에서는 이를 고려하여 우리나라 강수를 종합적으로 평년 비슷 수준으로 발표하였다.

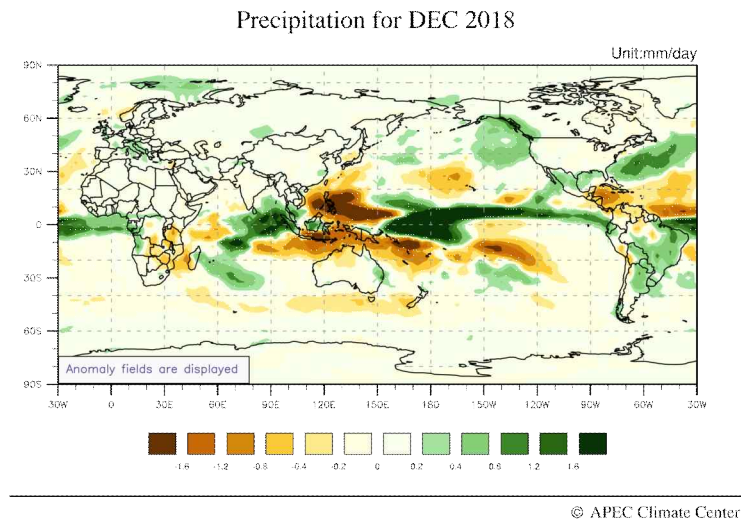


Figure 140. 1-month lead APCC MME precipitation forecast for Dec 2018.

② 12월 APCC MME 및 개별 모델 강수 예측 스킬

12월에 대해서도 APCC MME 및 개별 모델에 대한 예측 스킬을 비교 분석하였다 (Figure 141). 12월 서태평양(WP) 강수 지역은 [70° E-160° E, 20° S-20° N], 동아시아(EA) 지역은 4월, 11월과 같은 [110° E-150° E, 25° N-50° N] 이다.

[201812 L1] Prec. Forecast Skill Table

		GPCP	MME	GLOSEA	SCoPS	BEST	name
KOR	TCC	0.96*	0.38*	0.37	0.39*	0.39*	CWB
EA	PCC		0.14*	0.23*	0.09	0.20*	NCEP
EA	TCC		0.19	0.29	0.15	0.21	NCEP
K/WP	R	-0.68*	-0.62*	-0.62*	-0.53*	-0.62*	POAMA
WP	PCC		0.33*	-0.04	0.16*	0.30*	POAMA
WP	TCC		0.33	0.40*	0.14	0.34*	POAMA

*:Significant at 90% level

Western Pacific Convection Area [70E-160E, 20S-20N]

KOR: Korea, EA: East Asia, WP: Western Pacific

TCC: Temporal Corr. Coeff., PCC: Pattern Corr. Coeff., R: Relationship (TCC)

Figure 141. 1-month lead precipitation forecast skill table for Dec 2018. An asterisk indicates significance at 90% level.

우리나라 강수 예측 스킬은 APCC MME가 0.38로 유의미하고, 이 중 best model은 CWB와 SCoPS가 있다(TCC=0.39). 서태평양 지역 강수와 우리나라 강수의 반상관관계는 관측과 모델 모두 유의미하며 상당히 높다. 그 중 POAMA model이 -0.62로 가장 높고, APCC MME 또한 같은 값으로 높다. 실제로 이 서태평양 지역 강수와 우리나라 강수의 반 상관관계는 -0.68이다(1983-2010).

③ 12월 서태평양 지역 강수 기후인자의 역학적 배경

모델 및 관측에서 우리나라 강수와 서태평양 지역 강수의 반상관관계는 다음 Figure 142로 파악할 수 있다. 열대에서 엘니뇨가 유의미하게 나타날 때(동태평양 습윤, 서태평양 건조) 동아시아에서는 습윤한 경향이 강하다. 모델에서도 이런 반상관관계를 대체적으로 잘 모의하는데 다만 엘니뇨에 의한 강수 패턴이 더 강하게 반응하고, 동아시아 지역과의 원격상관관계는 약하게 반응하는 경향이 있다. 특히 모델은 열대 서태평양 건조 신호를 좀 더 넓은 지역에서 보여주고 북태평양에서 나타나는 건조 신호를 더 넓은 지역에서 과하게 모의하는 경향이 있다. GloSea5는 인도양에서의 건조 신호를 실제보다 더 강하게 모의하는 경향이 있는데, 이는 앞서 보인 4월, 11월에서도 보이는 GloSea5의 특성이다.

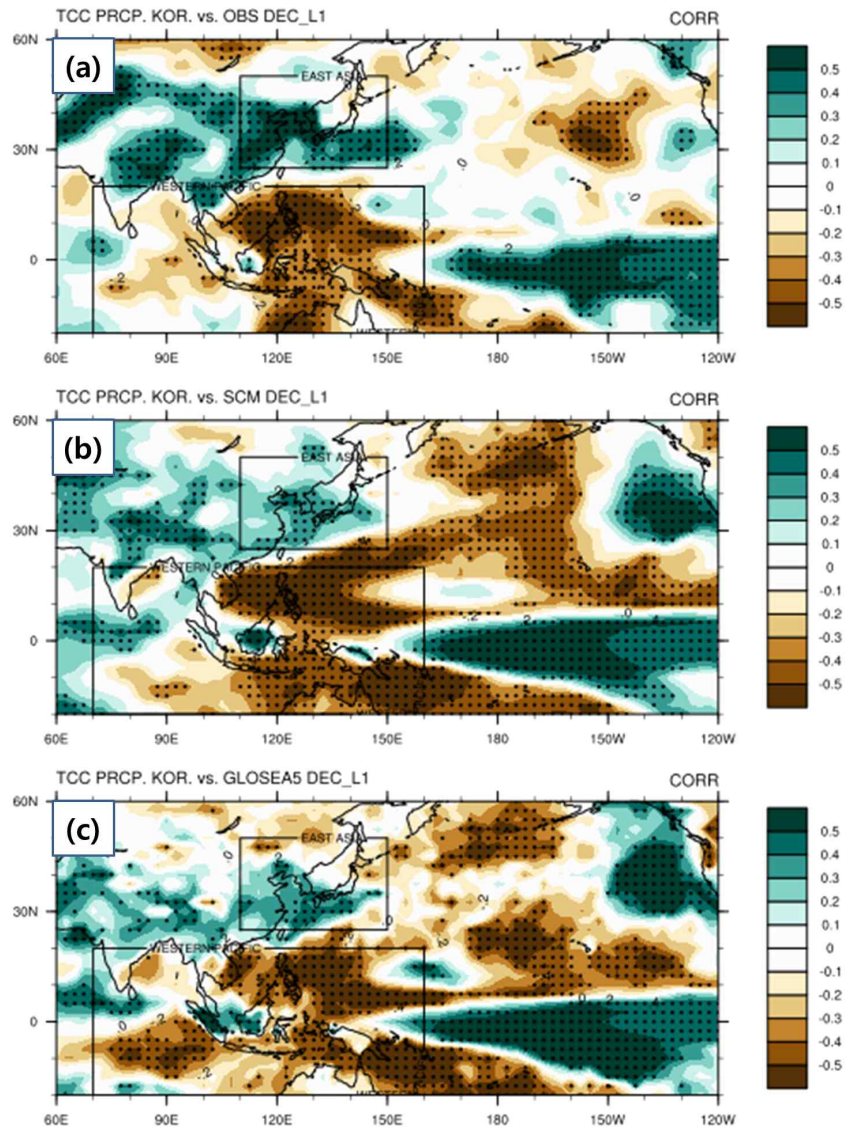


Figure 142. Correlation maps for the (a) GPCPv.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 precipitation on the South Korea precipitation in Dec. Box area indicate East Asia [110° E-150° E, 25° N-50° N] and western Pacific [70° E-160° E, 20° S-20° N] region.

해수면 온도에서도 ENSO와 우리나라 강수의 상관관계를 잘 보여 준다 (Figure 143). 우리나라 강수가 많은 12월, 열대 동태평양에서는 온난화가, 서태평양에서는 냉각화가 나타나고, 인도양 동쪽에서 냉각화가 나타난다. 또한 중위도 북태평양 중앙에서는 냉각화, 동태평양에서는 온난화가 나타나 ENSO에 의한 중위도 기후패턴의 변화도 잘 나타난다. GloSea5는 MME에 비해서 서태평양 냉각화는 약하게 나타나는 편이다.

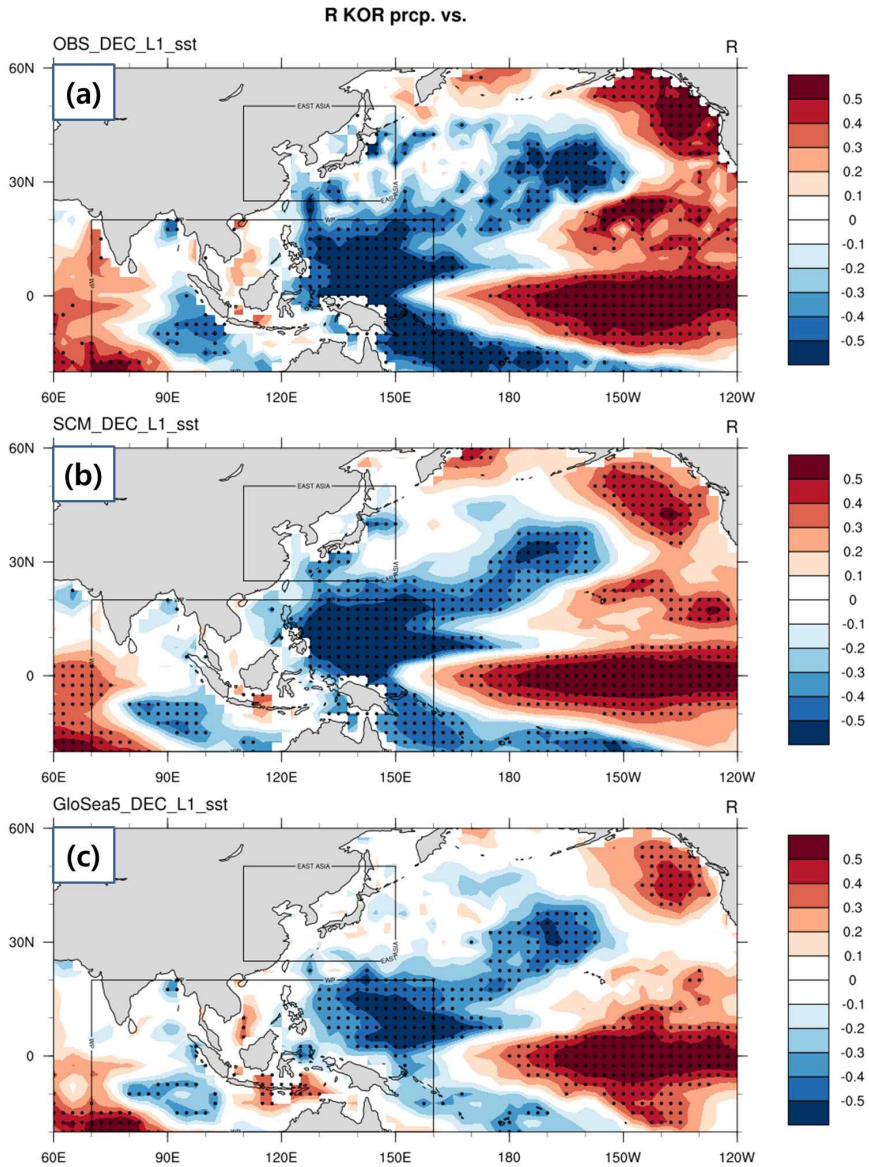


Figure 143. Correlation maps for the (a) NOAA OISST v.2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 sea surface temperature on the South Korea precipitation in Dec.

상하층 순환장과 지위고도를 통해 우리나라 강수에 영향을 주는 엘니뇨에 의한 대기반응을 살펴볼 수 있는데 (Figure 144,145), 대기반응은 앞서 보인 강수 패턴과 직접적 연관이 있다. 열대 서태평양 냉각화가 나타나면, 대류활동 억제로 열대 서태평양 하층에서는 고기압성 순환과 건조 신호가 나타나고, 이의 상층에서는 서풍이 강화되고, Gill-type 반응으로 북동쪽에 저기압성 순환이 유발된다. 우리나라를 포함하는 동아시아 지역은 하층 남풍의 영향으로 온난습윤한 공기가 유입되어 많은 강수가 발생한다. 상층 우리나라 근처에서는 열대지역으로부터의 파동전파로 고기압성 순환이 나타나는데, 이러한 역학을 APCC MME 등 여러 기후모델이 잘 모의한다. 이는 12월 우리나라 기후에 영향을 끼치는 엘니뇨가 특히 기후 모델에서 잘 모의하는 현상이기 때문인 것으로 보인다.

다만 기후 모델에서의 중위도로의 파동 전파는 실제와 비교하면 약간의 편향이 있다. 열대 태평양에서의 양의 지위고도는 실제보다는 과대모의되고, 우리나라 동쪽의 고기압성 순환은 실제보다 동쪽에서 나타난다. 무엇보다 북태평양 동쪽에서 나타나는 저기압성 순환을 과대모의한다. 이러한 기후 모델의 편향은 GloSea5에서도 나타나는데, 특히 이 모델은 우리나라 동쪽의 고기압성 편차는 약하게 모의하는 한편, 서쪽의 저기압과 북동태평양의 저기압성 편차는 강하게 모의하는 특성이 있다.

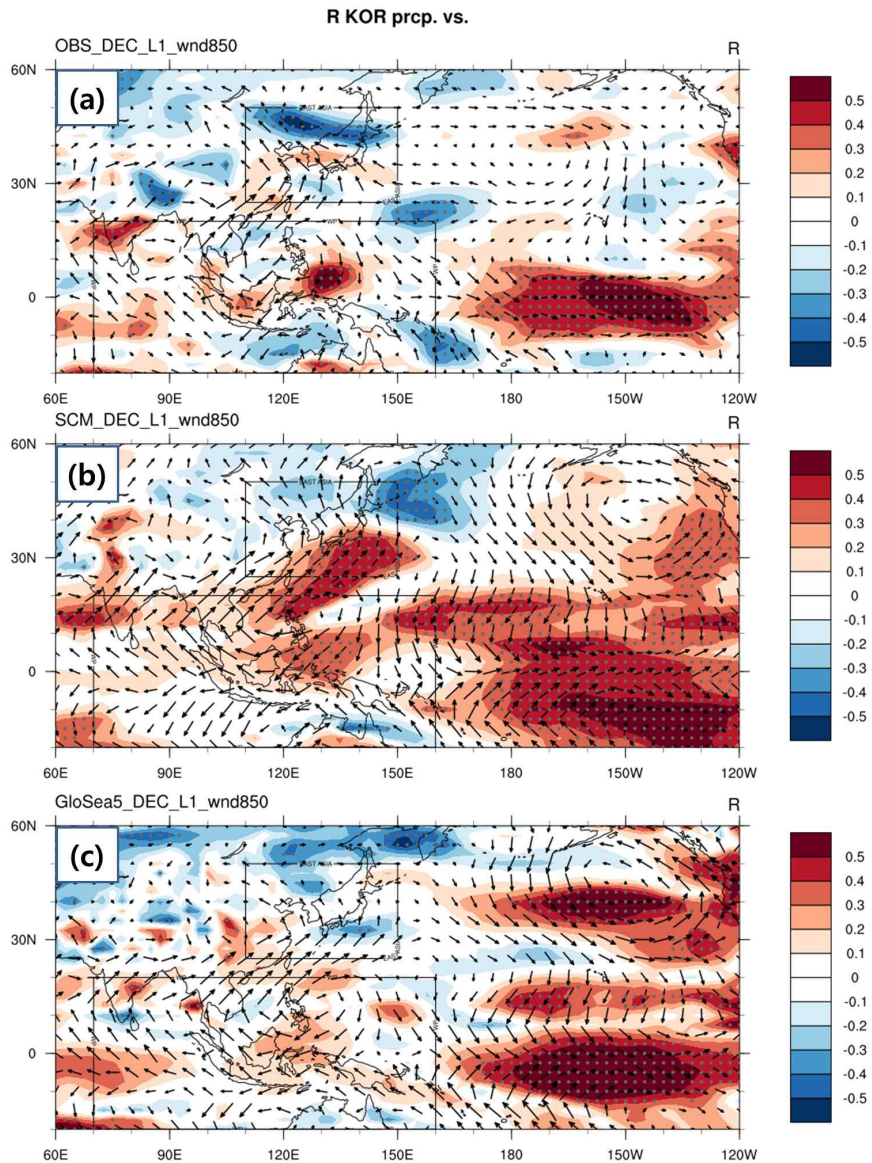


Figure 144. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 850hPa wind (vector) and wind speed (shading) on the South Korea precipitation in Dec.

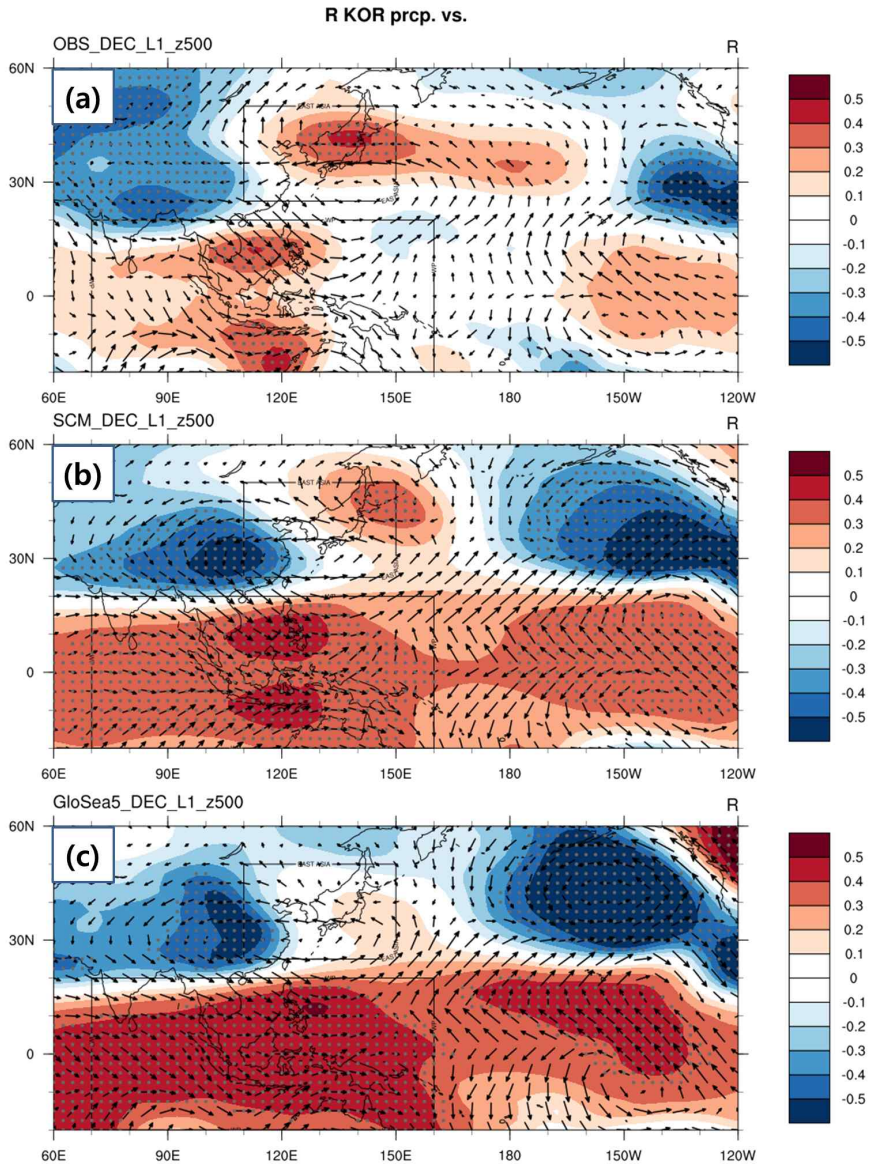


Figure 145. Correlation maps for the (a) NCEP R2, (b) APCC MME, (c) GloSea5 500hPa geopotential height (shading) and 200hPa wind (vector) on the South Korea precipitation in Dec.

④ Best model

12월 서태평양 지역에서 강수 예측 스킬이 가장 좋은 모델은 POAMA이다. 해수면 온도, 하층 바람, 중층 지위고도와 상층 바람장과 우리나라 강수와의 상관관계 지도 (Figure 146)에서 우리나라 강수와 관계된 역학이 거의 실제와 유사함을 알 수 있다. 다른 모델들도 열대 지역에서는 실제와 거의 비슷하게 모의하는데, 특히 POAMA는 12월에 동아시아를 비롯한 중위도에서도 실제와 거의 비슷하게 모의한다. 이러한 특성은 우리나라 강수와 서태평양 강수의 높은 반상관관계($R=-0.62$)를 반영한다.

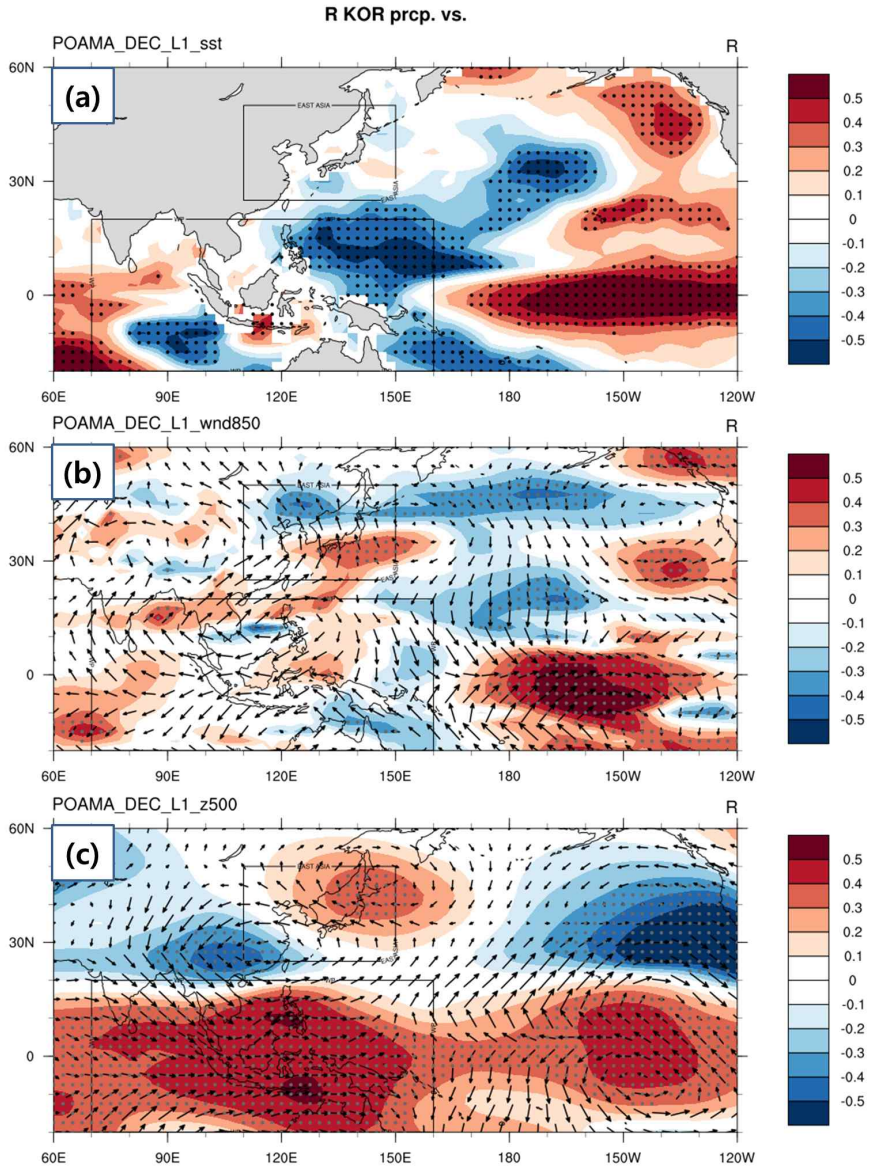


Figure 146. Correlation maps for the (a) SST, (b) 850hPa wind (vector) and wind speed (shading), (c) 200hPa wind (vector) and 500hPa geopotential height (shading) in POAMA model on the South Korea precipitation in Dec.

12월은 ENSO가 성숙하는 계절이고, 열대 해수면 온도의 강제력이 전 지구적으로 영향을 끼치는 시기이기에, ENSO를 잘 모의하는 기후역학 모델의 특성에 의해 열대 뿐 아니라 중위도까지 예측 스킬을 높이는 데 반영이 된 것이라 판단된다. 다만, ENSO의 강도가 강한 시기에는 이를 반영하는 역학모델의 예측에 신뢰성이 높겠지만, 그렇지 않다면 역학모델의 예측 스킬은 낮아지고, 이에 의한 예측장을 판별하는 것에도 주의가 필요하다. 12월 POAMA 모델 강수 TCC 스킬 지도 (Figure 147)를 보면 대부분의 열대 지역에서 강수의 예측 스킬은 매우 높다. 북태평양 중위도에서는 다소 스킬이 떨어지긴 하지만 4월이나 11월에 비해 꽤 넓은 지역에서 강수 스킬의 신뢰성이 유의미하다. 동아시아에서도 한반도는 양의 스킬을 가지고 특히 한반도 남쪽에서 강수의 스킬이 유의미하다.

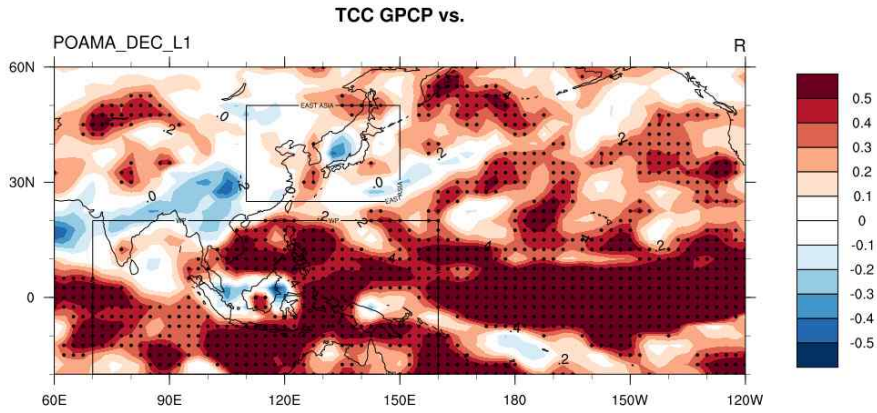


Figure 147. TCC skill map of POAMA compared with GPCP v.2 in Dec.

(나) 12월 검증 (직접 예측과 간접 예측 비교)

2018년 12월, 우리나라 누적 강수는 27.6 mm/mon으로, 65.6 percentile을 기록하여 약간 많은 편이긴 하지만 평년 비슷 수준을 기록하였다 (Figure 148).

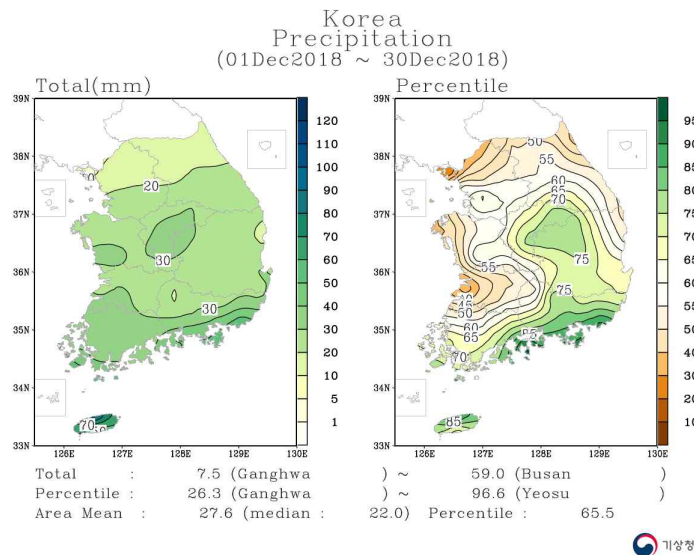


Figure 148. Distributions of total precipitation and precipitation percentile in Dec 2018.

실제 2018년 12월 여러 변수들의 편차장 (Figure 149)에서 우리나라에서는 평년 수준의 강수가 발생하였고, 서태평양 지역에서는 패턴이 복잡하긴 하지만 18.6 mm/mon의 강수가 발생하여 전반적으로 평년 수준이었다. 따라서 우리나라 강수에 대한 직접 예측(NN)은 맞았지만, 서태평양 지역 강수 기후인자에 의한 우리나라 강수 간접 예측(AN)은 12월에는 맞지 않았다 (Table 20).

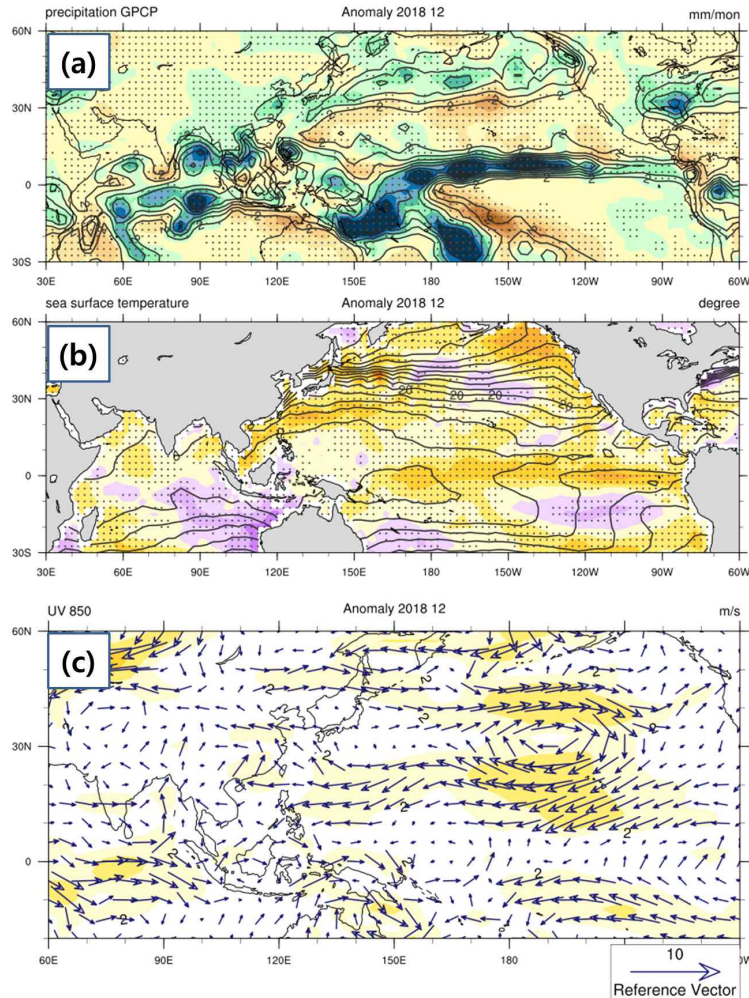


Figure 149. Distributions of (a) GPCP v.2 total (contour) and anomalous (shading) precipitation, (b) NOAA OISST v.2 total (contour) and anomalous (shading) SST, (c) NCEP R2 850hPa wind anomalies (vector) and wind speed anomalies (shading) in Dec 2018. Climatological period is 1983–2010.

해수면 온도는 열대 태평양에서 대체적으로 엘니뇨-like 패턴이 나타나긴 하였으나 Niño 3.4 지수는 0.99로 평년 수준이어서 ENSO 기후인자를 이용한 한반도 강수 예측(AN) 또한 맞지 않았다 (Table 20). 따라서 12월에도 11월과 마찬가지로 기후인자와 관련된 예측에 지수에 의한 예측 뿐 아니라 예측장 패턴을 파악하여 이의 영향을 고려하는 것이 중요한 것으로 판단된다. 실제로 APCC에서는 12월 예측장 패턴에서 엘니뇨나 서태평양 강수 패턴이 지수로서는 평년 범위를 벗어나지만 강도는 강하지 않을 것으로 판단하여 우리나라 강수 종합 예측은 NN/AN로 발표하였고, 결론적으로 이 종합예보가 맞았다. 서태평양 지역 건조 신호가 그다지 강하지 않았고, 열대 태평양 ENSO 강제력도 그다지 강하지 않았기 때문에 한반도 동쪽에서 고기압은 형성되었으나, 이로 인한 남풍 유입은 우리나라 강수에 영향을 줄 만큼 강하지 않아서 12월 우리나라 강수는 평년 수준의 강수를 기록하였다 (Figure 149).

Table 20. Forecast and verification of South Korea precipitation in Dec 2018. AN, NN, and BN indicate Above Normal, Near Normal, and Below Normal.

	Index forecast	Correlation	Forecast for Korea	Observation
Korea grid	0.50(NN)			27.6(NN) correct
Climate index	Nino 3.4 index	1.16*(AN)	0.55*	AN 0.99(NN) incorrect
	Western Pacific convection index	-9.57*(BN)	-0.62*	AN 18.6(NN) incorrect

(5) APCC MME 모델 기반 서태평양 강수 기후인자 요약

우리나라 강수의 계절예보를 지원하기 위해 기후 모델에 기반 하여 우리나라 강수에 유의미한 영향을 끼친다고 알려져 있는 서태평양 지역 대류활동을 지수화 하여 우리나라 강수의 간접 예측에 활용하였다. 매달 이러한 상관관계가 성립되지는 않기 때문에 4월, 9월, 11월, 12월을 선별하였고 이 중 4월, 11월, 12월에 대해 심층 분석하였다.

실제 2018년 11월, 12월, 2019년 4월 우리나라 강수를 예측할 때 쓰인 기후인자와 이에 대한 검증은 하였는데, 결론적으로 지수만을 고려하였을 때는 2019년 4월에는 서태평양 대류활동에 의한 우리나라 강수 예측이 맞았지만, 2018년 11월, 12월은 맞지 않았다. 하지만 이 연구내용을 바탕으로 원격상관관계를 고려하여 우리나라 강수의 종합적인 예보를 발표한 것은 상당히 잘 맞았다 (Table 21). 따라서 기후인자를 고려할 때 단순히 지수만 볼 것이 아니라 이에 상응하는 예측장의 패턴을 살펴보고 모델의 편향이나 예측성을 고려해야한다. 참고로 11월, 12월 기후인자에 의한 간접 빗나간 것은 이 때 ENSO 관련된 활동이 모델 예측만큼 강하지 않아서였다.

Table 21. Comparison of observation and forecast for South Korea precipitation.

	NOV 2018	DEC 2018	APR 2019
APCC forecast	0+	0	0+
Observation	0	0	0

여러 APCC MME 개별모델들에 대해서도 분석을 실시하였는데, 열대/아열대 서태평양 지역의 강수 예측 스킬은 동아시아 지역보다 우수하여 모델의 이 지역 예측장에 의한 우리나라 강수 예측의 타당성을 뒷받침해준다. 특히 POAMA모델이 예측 스킬이 우수하였다.

기상청 기후 모델인 GloSea5는 인도양과 벙갈만의 순환장을 다소 과대 모의하는 경향이 있는데, 오히려 이러한 편향이 우리나라 강수 예측 스킬을 높이는데 긍정적 작용을 한 것으로 보인다.

이 연구가 좀 더 효율적으로 쓰이자면 단순 선형관계 뿐 아니라 합성장 분석이 필요한 것으로 보인다. ENSO의 영향이 비대칭적으로 나타나기 때문에 이를 고려해야하기 때문이다. 또한 계절 예측에 종합적 정보를 주기 위해서는 서태평양 기후 인자 뿐 아니라 다른 기후 인자들도 개발하여 이를 고려해야 할 필요가 있다. 여러 독립적인 기후 인자들을 고려한다면 종합적인 예측 경험식을 개발할 수 있을 것이다.

나. 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템 개발

(1) 연구 배경

상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템인 ESPreSSO-KR (Expert Seasonal Prediction System for operational Seasonal Outlook for Korea)은 하이브리드 역학-통계 계절 예측 시스템으로 2017년 첫 번째 버전(ESPreSSO^{v1})이 개발되어 1개월 선행 기온 예보를 제공하기 시작하였으며, 2018년 두 번째 버전(ESPreSSO^{v2})을 통해 예측 선행 시간을 3개월로 확장하였고, 권역별 예보, 확률 예보 기능이 추가하였다. 기술적으로도, 관리 모듈을 추가하거나 GrADS (Grid Analysis and Display System)와 FORTRAN 언어 기반의 이전 버전을 python으로 포팅하는 등 커다란 변화가 있었다. 이번 연구 개발을 통해서 이미 계획하였던 강수 예측 인자 발굴 및 강수 예측 시스템 개발, 확률 예측 모듈 개발 및 시스템 고도화, 그리고 현업 계절 예보 회의 지원이 수행되었다. 먼저, ESPreSSO-KR의 예측 변수를 기온에서 강수로 확장하였다. 그러나 시험 운용을 통해 기온 예측과는 달리 강수의 경우 안정적인 예측 인자 선정이 어려울 것으로 예상되어, 예측 선행 시간을 1개월로 제한하여 강수 예측의 안정성 여부를 확인하였다. 2019년 기간 동안 1개월 선행 강수 예측 시범 생산이 이루어졌고, 1-3개월 선행 기온 예측과 함께 예측성을 검증하였다. 또한, 확률 예측 모듈을 분리 개발하여 기온 및 강수 예측의 최종 결과 값을 3분위 범주 예측으로 제공하게 되었다. 이를 통하여 현업 계절 예보 회의를 지원하였다. 예측성과 관련하여서는, 예상했던 바와 같이 강수의 경우 안정적인 예측 인자를 선정하기가 불가능한 경우가 다수 존재하였다. 또한, 다중 모형 앙상블 시스템 구성 및 네트워크 환경 변화로 인한 시스템 대응이 추가로 필요하였고, 수행 가능한 범위 내에서 코드 수정, 모듈 우회 등이 추가로 이루어졌다. 다중 모형 앙상블 시스템의 구성 변화로 인해 전체적인 예측성이 불안정해진 측면과 네트워크 환경 변화로 인한 자료 수신 모듈의 수정은 향후 해결해야 할 문제로 보인다.

(2) 자료와 방법

ESPreSSO-KR 기본 구조는 이전 버전과 동일하다. 먼저, ESPreSSO의 사전 작업 모듈이 우리나라 49개 관측소의 월별 누적 강수량과 1개월 선행 APCC의 다중 모형 앙상블(MME; Multi-Model Ensemble)을 통해 예측한 변수들과의 상관 관계를 계산하여 전문가 선택부의 참고 자료로 제공한다. 이후 전문가가 실제 관측에서 나타나는 강수 현상과 대규모 순환장 사이의 관계, MME에서 모의되는 대규모 순환장과 강수 현상의 관계, 그리고 MME의 재현성 여부 등을 종합적으로 고려하여, 최적의 예측 인자를 주인자와 부인자 두 가지로 선정한다. 이러한 작업을 각 관측소별로 반복하는데, 이러한 과정을 통해 지속적으로 선택되는 신호는 강화되고, 산발적으로 선택되는 잡음은 서로 상쇄되는 효과를 노리게 된다. 각 관측소별로 선택된 주인자와 부인자 사이의 연관성이 관측에 대해 최소 유효 상관을 넘지 못하는 경우에는 부인자를 탈락시키는 선별 과정을 거쳐 각각의 관측소에 대한 개별 예측을 실시한다. 개별 예측을 앙상블하여 최종 예측 값을 산출하고, 이와 함께 전문가가 선택한 예측 인자 중 주요 인자를 선정하여 명명하고, 이를 기반으로 자연어 예보 및 권역별 정보를 포함한 최종

예보문을 생산/발송한다. 구체적인 과정과 각 과정에 포함된 가정은 연구보고서 2017-06 『상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템』 및 연구보고서 2018-10 『상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템 II』에 제시하여 이 보고서에서는 생략한다.

(3) 2019년 운용 결과

2019년 한 해 동안, 새로 추가된 1개월 선행 강수 예보(Figure 150)와 1~3개월 선행 기온 예보를 제공하였다. 결과에는 1983년부터 최근까지의 월별 ESPreSSO 예측 분포와 예측된 삼분위 범주, 그리고 관측값 및 평년 범위가 기본적으로 제공된다. 자연어 예보 기능을 통해 우리나라 강수/기온 예보에 관련된 주요 인자 및 해당 시기 주요 인자의 특이 활동을 보고하게 되며, 삼분위 예측 값과 함께 결정론적 예보값이 제공된다. 또한 전체 예측 성능 뿐만 아니라 하인드캐스트 및 포어캐스트 기간의 예측 성능이 제공된다. 부차적으로 우리나라를 10개의 권역으로 나누어 권역별 예보를 제공하고 있는데, 각 권역에 예보된 삼분위 대표 범주를 지도를 통해 제공하고 있다.

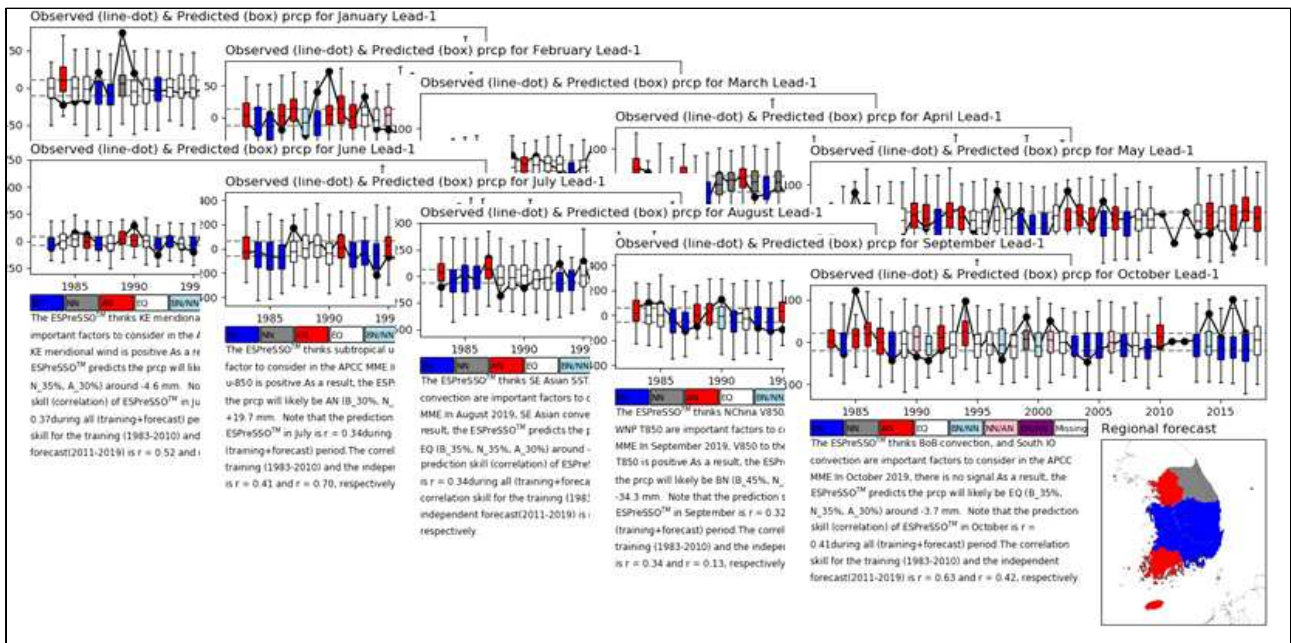


Figure 150. Newly added 1-month lead precipitation outlooks generated by ESPreSSO-KR for 2019. Upper panels in the outlook show forecasted monthly precipitation distribution (error-bars) and the observed monthly precipitation averaged over 49 stations (lines). The natural language outlook is found at the bottom left corner, while the regional outlooks are provided at the bottom right.

이와 함께, 1~3개월 선행 기온 예측 정보도 생산하여 제공하였다. 그러나, 기온 예측 인자는 2018년까지 사용되던 다중모델앙상블 모델 세트를 기반으로 선정되어있고, 새로운

모델 세트가 반영되지 않아 예측 성능이 일부 불안정한 모습을 보이고 있다.

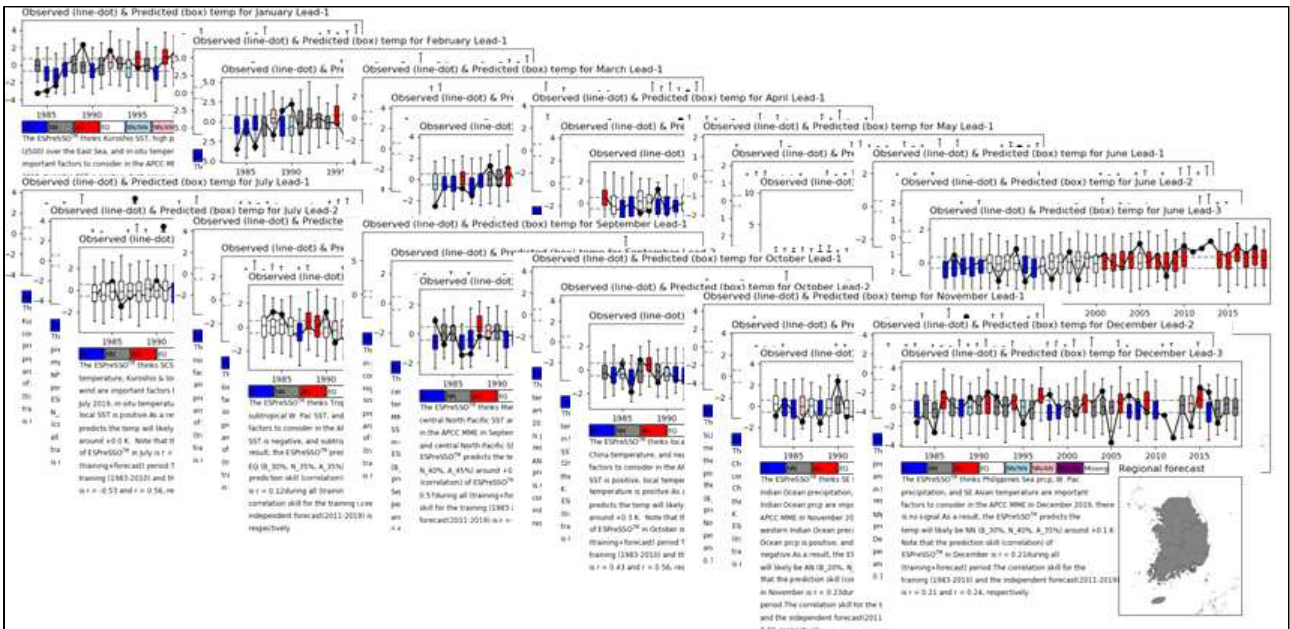


Figure 151. Same as Figure 150, but for 1–3 month lead temperature outlook.

(4) 예측 성능 평가

이번에 추가된 1 개월 선행 강수 예측은 2019 년 현업 하인드캐스트 모델 세트를 기반으로 작성하였다. 그러나 다중모델앙상블 예측의 강수 예측 성능 자체가 높지 않아, 예측 인자 선택부에서 안정적인 예측 인자 선정이 어려움이 있었던 것으로 보고되었다. 특히 예측 선행 시간이 길어질수록 인자 선정이 불안정해지는 모습을 보이므로, 현 시점에서 강수 예측 선행 기간 확장을 추천하지는 않는다. 다만, 2019 년 운용 결과 기존 예측 모형에 비해서 강수 예측 성능도 나쁘지 않은 것으로 보인다(Figure 152). 그러나 기본 예측 성능이 높지 않고(Figure 22), 월별로 불안정한 경우가 많아 2019 년 예측 결과는 실제 예측 성능을 판단하는 데 참고 자료로만 사용하기를 권장한다.

2019		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct
관측	중위편차	-15.3	0.8	-14.7	9.9	-50.0	-19.0	-53.1	-112.9	44.5	129.8
	%	0.7	51.9	22.7	57.7	13.1	38.8	20.0	12.3	66.7	100.0
	분위	-	0	-	0	-	0	-	-	+	+
ESPreSSO	편차	-2.0	-3.9	0.0	22.9	10.5	-4.6	19.7	-9.4	-34.3	-3.7
	분위	-/0/+	-/0	-/0/+	+	+	-/0/+	+	0	-	-/0/+

Figure 152. Observed and predicted monthly precipitation. When observed category falls into the ESPreSSO prediction, it is colored green; near-miss yellow, and wrong red.

반면, 지난 3 년간의 ESPreSSO-KR 운용 결과 1~3 개월 선행 기온 예측의 경우 상당히 안정적이고 높은 예측 성능을 보여준 바가 있다(2017, 2018 년 상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템 연구보고서 참조). 올해부터 다중모델앙상블의 참여 모델 세트가 변경되는 등 기반 시스템에 큰 변화가 있었으나, 이번 연구 범위에는 이에 대한 근본적인 대응이 포함되지 못하였다. 2019 년 ESPreSSO-KR의 예측은 예전 참여 모델 세트에 기반한 예측 인자를 이용하여 이루어졌는데, 지난 한 해 동안의 예측 성능은 준수한 편이었으나(Figure 153), 일부 계절에서 예측이 매우 불안정해지는 모습을 보이고 있다(Figure 154). 이에 따라 향후 ESPreSSO의 안정적인 운영을 위해서는 다중모델앙상블 참여 모델 세트의 변경 등에 대한 근본적인 대응, 즉, 새로운 인자의 선정 혹은 객관 접근에 의한 인자 업데이트 기능이 필요한 것으로 판단된다.

2019		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct
관측	분위	+	+	+	0	+	0	0	+	+	
		1.4	1.8	1.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.5
	+1	+	+	+	+	+	+	-/0/+	0	0	+
	+2		1.1	0.3	0.4	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4
ESPreSSO	+2		+	0/+	+	-/0/+	+	-/0/+	-/0/+	0/+	+
	+3			0.6	0.4	0.0	0.2	0.0	-0.1	0.4	0.4
				+	+	-/0/+	+	-/0/+	-/0/+	+	+

Figure 153. Observed monthly mean temperature and 1~3 month lead predictions from ESPreSSO-KR.

2019		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Period
ESPreSSO	+1	0.48	0.38	0.63	0.16	0.41	0.08	-0.08	0.51	0.56	0.45	0.03		HINDCAST
		0.32	0.10	0.76	0.80	-0.37	0.16	0.30	0.18	0.34	0.48	0.17		FORECAST
		0.36	0.33	0.68	0.31	0.39	0.36	0.03	0.47	0.56	0.53	0.11		TOTAL
	+2		0.16	0.49	0.00	0.36	0.13	-0.47	0.15	0.56	0.36	-0.40	0.08	HINDCAST
			0.06	0.77	0.31	-0.57	0.21	0.45	0.21	0.56	0.73	0.52	0.33	FORECAST
			0.14	0.59	0.14	0.33	0.38	-0.15	0.24	0.57	0.45	-0.10	0.10	TOTAL
	+3			0.35	-0.08	0.46	0.12	-0.77	-0.59	0.63	0.43	0.28	0.12	HINDCAST
				0.75	0.56	-0.62	0.04	0.85	0.26	0.63	0.67	0.44	0.23	FORECAST
				0.47	0.16	0.45	0.36	-0.49	-0.33	0.61	0.49	0.35	0.13	TOTAL

Figure 154. Temporal correlation skills of ESPreSSO. Note that the predictors are identified from the former MME configuration.

(5) 요약 및 결론

지난 연구를 통해 개발된 ESPreSSO에 1 개월 선행 강수 예측 모듈이 추가 개발되었고, 베이스 통계 기반 예측 모듈이 개발되어 강수 및 기온 예측에 이용되었다. 1 개월 선행 강수 및 1~3 개월 선행 기온 예측 정보를 생산, 제공하였다. 예측 성능과 관련하여서는 기반 역학 모델의 한계로 인해 강수 예측 인자 선정은 상대적으로 불안정한 경우가 많았으나, 2019 년 예측 결과는 비교적 높은 예측 성능을 보여주었다. 그러나 선행 시간이 길어질 경우 예측 인자 선정이 한층 더 불안정해질 것으로 판단된다. 한편, 기온 예측의 경우 1~3 개월 선행 예측이

제공되었으나, 새로 바뀐 다중모델앙상블 참여 모델 세트가 반영되지 않는 등의 문제가 있었다. 이로 인해 일부 계절의 예측 성능이 불안정한 모습을 보이고 있어, 변화된 환경에 대한 근본적인 대응이 필요할 것으로 보인다. 기술적으로는 새로운 망분리 네트워크 환경에 맞춘 개발이 연구 범위에 포함되지 않아 현업 운영 지원에 어려움이 있었고, 향후 안정적인 운영을 위해서는 새로운 환경에 최적화된 코드 정리가 필요할 것으로 판단된다.

다. 1개월 전망 지원을 위한 예측 콘텐츠 개발

(1) 연구 배경

APCC에서는 기상청의 1개월 전망 지원을 위하여 매주 수요일 10시에 화상회의를 통하여 예보토의에 참여하고 있다. 이때 APCC는 WMO 장기예보 선도센터의 계절내 예측자료를 활용하여 기상청 1개월 전망 예보에 맞춘 추가적인 예측 시스템을 운영하고 있다. WMO 장기예보 선도센터의 계절내 예측 시스템에 관한 내용은 이 보고서의 “4.나. WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템 시범운영” 항목에서 따로 자세하게 설명하였다. 기상청 1개월 전망을 위한 예측 시스템은 2017년 8월부터 매주 화요일에 지난주 예측결과에 대한 검증과 동아시아 영역에 맞춘 MME 및 개별모델의 예측결과를 생산하여 PPT 형식의 발표자료 (Figure A5)로 기상청에 제공하고 있으며, 이 자료를 바탕으로 매주 수요일 1개월 전망을 위한 예보토의에서 발표를 수행한다.

이 연구에서는 기상청에 제공하고 있는 계절내 MME 예측결과의 현업 예보에 대한 활용도를 높이기 위해 기상청 예보관의 의견 등을 수렴하여 콘텐츠를 추가로 개발하였다. 먼저 우리나라 기온 예측을 위한 해면기압 예측결과를 추가하였으며, 우리나라 주변 지역의 변수 및 모델별 일단위 시계열 예측정보를 추가하였다. 또한 MME 예측뿐만 아니라 개별모델의 예측정보를 표 형식으로 추가하였으며 해당 모델들의 hindcast에 대한 검증 결과도 추가하였다.

(2) 우리나라 기온 예측을 위한 해면기압 예측결과 추가

우리나라 기온 예측을 위해 계절내 예측모델을 활용하여 다양한 예측정보를 생산해오고 있다. 여기에 기상청은 대기하층의 기압계의 흐름이 우리나라의 기온에 일정부분 영향이 주는 것으로 보고 해면기압 예측결과를 일단위로 상세히 파악할 수 있는 예측정보를 요청하였다. 따라서 이 연구에서는 비교적 넓은 영역에서 해면기압 예측의 일변화를 한눈에 볼 수 있는 hovmoller diagram 형식으로 표출방법을 선정하였으며, 표출 영역을 선택하기 위한 몇 가지 예측성 비교를 수행하였다.

Figure 155는 계절별로 우리나라 기온과 모델의 MSLP 예측결과와의 상관관계를 살펴본 것이다. 검증의 기준이 되는 기온 값은 기상청 ASOS 60개 지점을 평균한 값을 사용하였으며, 예측자료로는 ECMWF hindcast의 mean sea level pressure (MSLP) 변수를 사용하였다. 두 자료의 기후값 계산을 위한 평균 기간은 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템의 공통 hindcast 기간인 1999년부터 2010년으로 하였다. ECMWF hindcast 자료는 2018년에 생성된 결과만을 사용하였으며, 분석은 March-April-May (MAM)와 June-July-August (JJA), September-October-November (SON) 기간별로 나누고, 1일 예측과 8일, 15일 예측결과 각각에 대하여 수행하였다. 겨울철 기간에 대한 분석도 수행하였으나 MAM 기간과 유사하여 이 보고서에서는 생략하였다.

MSLP 변수의 1일 예측결과와 우리나라 기온과의 관계를 보면, MAM과 SON 기간에는 한반도 남서쪽으로 음의 상관관계가, 한반도 남동쪽으로는 양의 상관관계를 보이는 것으로

나타났다. 8일 예측과 15일 예측결과를 보면 예측기간이 길어지면서 모델 예측성 자체가 감소함으로써 우리나라 기온과의 상관관계가 전반적으로 줄어들지만, 한반도 남서쪽에 위치한 양쯔강 부근 지역의 음의 상관관계는 다른 지역보다 계속 높음을 알 수 있다. 반면 JJA 기간에서는 다른 계절과는 반대의 양상을 보여준다. 한반도 남쪽지역으로는 전반적으로 양의 상관관계를 보이며, 특히 한반도 남동쪽에 위치한 일본 부근으로 예측 선행시간에 관계없이 비교적 높은 양의 상관관계가 나타났다. 이것은 JJA 기간에는 북서태평양 고기압의 발달이 우리나라 기온에 많은 영향을 주는 것과 관련이 깊다.

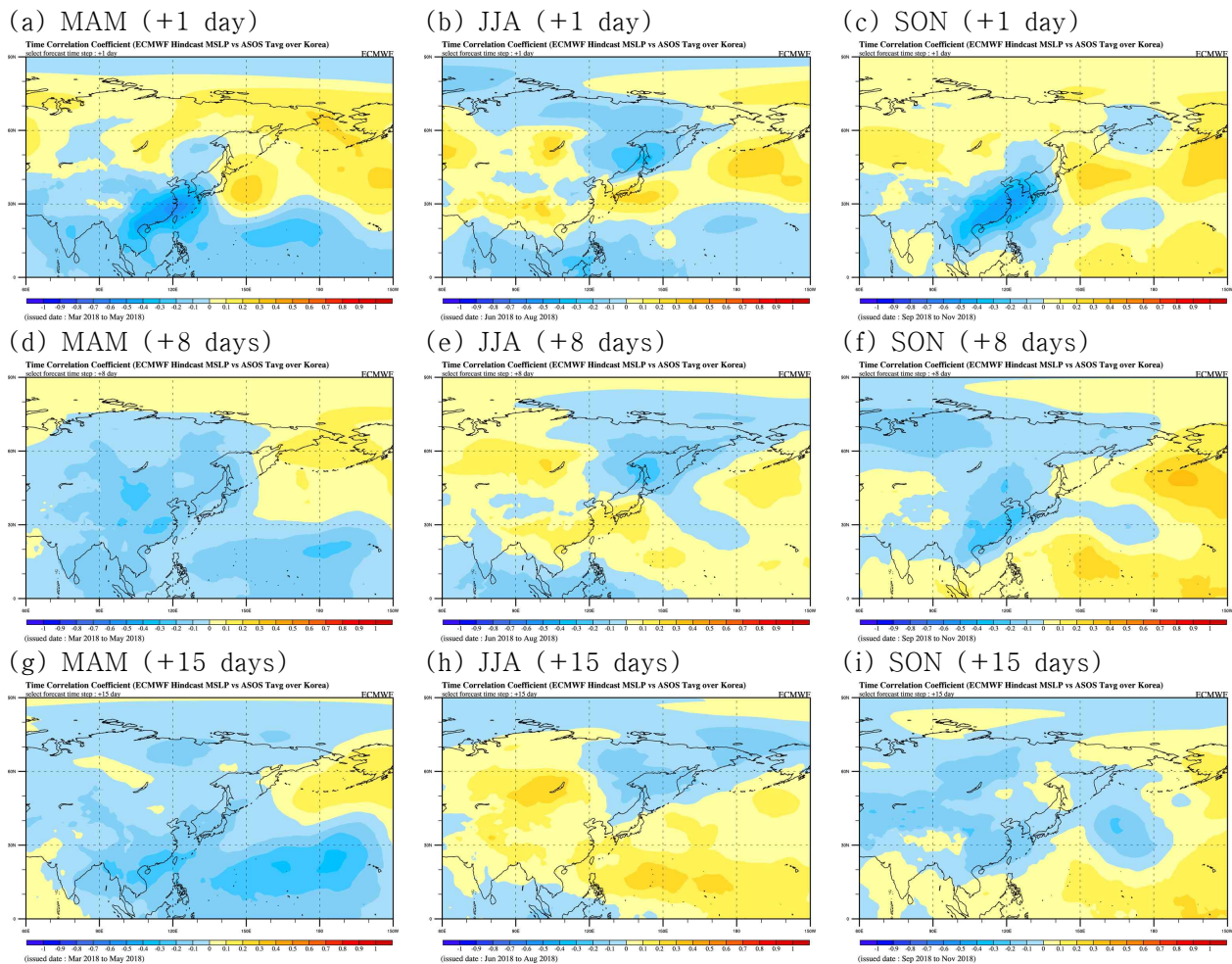


Figure 155. Correlation coefficient between ECMWF hindcast MSLP and ASOS temperature each MAM, JJA and SON.

하지만 여름철을 제외하고 나머지 계절에서는 바이칼호 부근에 중심을 둔 대륙고기압의 발달과 우리나라 기온과의 상관관계가 높을 것으로 예상되었지만 Figure 155에서 보인바와 같이 한반도 북쪽보다는 한반도 남서쪽의 음의 편차값이 여름철을 제외하고 우리나라 기온과 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 이것은 크게 다음 4가지 정도의 원인으로 해석하였다. 첫째, 대륙고기압이 중국 남부지역까지 확장하는 사례일 경우 우리나라에 북서풍이 보다 강하게

불어 기온의 하락폭이 크며, 이러한 사례에서는 모델의 예측성도 비교적 높을 것이다. 둘째, 대륙고기압 발달과 한반도 기온변화까지 2~3일의 시간 지연이 있으며, 이 분석에서는 동시상관을 계산한 것이므로 바이칼호 부근의 기압계와 우리나라 기온과의 상관관계가 한반도 부근보다 낮게 나올 수 있다. 셋째, 대륙고기압의 발달뿐만 아니라 한반도 남쪽으로 기압골이 통과하는 경우 우리나라 기온이 상승하므로 이러한 영향이 상관관계에 추가되었다. 마지막으로 고위도의 내륙지역으로 갈수록 해면기압의 예측성이 떨어져서 실제 관측결과와의 상관관계가 낮아지는 영향도 있을 것이다.

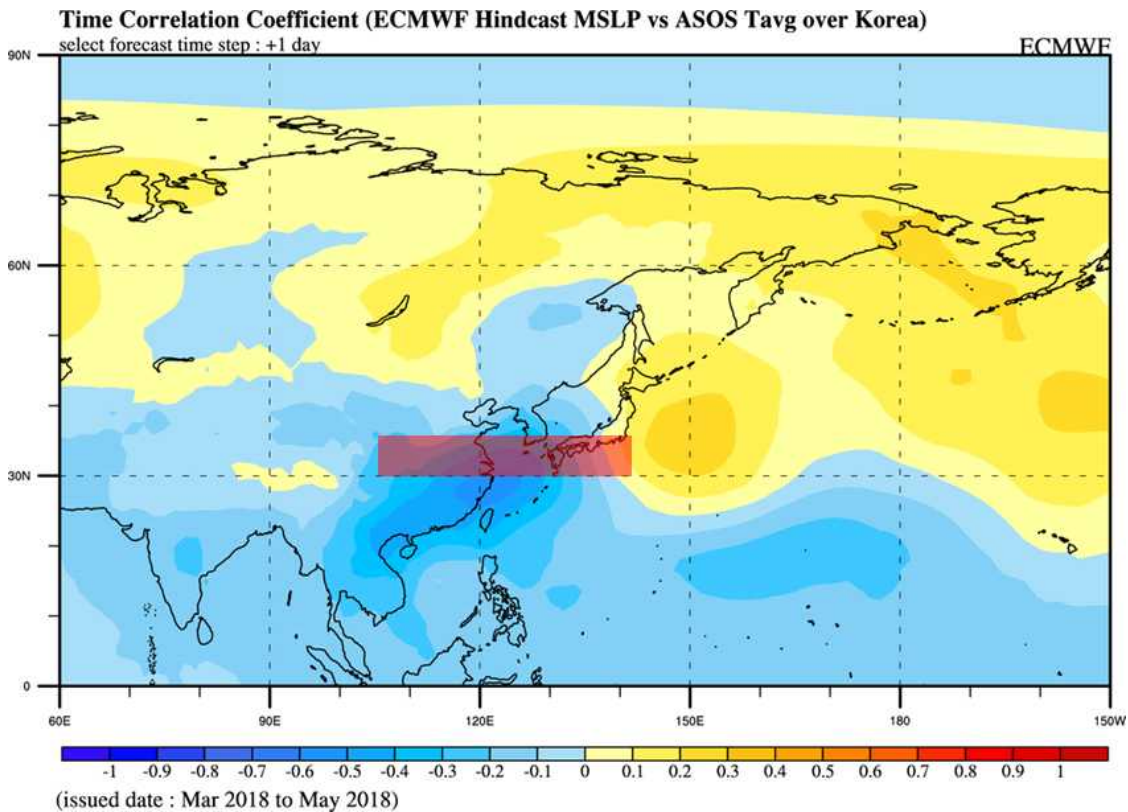


Figure 156. Analysis domain for Hovmoller diagram (Red box).

이러한 분석을 바탕으로 Figure 156에서 붉은색으로 표시한 영역(30~36° N, 105~141° E)에 대해 time-longitude Hovmoller diagram을 포출하였다. Figure 156은 ECMWF 모델에서 예측한 MSLP 변수의 해당영역 Hovmoller diagram과 함께 동일 모델의 우리나라 영역 5개 지점 평균한 T2M 변수의 예측결과와 실제 기상청 ASOS 기온 평균결과를 같이 비교한 것이다. 예시로 보인 자료의 예측기간은 2018년 5월 7일 예측한 결과이다. Figure 156에서 옅은 푸른색으로 채색된 5월 19일부터 5월 26일까지 예측된 영역을 보시면 T2M 예측결과는 계속해서 우리나라 지역으로 기온이 높을 것으로만 예측하지만 실제 관측에서는 기후값 대비 기온이 낮거나 비슷한 사례였다. 하지만 신규로 추가한 이 Hovmoller diagram 예측결과를 보면, 한반도 남서쪽으로 양의 편차값을 보이며, 앞서 분석한 결과를 통해 우리나라 기온이 우리나라 기온이 낮을 수도 있음을 예측할 수 있다. 이처럼 1개월 전망 시 예보관에게 새로운

예측정보로서 이러한 콘텐츠가 활용될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

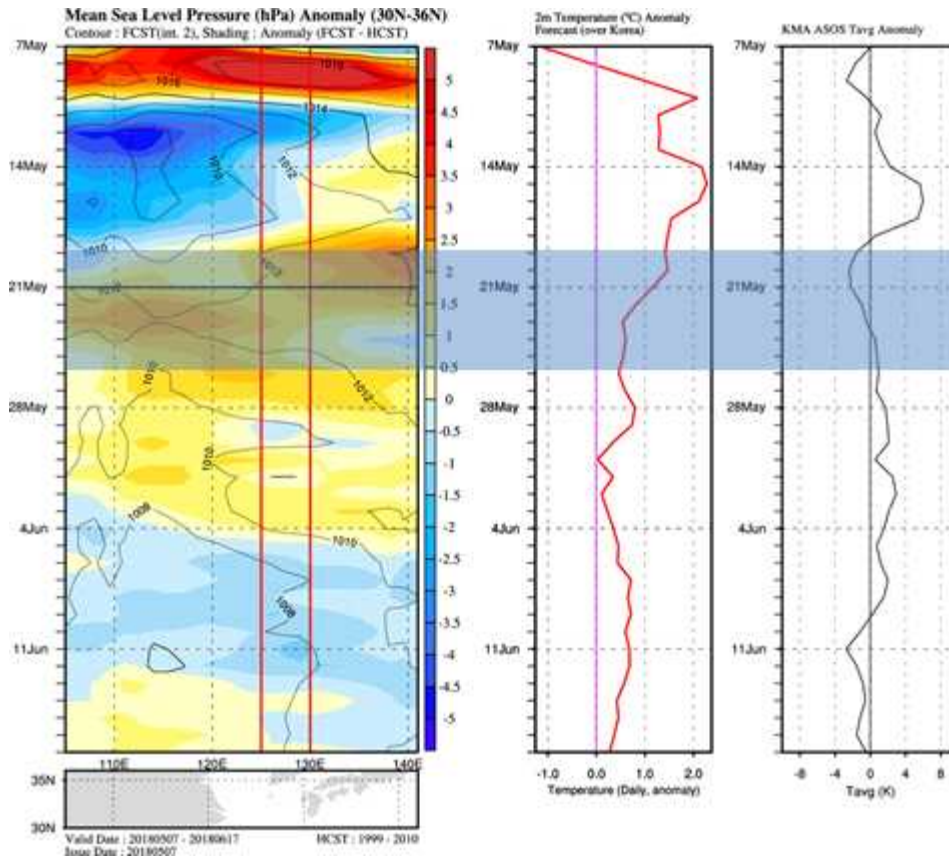


Figure 157. (left) Time-longitude Hovmoller diagram of ECMWF forecast on 7 May 2018, (center) ECMWF T2M forecast over Korea area and (right) KMA ASOS temperature.

최종적으로 한반도 남쪽 지역의 MSLP Hovmoller diagram 예측결과는 Figure 157과 같은 양식으로 1개월 전망을 위한 예보도의 시 제공하고 있다. 여러 모델 중 예측성이 비교적 우수한 SCM과 ECMWF의 예측결과를 제시하며, 각각의 모델의 1주전 예측결과를 함께 제시하여 예측결과의 변화 경향도 알 수 있게 하였다. 이를 통해 예보관은 한반도 남쪽의 하층 기압계 흐름에 대한 모델의 예측결과를 손쉽게 파악할 수 있을 것으로 기대한다.



예측결과

❖ 기압계 예측 (MSLP)

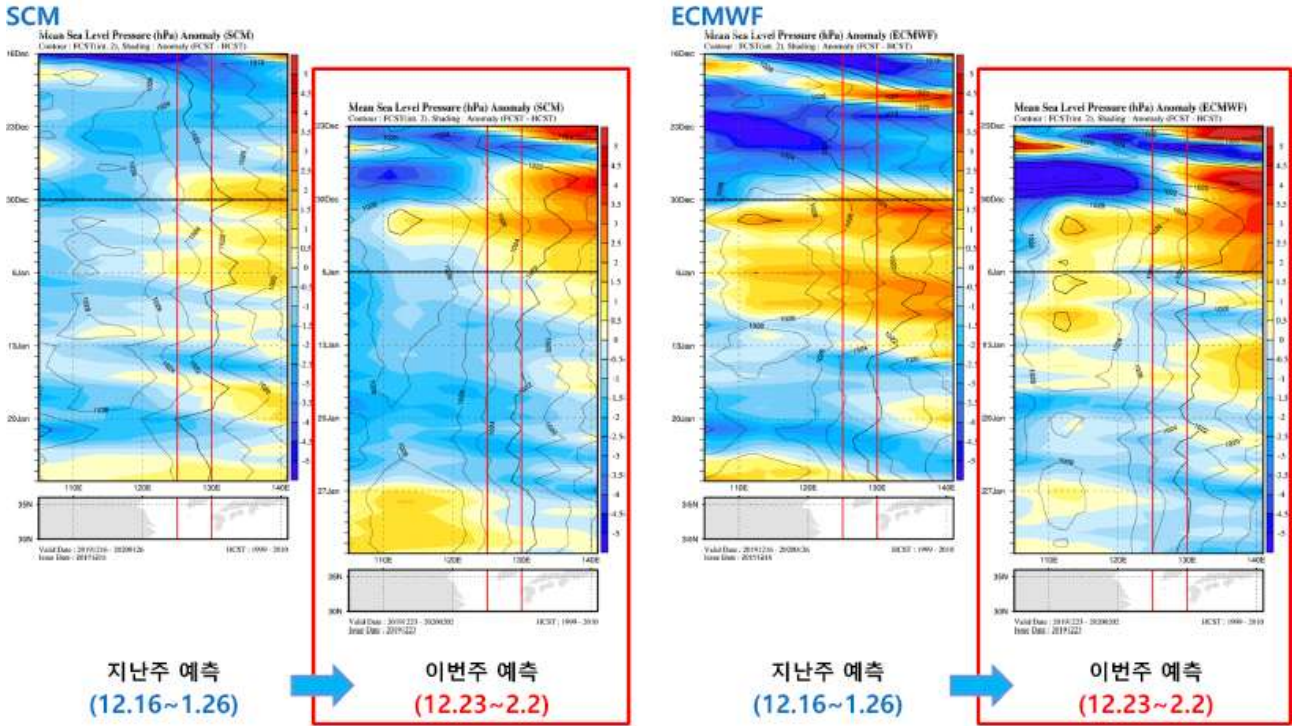


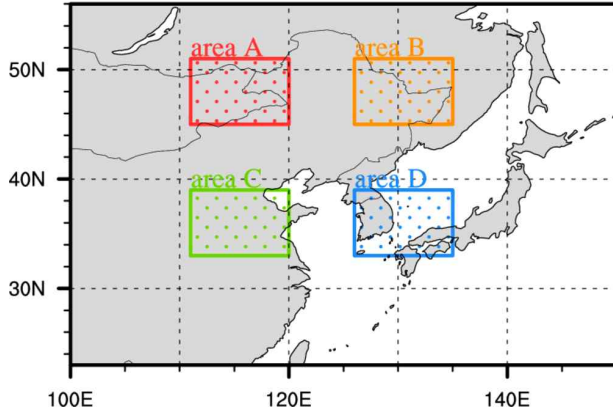
Figure 158. Sample of time-longitude Hovmöller diagram

(3) 우리나라 주변 지역 변수 및 모델별 일단위 시계열 예측결과 추가

앞서 추가한 한반도 남쪽 지역의 MSLP Hovmöller diagram 예측결과와 마찬가지로 기상청으로부터 한반도 주변지역의 일단위 시계열 예측정보를 요청하였다. 이에 기상청에서 선정한 4개 지점(Figure 159(A))에 대하여 geopotential height at 500hPa (Z500)와 MSLP, 2 meter temperature (T2M) 변수를 영역평균 한 예측결과를 일단위 시계열로 표출하였다. 다만 겨울철에는 대륙고기압의 발달을 모니터링하기 위해 한 개 지점을 Figure 159(B)와 같이 이동하였다.

예측결과는 Figure 160과 같은 양식으로 제공한다. 이때 WMO의 7개 모델 각각의 예측결과는 각기 다른 색상의 실선으로 표시하였으며, SCM 예측결과는 양의 편차와 음의 편차에 따라 각각 붉은색과 푸른색 계열로 채색하였다. 이를 통해 한반도 주변의 예측결과를 모델 및 변수별로 한눈에 예측경향을 파악할 수 있다.

(a) all the year except winter
Selected Area



(b) winter season
Selected Area

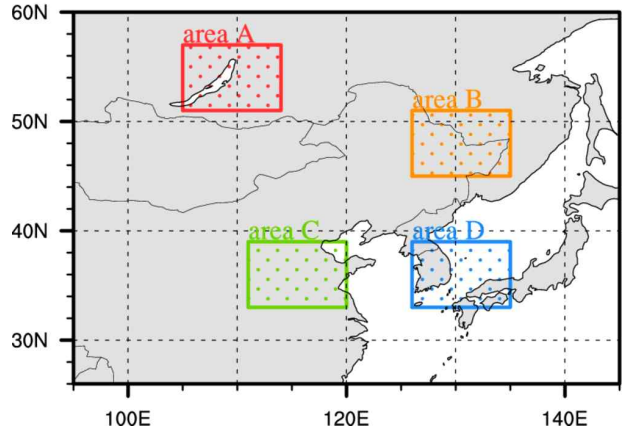


Figure 159. Selected area for daily time series forecast

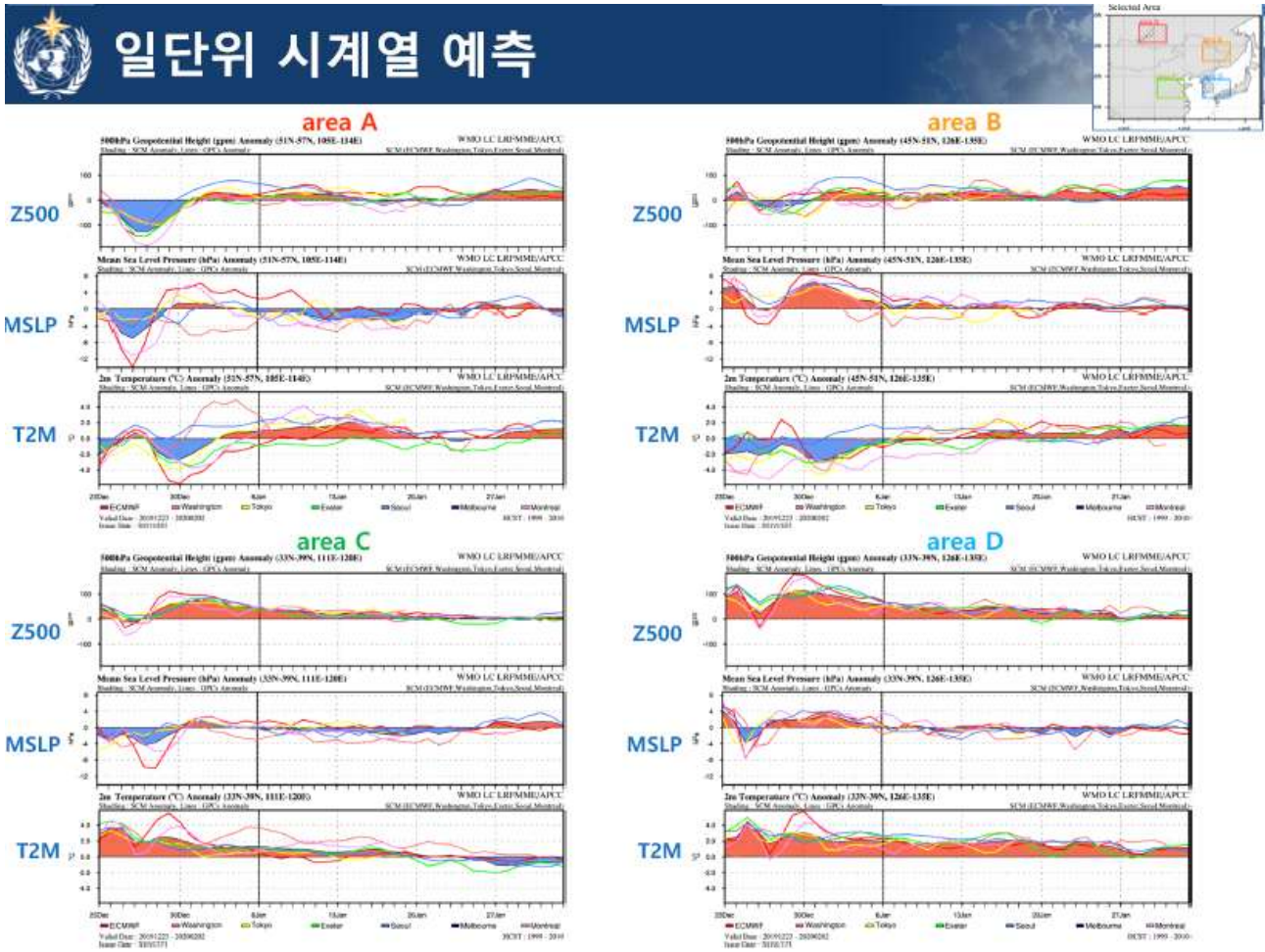


Figure 160. Sample of daily time series forecast

(4) PMME 및 개별 모델의 확률예측 결과 비교자료 추가

기존 1개월 전망을 위한 계절내 예측자료 제공시 발표 자료의 공간 부족으로 PMME와 ECMWF, Tokyo 모델의 예측결과만을 제시하여왔다. 하지만 실제 MME에 참여하는 7개 모델(Beijing 모델은 자료수신 시점이 예측결과 발표보다 늦어서 제외함)의 예측결과를 추가로 제공하기 위해 새로운 표출방법으로 예측결과를 생산하게 되었다. 7개 모델과 PMME 확률예측 결과를 한눈에 볼 수 있도록 표 형식으로 예측결과를 제시하며, 3분위 확률 예측 결과 및 확률의 크기에 따라 색상의 종류를 달리하여 표출한다. Figure 161은 신규로 추가된 PMME와 개별모델 확률예측 결과를 제공하는 양식의 예시이다. 기온과 강수량 변수의 예측결과에 대하여 한 페이지에 표시하였으며, 지난주 예측결과 또한 같이 제시하여 예측의 변화 경향을 파악할 수 있게 하였다.

PMME 및 개별모델 확률예측 결과

❖ 지난주 기온 예측 (12.16~1.26)

Model	1w (12/16 - 12/22)	2w (12/23 - 12/29)	F1 (12/30 - 01/05)	F2 (01/06 - 01/12)	F3 (01/13 - 01/19)	F4 (01/20 - 01/26)
PMME	0/5/95	10/31/59	18/24/58	14/28/58	17/26/58	12/31/57
ECMWF	00/100	22/7/71	27/28/45	18/22/60	9/31/60	13/35/52
Washington	00/100	8/54/39	0/6/94	2/21/76	25/39/36	
Tokyo	0/2/98	10/32/58	28/26/47	18/35/47		
Exeter	0/8/92	1/19/60	27/26/47	16/37/47	19/14/66	7/31/61
Seoul						
Melbourne	2/14/84	26/30/44	13/18/69	12/24/64	13/19/68	15/26/59
Montreal	0/6/94	12/23/65	13/41/46	20/26/54		

❖ 지난주 강수량 예측 (12.16~1.26)

Model	1w (12/16 - 12/22)	2w (12/23 - 12/29)	F1 (12/30 - 01/05)	F2 (01/06 - 01/12)	F3 (01/13 - 01/19)	F4 (01/20 - 01/26)
PMME	3/1/94	28/34/38	27/28/45	23/32/45	21/36/43	20/33/47
ECMWF	4/21/76	18/42/40	31/25/44	27/26/47	22/27/51	16/29/55
Washington	26/91	40/44/16	12/38/50	11/20/69	26/38/36	
Tokyo	1/3/95	24/35/41	34/28/38	35/30/35		
Exeter	6/31/64	26/26/48	33/28/39	19/49/32	25/38/37	11/41/47
Seoul						
Melbourne	1/3/95	36/39/25	21/22/58	21/34/45	10/41/49	32/28/39
Montreal	1/14/83	21/20/59	31/28/41	27/33/40		

❖ 이번주 기온 예측 (12.23~2.2)

Model	1w (12/23 - 12/29)	2w (12/30 - 01/05)	F1 (01/06 - 01/12)	F2 (01/13 - 01/19)	F3 (01/20 - 01/26)	F4 (01/27 - 02/02)
PMME	0/8/90	4/22/74	11/23/66	9/25/67	11/32/57	22/28/50
ECMWF	0/1/99	2/11/87	15/22/62	6/38/56	10/33/57	24/28/47
Washington	0/25/73	2/26/71	16/30/54	2/14/84	6/22/71	
Tokyo	0/0/96	11/23/66	12/20/68	15/34/51		
Exeter	00/100	00/39/81	5/27/88	9/19/72	26/29/45	23/33/44
Seoul	0/2/98	1/29/70	4/9/87	10/28/62	4/43/54	18/24/58
Melbourne						
Montreal	2/23/73	6/26/69	12/32/55	9/17/74		

❖ 이번주 강수량 예측 (12.23~2.2)

Model	1w (12/23 - 12/29)	2w (12/30 - 01/05)	F1 (01/06 - 01/12)	F2 (01/13 - 01/19)	F3 (01/20 - 01/26)	F4 (01/27 - 02/02)
PMME	14/24/61	22/25/54	22/28/50	22/28/49	22/25/52	28/34/38
ECMWF	4/22/74	10/19/71	17/19/64	25/33/43	18/25/56	35/30/36
Washington	8/32/60	19/49/32	21/38/41	15/31/54	30/16/54	
Tokyo	3/1/94	32/22/46	27/26/46	33/23/44		
Exeter	24/20/56	19/29/51	25/26/49	18/29/54	14/29/56	26/28/46
Seoul	32/29/39	21/16/63	13/20/67	16/33/51	26/30/44	24/43/34
Melbourne						
Montreal	12/34/53	29/12/59	31/36/32	28/22/50		

Figure 161. Sample of PMME and each models probabilistic forecast table

(5) 개별 모델의 예측성 검증 결과 추가

개별 모델의 예측결과를 모두 제공하면서 각 모델들의 예측성에 대한 정보 또한 제공할 필요성이 생겼다. 이에 각 개별 모델의 매주 예측 시 사용되는 기후값을 계산하기 위한

hindcast 자료를 검증하여 제시하고자 하였다. 검증방법으로는 Anomaly Correlation Coefficient (ACC)와 Percent Correct (PC), Probability Of Detection (POD), Success Ratio (SR)을 사용하며, 검증 대상인 hindcast 자료는 공통기간인 1999년부터 2010년까지 12년으로 한다. ACC 계산에서 검증 기준은 ERA-Interim 자료를 사용하였으며, 기후값 계산 기간은 hindcast 자료와 동일한 1999년부터 2010년까지로 하였다. 반면, PC와 POD, SR 계산의 검증 기준은 기상청의 ASOS 45개 지점 평균값 자료를 사용하였으며, 기후값 계산기간은 실제 예보의 대상이 되는 기후기간인 1981년부터 2010년으로 하였다. ACC 검증은 동아시아 영역($10\sim 60^{\circ}$ N, $80\sim 180^{\circ}$ E)에 대하여 수행하였으며, 개별모델의 앙상블 평균한 값을 사용하였다. PC와 POD, SR 계산 시 모델의 hindcast 결과는 우리나라 영역에 포함되는 5개 지점 평균한 값으로 구한 확률예측 결과를 사용하였다. PC 검증은 hindcast 기간 전체에서 각각의 앙상블 멤버가 예측한 결과와 실제 관측결과의 비율로 계산하였으며, POD와 SR 검증은 평년보다 높거나 비슷, 낮은 경우 각각에 대하여 계산하였다. 다만, POD와 SR 표출 시에는 공간의 부족으로 예측결과와 일치하는 경우에 대한 정보만을 제공한다.

Figure 162는 개별모델의 hindcast 검증결과를 제공하는 양식 샘플이다. 기온과 강수량에 대한 검증결과를 한 슬라이드에 제공하며, 개별모델 7개 및 4개의 검증방법과 6주간의 예측기간 모두에 대한 검증을 함께 표시하였다. 그에 따라 각 모델 및 예측기간에 다른 예측성의 변화를 쉽게 비교 분석하기 어려워서 검증결과의 값의 크기에 따라 채색을 달리하여 표시하였다. 채색의 기준은 3주 예측 결과에 대한 검증 값을 2018년 기준으로 1년간 평균하였을 때 가장 높은 수치 기준으로 참고하였으며, 0.1씩 증가함에 따라 채도를 높여서 표시하였다.



개별모델 Hindcast 검증 결과

기온 검증결과 (Hindcast)

Model	Method	1w (12/23 - 12/29)	2w (12/30 - 01/05)	F1 (01/06 - 01/12)	F2 (01/13 - 01/19)	F3 (01/20 - 01/26)	F4 (01/27 - 02/02)
ECMWF	ACC	0.83	0.48	0.28	0.08	0.04	0.15
	PC	0.55	0.47	0.42	0.42	0.35	0.38
	HSS	0.32	0.21	0.12	0.13	0.00	0.08
	POD/SR	AN: 0.73 / 0.42	AN: 0.64 / 0.47	AN: 0.45 / 0.44	AN: 0.44 / 0.63	AN: 0.35 / 0.54	AN: 0.33 / 0.54
Washington	ACC	0.77	0.53	0.22	0.22	-0.11	-
	PC	0.54	0.58	0.48	0.35	0.33	-
	HSS	0.29	0.38	0.18	0.01	0.01	-
	POD/SR	AN: 0.59 / 0.36	AN: 0.83 / 0.50	AN: 0.62 / 0.53	AN: 0.42 / 0.53	AN: 0.29 / 0.53	-
Tokyo	ACC	0.77	0.51	0.33	0.06	-	-
	PC	0.60	0.35	0.37	0.43	-	-
	HSS	0.39	0.00	0.01	0.13	-	-
	POD/SR	AN: 0.70 / 0.37	AN: 0.48 / 0.44	AN: 0.36 / 0.41	AN: 0.49 / 0.71	-	-
Exeter	ACC	0.83	0.64	0.27	0.12	0.08	0.01
	PC	0.79	0.48	0.27	0.42	0.39	0.35
	HSS	0.67	0.20	-0.09	0.11	0.10	0.01
	POD/SR	AN: 0.76 / 0.89	AN: 0.64 / 0.32	AN: 0.25 / 0.23	AN: 0.49 / 0.50	AN: 0.37 / 0.69	AN: 0.33 / 0.59
Seoul	ACC	0.84	0.56	0.21	0.20	-0.01	0.14
	PC	0.78	0.58	0.39	0.44	0.31	0.33
	HSS	0.66	0.36	0.08	0.16	-0.03	0.04
	POD/SR	AN: 0.78 / 0.78	AN: 0.83 / 0.50	AN: 0.42 / 0.38	AN: 0.40 / 0.46	AN: 0.29 / 0.60	AN: 0.33 / 0.50
Melbourne	ACC	-	-	-	-	-	-
	PC	-	-	-	-	-	-
	HSS	-	-	-	-	-	-
	POD/SR	-	-	-	-	-	-
Montreal	ACC	0.79	0.47	0.28	0.20	-	-
	PC	0.54	0.42	0.27	0.31	-	-
	HSS	0.31	0.11	-0.14	-0.03	-	-
	POD/SR	AN: 0.88 / 0.54	AN: 0.58 / 0.50	AN: 0.19 / 0.19	AN: 0.33 / 0.50	-	-

강수량 검증결과 (Hindcast)

Model	Method	1w (12/23 - 12/29)	2w (12/30 - 01/05)	F1 (01/06 - 01/12)	F2 (01/13 - 01/19)	F3 (01/20 - 01/26)	F4 (01/27 - 02/02)
ECMWF	ACC	0.56	0.28	0.18	0.13	0.07	0.09
	PC	0.48	0.38	0.33	0.33	0.31	0.32
	HSS	0.23	0.07	0.00	-0.00	-0.03	-0.02
	POD/SR	AN: 0.47 / 0.59	AN: 0.24 / 0.18	AN: 0.36 / 0.27	AN: 0.36 / 0.27	AN: 0.35 / 0.52	AN: 0.35 / 0.43
Washington	ACC	0.37	0.24	0.12	0.07	0.00	-
	PC	0.33	0.46	0.35	0.44	0.42	-
	HSS	-0.00	0.19	0.03	0.16	0.12	-
	POD/SR	AN: 0.25 / 0.31	NN: 0.38 / 0.38	AN: 0.42 / 0.31	AN: 0.58 / 0.44	AN: 0.46 / 0.69	-
Tokyo	ACC	0.44	0.09	0.12	0.13	-	-
	PC	0.42	0.30	0.43	0.35	-	-
	HSS	0.12	-0.05	0.15	0.02	-	-
	POD/SR	AN: 0.40 / 0.30	AN: 0.27 / 0.20	AN: 0.40 / 0.40	AN: 0.30 / 0.30	-	-
Exeter	ACC	0.57	0.31	0.08	0.01	0.07	0.11
	PC	0.49	0.31	0.39	0.48	0.35	0.33
	HSS	0.23	-0.04	0.09	0.21	0.02	0.00
	POD/SR	AN: 0.46 / 0.46	AN: 0.29 / 0.21	AN: 0.21 / 0.11	AN: 0.52 / 0.39	AN: 0.29 / 0.36	AN: 0.33 / 0.50
Seoul	ACC	0.52	0.27	0.08	-0.01	-0.01	0.04
	PC	0.50	0.39	0.33	0.28	0.28	0.25
	HSS	0.25	0.08	-0.00	-0.08	-0.08	-0.13
	POD/SR	AN: 0.59 / 0.50	AN: 0.56 / 0.42	AN: 0.50 / 0.25	AN: 0.22 / 0.17	AN: 0.27 / 0.33	NN: 0.33 / 0.25
Melbourne	ACC	-	-	-	-	-	-
	PC	-	-	-	-	-	-
	HSS	-	-	-	-	-	-
	POD/SR	-	-	-	-	-	-
Montreal	ACC	0.41	0.12	0.12	0.06	-	-
	PC	0.40	0.40	0.38	0.25	-	-
	HSS	0.09	0.09	0.06	-0.13	-	-
	POD/SR	AN: 0.30 / 0.38	AN: 0.33 / 0.25	NN: 0.30 / 0.38	AN: 0.33 / 0.25	-	-

- **ACC : Anomaly Correlation Coefficient**
 - 검증 영역 : 동아시아(80~180°E, 10~60°N)
 - 검증 기준 : ERA Interim (climate : 1999~2010)
- **PC : Percent Correct** (정확도, 전체 예측 개수 중에서 맞힌 개수의 비율)
 - 검증 기준 : ASOS 45개 지점 평균 (climate : 1981~2010)
- **HSS : Heidke Skill Score** (우연히 맞힐 수 있는 경우를 제외한 예보 적중률)
 - 검증 기준 : ASOS 45개 지점 평균 (climate : 1981~2010)
- **POD/SR : Probability Of Detection** (탐지율, hit/obs) / **Success Ratio** (성공률, hit/fcst)
 - 검증 기준 : ASOS 45개 지점 평균 (climate : 1981~2010)

	기온			강수			
ACC	≥ 0.4	≥ 0.3	≥ 0.2	ACC	≥ 0.4	≥ 0.3	≥ 0.2
PC	≥ 0.6	≥ 0.5	≥ 0.4	PC	≥ 0.6	≥ 0.5	≥ 0.4
HSS	≥ 0.3	≥ 0.2	≥ 0.1	HSS	≥ 0.3	≥ 0.2	≥ 0.1
POD/SR	≥ 0.6	≥ 0.5	≥ 0.4	POD/SR	≥ 0.6	≥ 0.5	≥ 0.4

15

Figure 162. Sample of APCC 1 month forecast verification table

라. 북극 진동과 엘니뇨-남방진동 복합 영향에 따른 우리나라 겨울철 기온 주별 예측 특성 분석

(1) 연구배경

최근 기후변화에 따라 한반도에도 이상기후 현상이 빈번하게 발생함에 따라(관계부처합동, 2018, pp.189-191) 사회·경제적 피해 최소화를 위해 1개월 혹은 계절 내 시간규모 예측에 대한 사회적 수요가 높아지고 있으며, 세계적으로도 기상/기후 모델의 주별 예측성 향상에 관심이 높아지고 있다(WMO, 2012). 단기예측과 계절예측의 사이에 해당하는 계절 내 예측은 매우 흥미롭고 도전적인 시간규모이다. 수치 예측 모델을 활용한 기상예보는 초기 조건에 민감하고 예측성능이 시간에 따라 급격히 감소하게 되어 7~10일 이후의 예측에 대하여 유의미한 정보를 제공하는데 어려움이 있다(White et al., 2017). 또 해양과 같이 느리게 변화하는 기후시스템의 영향을 받기에 계절 내 예측의 시간규모는 상대적으로 짧기 때문에 기후예측 모델로 계절 내 예측 수행하는 데는 한계가 있다(Vitart, 2014). 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)는 계절 내 예측 기술의 향상과 기상예보와 기후예보간의 시간적 공백을 채우기 위해 2013년부터 Subseasonal-to-Seasonal (S2S) 예측 프로젝트를 수행하고 있으며 그 소주제 중 하나로 ‘MJO와 원격상관’이 있다. 원격상관은 광범위한 영역에서 반복적으로 나타나는 대규모 대기 순환 구조로 지면/해양 경계조건과의 상호작용을 통해 수개월 혹은 경년 이상의 시간규모에서도 나타나기는 하지만(Häkkinen et al., 2011) 일반적으로 1~3주의 시간규모를 가지므로 S2S 프로젝트에서 예측인자로 주목하고 있다(Feldstein, 2000).

북극진동과 엘니뇨-남방진동은 동아시아 겨울철 기후예측에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 잘 알려져 있다. 첫 번째로 북극진동이 음의 위상일 경우 양의 유라시아 원격상관 패턴(EU pattern)의 발달이 강화되어(Wallace and Gutzler, 1981; Liu et al., 2014) 동아시아 고위도 지역으로 한파 발생이 잦아진다(Liu et al., 2014; Wang and Zhang, 2015a, 2015b). 두 번째로 북극진동은 시베리아 고기압의 발달을 통해 동아시아 겨울 몬순에 영향을 주기도 하고(Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002; Jeong and Ho, 2005), 우랄산맥과 주변 지역으로 블로킹 발생을 야기하거나(Cheung et al., 2012; Cohen et al., 2014; Takaya and Nakamura, 2005), 혹은 시베리아 고기압과 우랄 블로킹이 동시에 동아시아 겨울철 한파발생에 영향을 주기도 한다(Ding, 1990; Gong and Ho, 2002; Lee and Jhun, 2006; Tang et al., 2013; Overland et al., 2015; Luo et al., 2016). 세 번째로 음의 북극진동은 극 소용돌이와 함께 제트기류의 약화를 야기하여 제트기류의 사행이 강해지면서(Thompson and Wallace, 2001; Screen and Simmonds, 2014; Francis and Skific, 2015; Francis and Vavrus, 2015) 동아시아 골이 남하하게 되고, 이로 인해 동아시아 지역에 강한 한파를 발생시키거나(Chen et al., 2003, 2005; Takaya and Nakamura, 2013), 극 소용돌이가 변위되거나 나뉘어져(Mitchell et al., 2013) 성층권 기온 아노말리가 대류권으로 남하하면서 동아시아에 한파 발생 가능성을 높인다(Baldwin et al., 2003; Baldwin and Dunkerton, 1999, 2001; Nakagawa and Yamazaki, 2006; Wang and Chen, 2010; Park et al., 2011, 2014; Song et al., 2017; Yoshida and Yamazaki, 2011; Wei et al., 2015; Wen et al., 2013). 엘니뇨 기간에는 온난한 열대 중앙 태평양의 영향으로 대류권

하부에서 태평양-동아시아 원격상관이 발생하여 중양태평양에서 저기압성 순환, 북서태평양에서 고기압성 순환, 그리고 동북아시아에서 저기압성 순환이 나타나 온난한 남서풍이 동아시아로 유입되며 동아시아 한파의 강도와 빈도를 줄이는 역할을 하고(Li, 1990; Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000; Sakai and Kawamura, 2009), 라니냐일때는 열대 서태평양의 높은 해수면온도가 대류활동을 강화시켜 동아시아에서 동서방향 순환을 유도함으로써 시베리아 지역에서 공기가 가라앉는 운동이 활발해지기 때문에 한파의 강도가 강해지는 경향이 있다(Chen et al., 2000).

Cheung et al. (2012)은 북극진동과 엘니뇨-남방진동이 in-phase인 경우 우랄-시베리아 블로킹이 적고(맑고), 시베리아 고기압이 약화(강화)되어 동아시아에 높은(낮은) 기온이 나타나지만, out-of-phase인 경우에는 시베리아 고기압의 강화와 우랄-시베리아 블로킹 활동의 상관성이 약화된다고 하였고, Chen et al. (2013)은 겨울철 북극진동과 엘니뇨-남방진동이 out-of-phase일 때, 북극진동은 중국 북부, 엘니뇨-남방진동은 중국 남부의 기온과 강수에 영향을 준다고 밝혔다. 그 밖의 선행연구들에서도(Park and Ahn, 2016; Huang et al., 2017) 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 복합영향을 연구한 바 있지만 월 평균 혹은 계절 평균의 time-scale에 대하여 분석하였다는 데에 한계가 있다 이 연구에서는 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 복합 영향을 주별로 분석하여 우리나라 겨울철 1개월 전망 기온 예측에 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 활용성을 더하여 예측성을 향상시키는데 기여하고자 한다.

(2) 자료 및 방법

재분석 자료 기반 분석에서는 1983년부터 2018년까지 NCEP/NCAR Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) 자료의 500 hPa 지위고도, 해면기압, 850 hPa 바람장을 이용하였고, 모델 자료 기반 분석에서는 WMO S2S 프로젝트를 위해 수집되고 있는 ECMWF S2S 자료를 이용하였다. ECMWF S2S 자료는 주별 평균된 Multi-Model Ensemble (MME) 예측결과 생산을 위해 수평해상도는 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, Hindcast 기간은 1999년부터 2010년으로 표준화 되었다. 또한 우리나라 겨울철 기온 자료는 1973년 이후 연속적으로 관측 값이 존재하고 기후특성이 상이한 제주지역을 제외한 전국 45개 ASOS 지점을 평균한 1983년부터 2018년까지의 일평균 기온을 사용하였다. 모든 자료는 계절 내 주별 기온 특성을 살펴보기 위해 주별 평균하여 분석하였다.

북극진동지수는 1979~2000년 동안의 북위 20도 이상 월별 북반구 해면기압 자료를 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF)로 분석하여 첫 번째 모드로 정의한다(Thompson and Wallace, 1998, 2001). 관측 주별 북극진동 지수는 NOAA Climate Prediction Center (CPC)의 일별 북극진동 지수를 주별 평균하는 것으로 하였고, 모델의 주별 북극진동지수 산출을 위해 북위 20도 이상 일별 북반구 해면기압을 leading 패턴에 투영하여 일별 북극진동 지수를 계산하고 주별 평균 하였다. 엘니뇨-남방진동 지수는 Niño 3.4 지역($5^{\circ} \text{S}-5^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \text{W}-170^{\circ} \text{W}$)에 대해 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature v2 (OISSTv2) (Reynolds et al., 2002) 자료로부터 해수면온도 아노말리의 주별 평균을 구하고 이를 이동평균 하는 것으로 하였다.

모델의 북극진동 모의 성능을 평가하기 위해 모델 hindcast 자료로 생산한 주별 북극진동지수를 관측 주별 북극진동지수와 시계열 상관분석(Temporal Correlation Coefficient;

TCC)을 수행하였다. 두 시계열 자료간의 상관계수는 수식[1]과 같이 구할 수 있으며, N은 샘플의 개수를 나타낸다. 또 엘니뇨-남방진동 모의 성능은 모델 hindcast 자료의 Niño 3.4 지역 평균 해수면 온도를 계산하고 패턴 상관분석(Pattern Correlation Coefficient; PCC)과 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 구하는 것으로 평가하였다. 평균 제곱근 오차는 수식 [15]와 같이 구할 수 있다.

$$TCC = [1. / (N-1)] * \text{sum} [(X(t)-Xave) * (Y(t)-Yave)] / (Xstd*Ystd) \quad [14]$$

$$RMSE = \sqrt{MSE(\theta_1, \theta_2)} = \sqrt{E((\theta_1, \theta_2)^2)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2} \quad [15]$$

북극진동과 엘니뇨-남방진동의 복합영향을 고려하기 위해 각 지수의 임계값을 ±0.5로 하여 사례를 구분하였고, 이에 따른 주별 대기순환장 특성을 조사하였다. 각 기후지수가 임계값을 초과한 주를 lead 0으로 하여 lead 4까지 주별 대기순환장의 특성을 살펴보았을 때, 특징적인 패턴이 lead4부터 lead 0까지 4주간 유의하게 지속되는 4가지 경우(El Nino + Positive AO (EP), La Nina + Negative AO (LN), Positive AO (PA), Negative AO (NA))를 선정하였다(Figure 163).

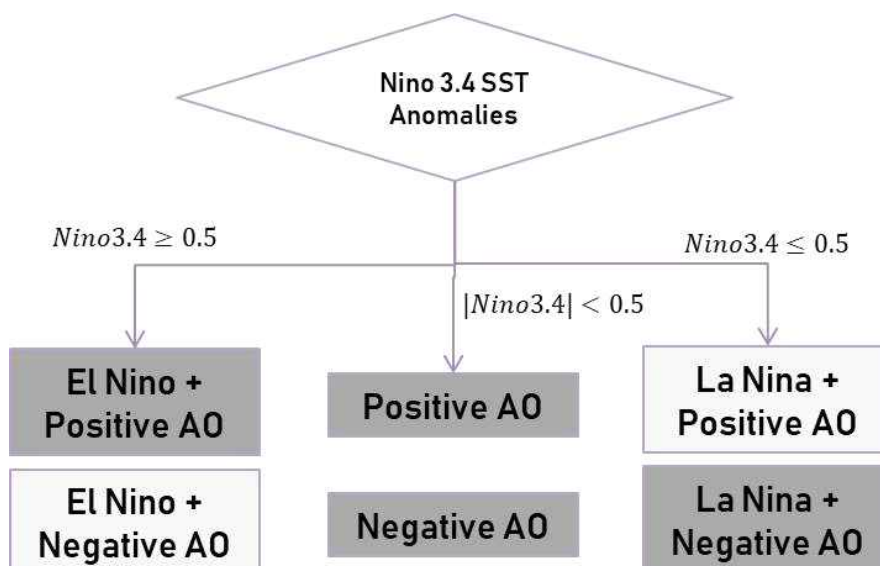


Figure 163. A schematic diagram for taking the role of AO and ENSO into consideration.

(3) 재분석 자료에서 기후인자별 대기순환장 특성

먼저 북극진동의 영향이 없을 때 엘니뇨-남방진동에 따른 겨울철 500 hPa 지위고도 편차의 합성장에서는 엘니뇨인 경우에는 일본과 우리나라를 포함하여 북서태평양을 중심으로 양의 지위고도 편차가, 알래스카 만을 중심으로 음의 지위고도 편차가 나타나고, 라니냐인 경우에는 알류산 열도 남쪽 북태평양을 중심으로 양의 지위고도 편차, 알래스카와 동북아시아 지역으로 음의 지위고도 편차가 나타난다. 한편 엘니뇨-남방진동의 영향이 없을 때 북극진동에 따른 겨울철 500 hPa 지위고도 편차의 합성장을 살펴보면 양(음)의 북극진동인 경우 북극지역에 음(양)의 지위고도 편차가, 바이칼 호부터 북태평양으로 양(음)의 지위고도 편차가 나타난다(e.g. Higgins et al., 2001).

두 기후인자의 복합영향에 의한 합성장을 Figure 164부터 167까지 나타내었다. 첫 번째로 El Niño + Positive AO (EP)가 나타난 lead 0주의 합성장(Figure 164)를 살펴보면 열대 태평양과 북미 서안으로 강한 양의 해수면온도 편차가 나타나고, 우리나라 인근 해역과 일본 남쪽으로 양의 해수면온도 편차가 나타난다. 상층에서는 두 기후인자에 의해 한반도 상공에 나타나는 양의 지위고도 편차가 중첩되면서 바이칼 호 부근에서 우리나라와 일본까지 보다 강한 양의 지위고도 편차가 나타난다. 하층에서는 우랄지역으로는 저기압성 편차가 나타나고 필리핀 동쪽 해상과 북서태평양을 중심으로 약한 고기압성 편차가 나타나 아열대 태평양의 온난한 공기가 두 고기압성 편차의 영향으로 북상하면서 우리나라에 남동풍으로 유입된다. 두 번째로 La Niña + Negative AO (LN)가 나타난 lead 0주의 합성장(Figure 165)를 살펴보면 필리핀 동쪽 해상에서 약한 양의 해수면온도 편차가, 우리나라 인근 해역과 일본 남쪽으로 약한 음의 해수면 온도 편차가 나타나며 열대 중앙-동태평양에는 La Niña의 영향으로 강한 음의 해수면온도 편차가 나타난다. 상층에서는 북극지역에 강한 양의 지위고도 편차가 나타나고, 바이칼 호 부근에서 북서태평양까지 두 기후인자에 의한 음의 지위고도 편차가 중첩되면서 보다 강한 음의 지위고도 편차가 나타난다. 하층에서는 북극지역에 강한 고기압성 편차가 유라시아 대륙으로 남하하며 알류산열도 부근으로 강한 저기압성 편차가 나타나 우리나라로 강한 북서풍이 유입된다. 세 번째로 Positive AO (PA)가 단독으로 나타난 lead 0주의 합성장(Figure 166)을 살펴보면 강한 양의 지위고도 편차가 북태평양에 위치하고 동북아시아 지역이 그 영향에 놓이며, 우랄지역을 중심으로 북극지역 전반적으로 음의 지위고도 편차가 나타난다. 하층에서도 비슷한 형태의 기압배치를 볼 수 있으며 우리나라는 두 기압 편차의 가장자리에 위치하게 되어 약한 남동풍 혹은 남풍계열 바람이 유입된다. 양의 해수면온도가 열대 서태평양에서 북미 서안으로 이어지며 나타나고, 필리핀 동쪽 바다에서 음의 해수면온도, 북태평양은 대부분 양의 해수면온도가 나타난다. 네 번째로 Negative AO (NA)가 단독으로 나타난 lead 0주의 합성장(Figure 167)을 살펴보면 강한 양의 지위고도 편차가 북극전체에 나타나고 음의 지위고도 편차가 시베리아와 북서태평양을 중심으로 각각 나타나고 우리나라는 그 사이에 위치한다. 해수면온도 편차를 살펴보면 PA일 때 보다 cold anomaly의 중심이 다소 북상하여 동해에서 음의 해수면온도 편차가 유의하게 나타나고, 열대 서태평양에서 북미 서안까지 이어지는 양의 해수면온도 편차는 열대 중앙-서태평양으로 국한되며 북서태평양의 양의 해수면온도 편차가 다소 강해지는 모습이 나타난다. 하층에서는 북극해에 강한 고기압성 편차가 나타나고, 태평양 대부분 지역에서 저기압성 편차가, 바이칼호를 중심으로 약한 저기압성 편차가 나타나 우리나라는 뚜렷한 주풍의 영향이 나타나지 않는다.

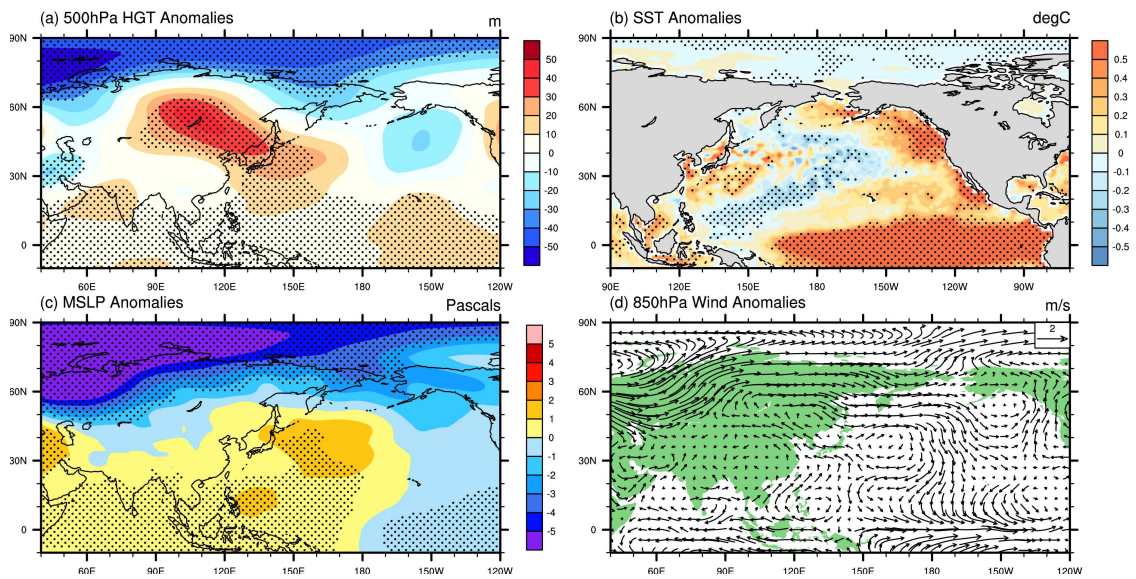


Figure 164. Composite maps at lead-0 of EP case during boreal winter (DJF) for the period of 1983-2018. (a) geopotential height anomalies at 500 hPa, (b) sea surface temperature anomalies, (c) mean sea level pressure anomalies, and (d) wind anomalies at 850 hPa. The dotted area denotes 95% of confidence level.

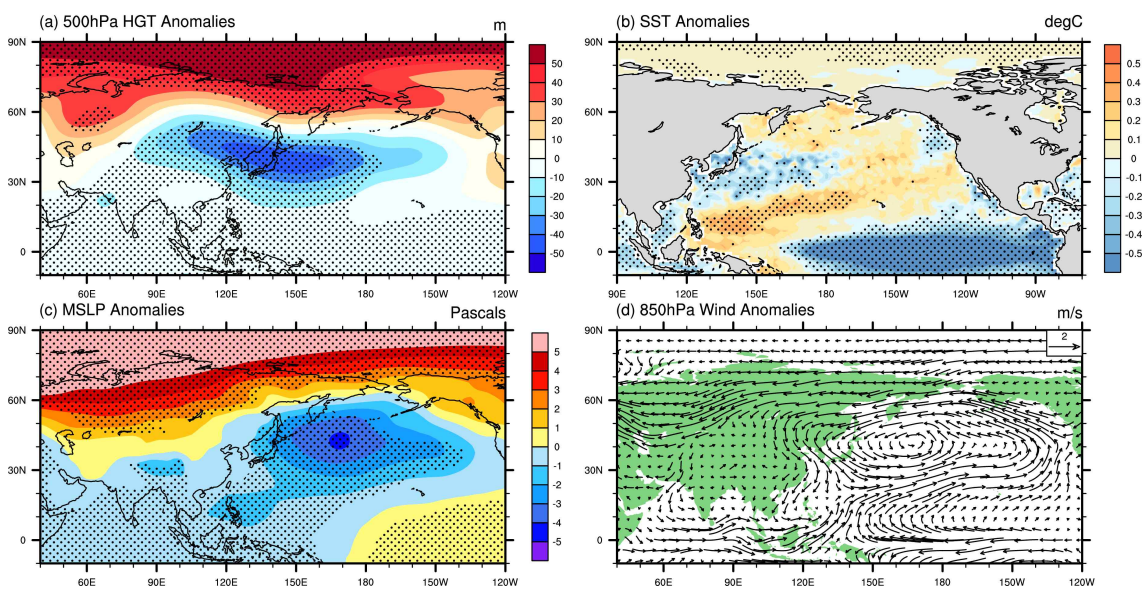


Figure 165. Same figure as in Figure 164 but for LN case.

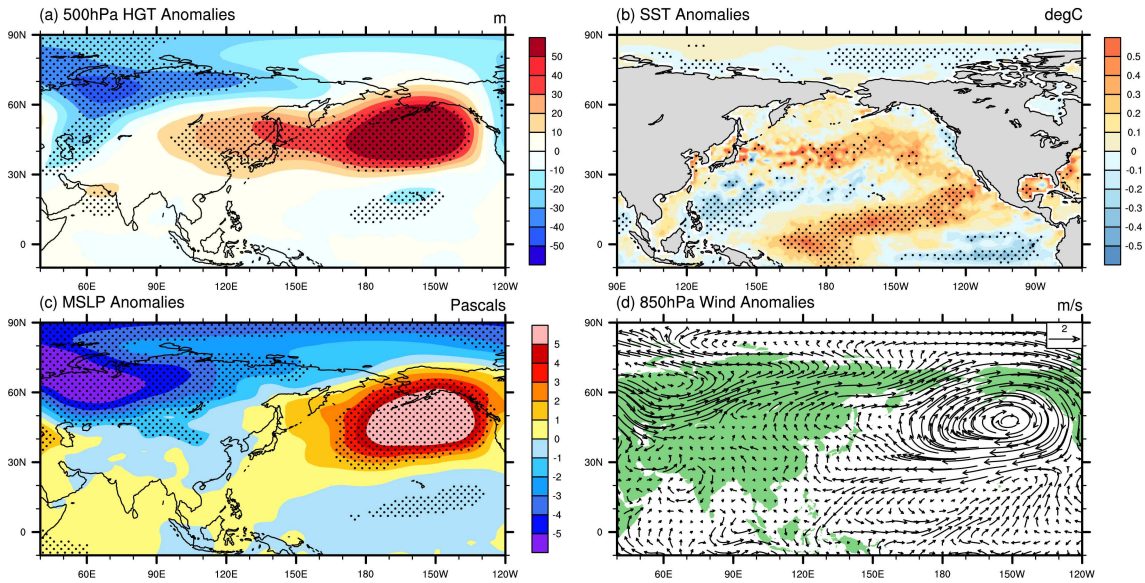


Figure 166. Same figure as in Figure 164 but for PA case.

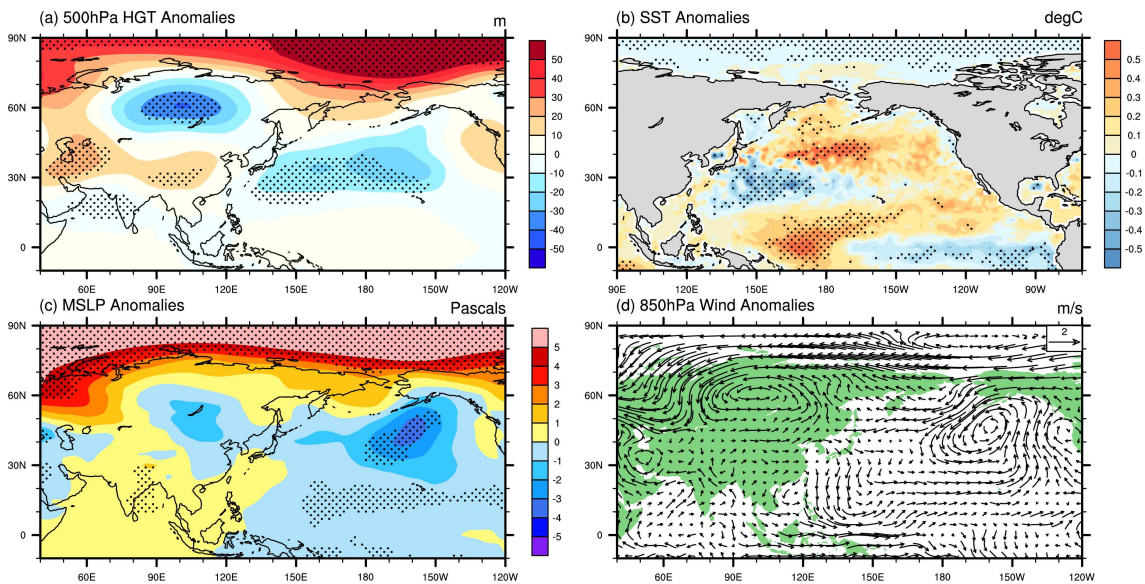


Figure 167. Same figure as in Figure 164 but for NA case.

사례 별 평균 우리나라 기온과 표준 오차를 Figure 168에 나타내었다. EP 사례일 때 한반도 상공으로 나타나는 강화된 양의 지위고도 편차와 남풍계열 바람의 유입으로 인해 평균적으로 온난한 기온 편차가 나타나며, LN 사례일 때에는 강한 음의 지위고도와 북풍계열 바람의 유입으로 평균적으로 한랭한 기온 편차가 나타난다. 이는 동아시아 겨울 몬순이 El Niño일 때 약화되고, La Niña일 때 강하게 나타난다는 선행연구들과도 일치하는 결과이다(Zhang et al., 1996; Tomita and Yasunari, 1996; Ji et al., 1997; Wang et al., 2000). PA 사례일 때에도 평균적으로 온난한 기온 편차가 나타난다. 위 세 경우 모두 표준 오차와 평균 기온 편차가 같은 polarity를 가진다. 반면에 NA 사례일 때에는 한반도 상공으로 뚜렷한

지위고도 편차와 주풍이 나타나지 않으면서 평균 기온편차는 약 0.1도 정도로 나타나고, 표준 오차의 범위가 한랭한 경우와 온난한 경우에 모두 걸쳐 나타난다. 이는 NA 사례일 때 우리나라 기온이 평년보다 높거나 낮은 사례가 모두 존재한다는 것을 의미한다.

NA 사례를 상위와 하위 quartile로 나누어 보다 상세히 살펴보았다. Figure 169는 NA 사례의 상위와 하위 quartile일 때 북극진동 지수와 우리나라 평균 기온을 보여준다. NA 일 때 우리나라 평균 기온이 평년대비 높거나 낮은 것은 북극진동지수의 강도와는 관련이 없음을 알 수 있다. 상위와 하위 quartile일 때 500 hPa 평균 지위고도와 해면기압 아노말리를 Figure 169에 나타내었다. 평균 지위고도를 보면 검은색으로 표시된 하위 quartile(한랭)인 경우에 파란 점선으로 표시된 상위 quartile(온난)인 경우보다 우리나라 상공으로 기압골이 깊어지고 척치해 상공으로의 기압능은 약해지는 모습을 볼 수 있다. 해면기압 아노말리에서는 하위 quartile(한랭)인 경우에 바렌츠 해에 중심을 둔 대륙고기압이 동아시아로 길게 확장하면서 한기가 남하하게 되어 한반도에 한파를 유발하고 상위 quartile(온난)인 경우 바이칼호를 남쪽을 중심으로 저기압이 발달하면서 한반도 서쪽으로는 약한 고기압이 위치하여 남풍이 유입되어 온난한 기온이 나타남을 알 수 있다.

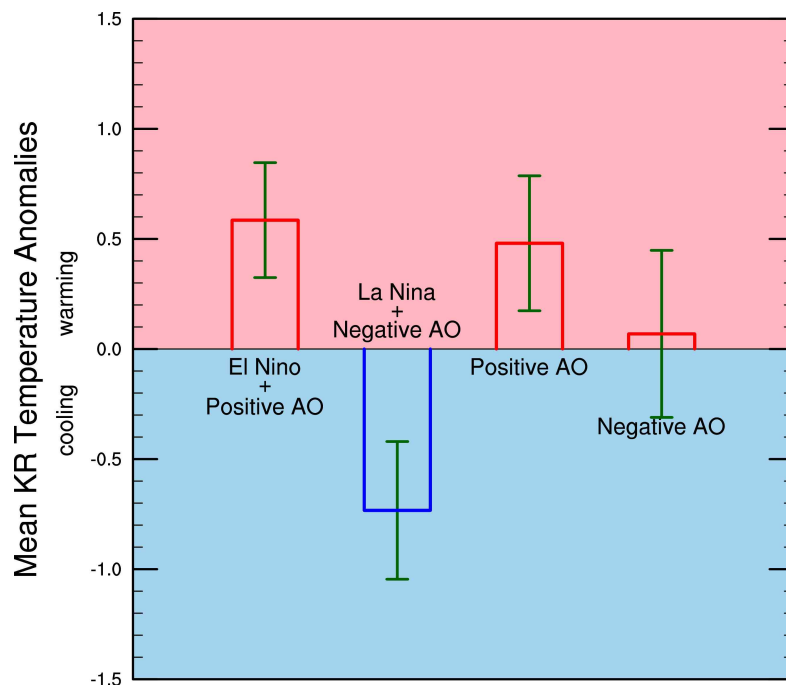


Figure 168. Mean temperature anomalies averaged over 45 stations in Korea with standard errors (green lines) for each case.

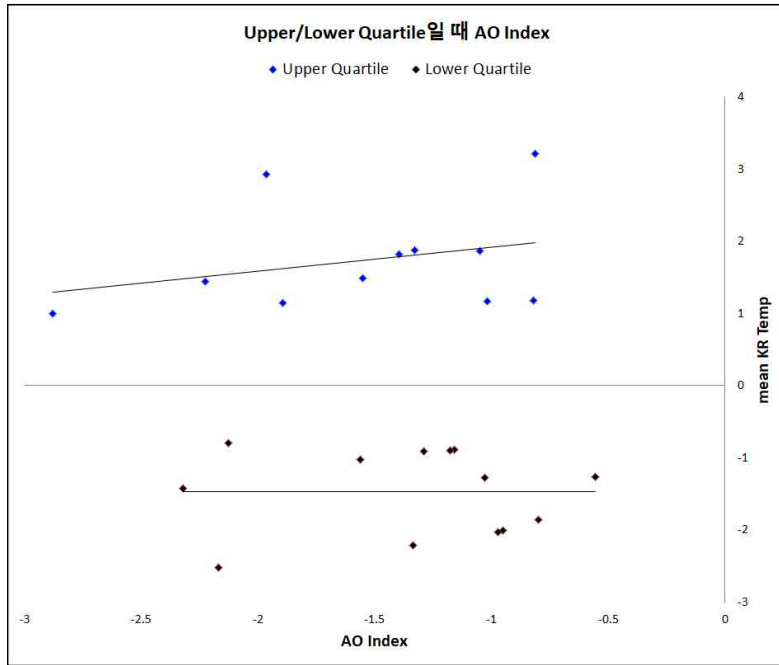


Figure 169. Negative AO index with mean temperature anomalies averaged over 45 stations in Korea.

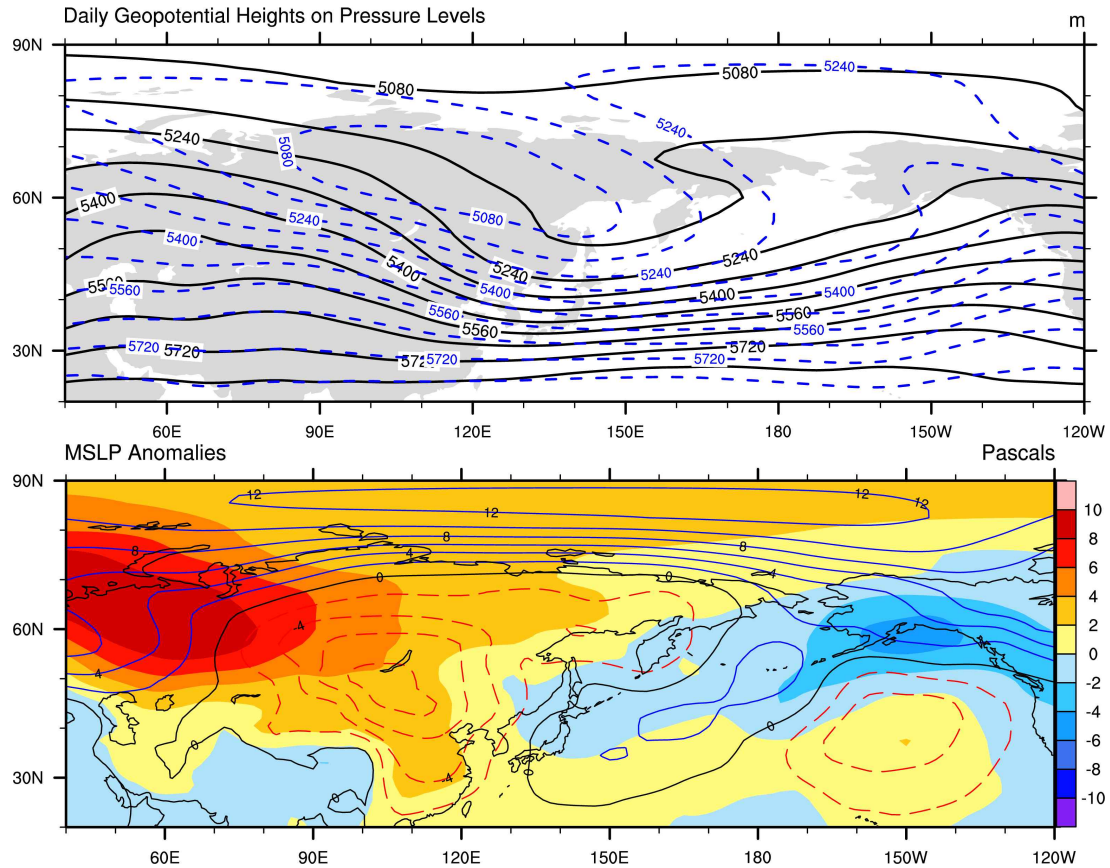


Figure 170. Atmospheric circulation composite maps at lead-0 during negative AO (NA). (Top) mean geopotential height at 500 hPa. Black solid lines denote lower quartile (cold events) and blue dash lines denotes upper quartile (warm events). (Bottom) mean sea level pressure anomalies (shading: lower quartile (cold events), contour: upper quartile (warm events))

(4) 계절 내 예측 모델에서 예측성 평가

재분석 자료를 기반으로 살펴본 기후인자별 대기순환장의 특성이 계절 내 예측모델에서도 유사하게 모의되는지 알아보았다. 계절 내 예측 모델 자료는 WMO의 S2S 프로젝트에서 수집되고 있는 ECMWF Hindcast 자료를 이용하였고 모형의 특징은 Table 22에 나타내었다. 모형의 예측성능 검증에는 재분석 자료 기반 분석에서 사용하였던 NCEP 재분석 자료를 이용하였다.

Table 22. Configuration of ECMWF seasonal-to-subseasonal prediction.

Model	Resolution	Hindcast	Hindcast Length	Hindcast Frequency	Hindcast Ens. size	Hindcast Version
ECMWF	T639/319 L31	on the fly	past 20yrs	2/week	11	v2018

계절 내 예측에서 북극진동 지수의 예측성과 관련된 선행연구들을 살펴보면 겨울철 동안 북극진동 지수는 약 9일에서 14일까지 예측성을 나타낸다고 알려진 바 있다(Black et al., 2017; Zou et al., 2016). 선행연구를 참고하여 ECMWF 계절 내 예측 hindcast에서 lead time에 따른 겨울철 북극진동 지수의 모의 성능을 살펴보았다(Figure 171). 검은 점선은 CPC에서 발표한 북극진동 지수와 재분석 자료로 재생산한 북극진동 지수의 TCC를, 파란(빨간)선은 CPC(재분석 자료)의 북극진동 지수와 ECMWF 계절 내 예측 hindcast 자료로 생산된 북극진동 지수의 TCC를 나타낸다. ECMWF 계절 내 예측 hindcast 자료로 생산된 북극진동 지수는 관측 북극진동지수와 1주 전 예측에서 약 0.8, 2주 전 예측에서 약 0.5, 3주 전 예측에서 약 0.3의 상관성을 나타내며 4주 전 예측부터는 상관계수가 0.2 이하로 낮다. Figure 172에 Niño 3.4 지역의 해수면 온도 편차에 대하여 ECMWF 계절 내 예측 hindcast의 lead time에 따른 예측성을 나타내었다. 파란 박스는 PCC, 빨간 박스는 RMSE를 의미하며 약 4주 전 예측에서까지 상관계수 0.5 이상의 높은 상관성을 나타낸다.

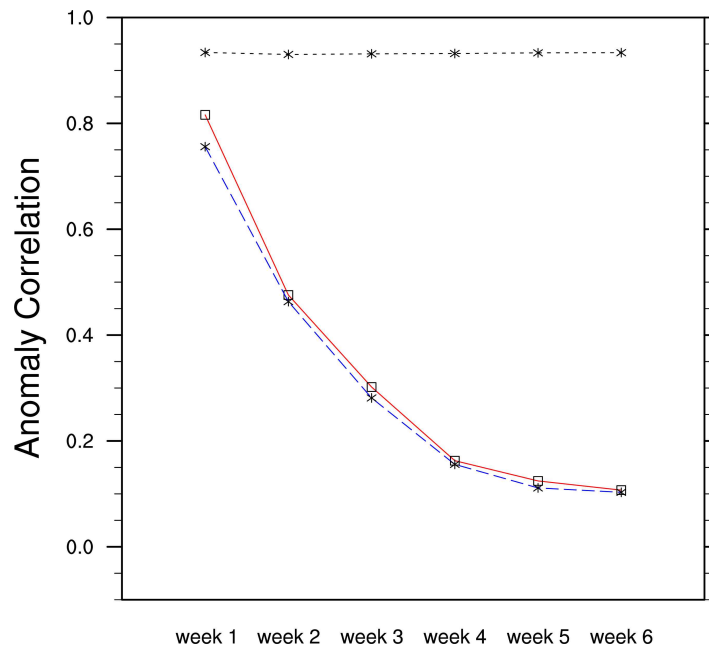


Figure 171. Skill of ECMWF S2S at forecasting the AO index as a function of lead time during winter. The blue (red) line indicates TCC between ECMWF S2S and CPC AO Index (persistence forecast of observation of AO Index). The black line refers to TCC between CPC AO Index and persistence forecast of observation of AO Index.

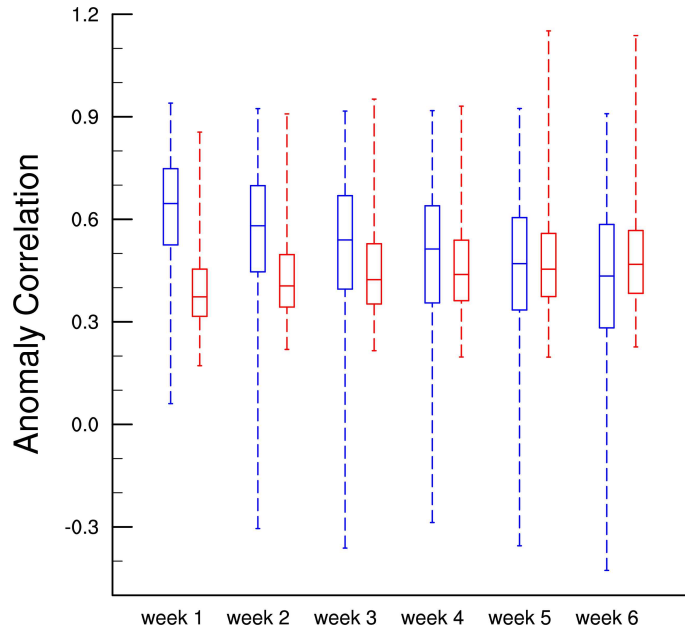


Figure 172. Skill of ECMWF at forecasting SST anomalies over Niño 3.4 region as a function of lead time during winter. The blue (red) line indicates PCC (RMSE).

Figure 173부터 Figure 176은 사례별 ECMWF 계절 내 예측자료의 lead time별 500 hPa 지위고도 아노말리 합성장과 재분석 자료에서 500 hPa 지위고도 아노말리의 합성장을 나타낸다. 각 패널의 오른쪽 상단에 관측과 모델 hindcast의 PCC를 표시하였다. Figure 173은 EP 사례일 때의 합성장을 나타낸 것인데, 시베리아에서 일본 남쪽으로 길게 이어지는 양의 지위고도와 알래스카 만에서 나타나는 양의 지위고도 편차, 그리고 북극 지역으로 나타나는 음의 지위고도 편차를 모델에서 약 3주 전까지 재분석 자료와 유사하게 잘 모의하였으나 3주 전 예측에서의 경우 그 강도가 매우 약하게 나타난다. 1주전 예측에서 관측과 모델의 패턴상관계수는 0.87로 매우 높게 나타났고 2주 전 예측에서는 0.46, 그리고 3주 전 예측에서는 0.20으로 낮아지는 모습을 보인다. 4주 전 예측에서는 시베리아 지역과 일본 남쪽으로 양의 지위고도가 유의하게 나타났지만 두 지위고도 편차가 이어지면서 한반도 상공으로 양의 지위고도 편차가 강해지는 모습은 보이지 않으며, 이 때 관측과 모델의 패턴상관계수는 0.12이다. Figure 174는 LN 사례일 때의 합성장을 나타낸다. EP 사례일 때와는 반대로 알래스카 남부와 바이칼 호에서 한반도 상공까지 음의 지위고도 편차가 나타나고 북극 지역으로는 양의 지위고도 편차가 유의하게 나타난다. 이 사례에서 관측과 모델의 패턴 상관계수는 1주 전 예측에서 0.84, 2주 전 예측에서 0.45, 3주 전 예측에서 0.22로 나타난다. 알래스카 만과 한반도 상공으로 나타나는 음의 지위고도 편차는 약 3주 전 예측에서까지 잘 나타나지만 북극 지역으로 나타나는 양의 지위고도 편차는 3주 전 예측에서 잘 나타나지 않는다. 4주 전 예측에서는 일본 동쪽의 음의 지위고도 편차만 유의하게 나타난다. Figure 175는 PA 사례일 때의 합성장을 나타낸다. 1주 전 예측에서는 관측과의 상관계수가 0.82로 모델에서 양의 북극진동에 의한 영향을 잘 모의하였고, 북서태평양 넓은 범위에 나타나는 양의 지위고도

편차는 4주 전 예측에서까지 유의하게 나타난다. Figure 176은 NA 사례일 때의 합성장으로 우랄산맥과 중동지역, 북극, 그리고 북태평양에 양의 지위고도 편차가, 바이칼호 남쪽과 척치해 부근으로 음의 지위고도 편차가 나타난다. 모델과 관측의 패턴상관계수는 1주 전 예측에서 0.84, 2주 전 예측에서 0.47, 3주 전 예측에서 0.16, 로 지위고도 편차의 패턴은 유사하게 잘 나타나지만 대부분 지역에서 유의하지 않다.

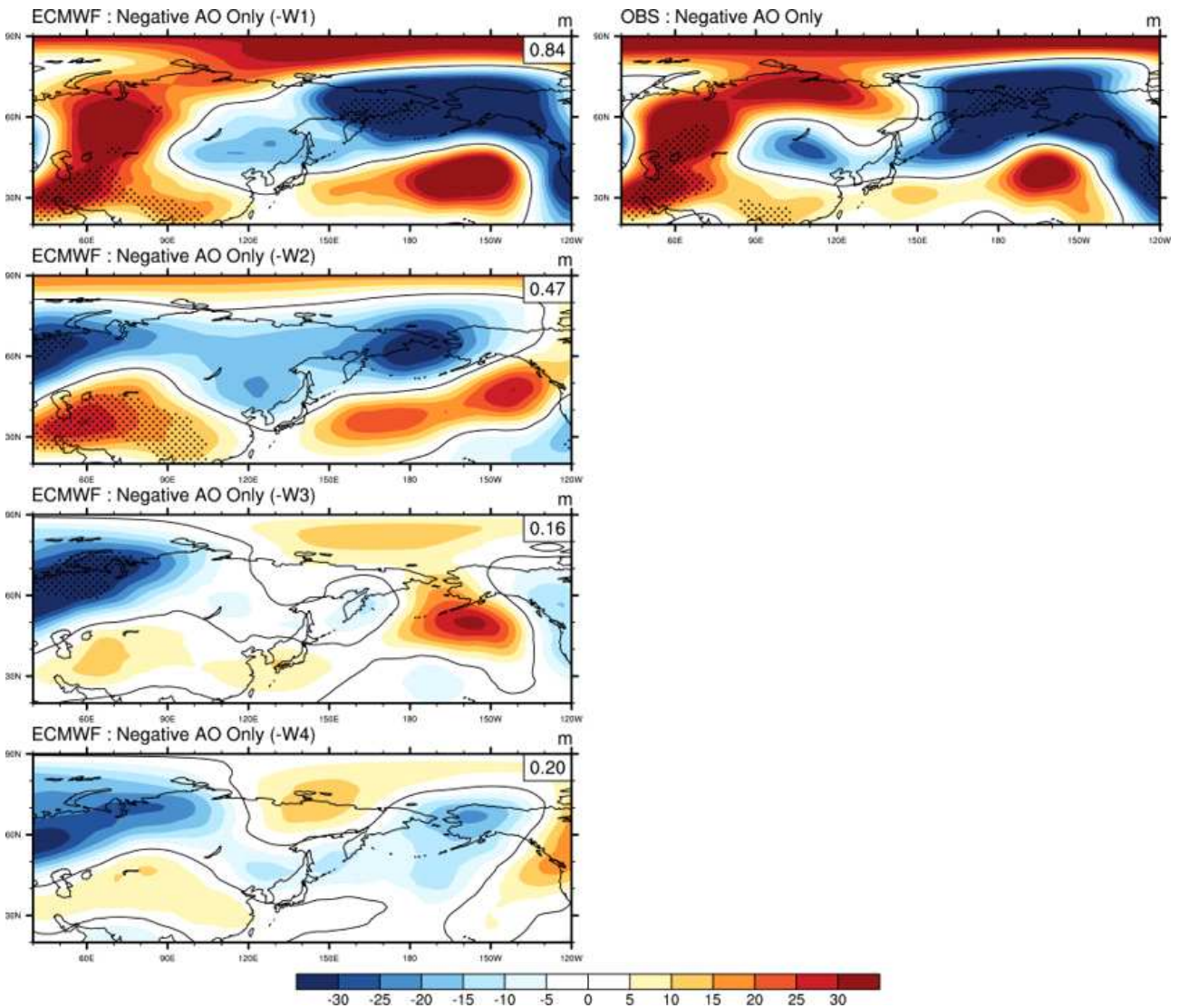


Figure 173. Skill of ECMWF at forecasting the geopotential height anomaly pattern at 500 hPa over 20~90°N, 40°E~120°W for EP case from lead-4 to lead-1. Numbers on the top right of the panels indicate the pattern correlations and the dotted area denotes 95% of confidence level.

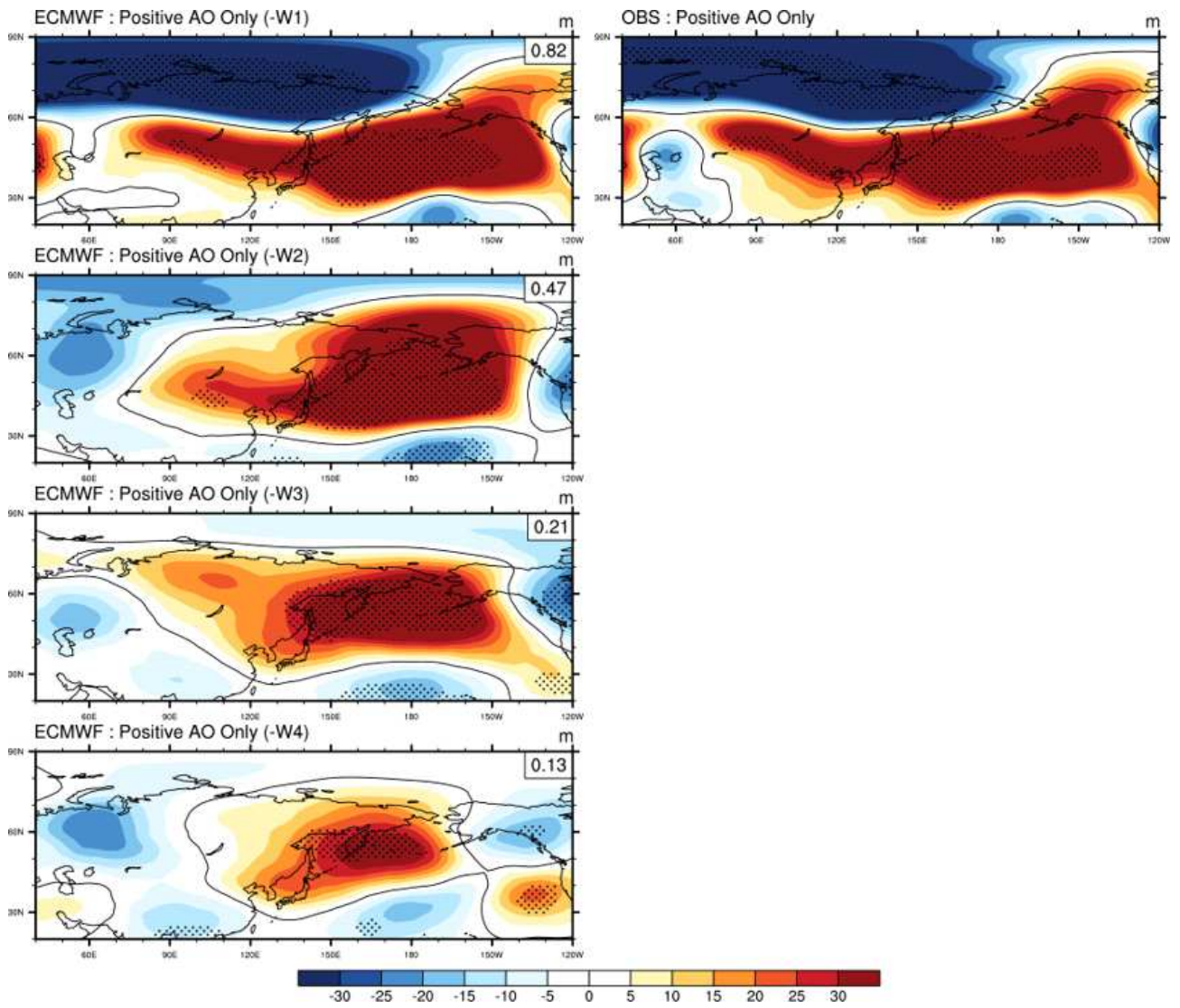


Figure 174. Same figure as in Figure 173 but for LN case.

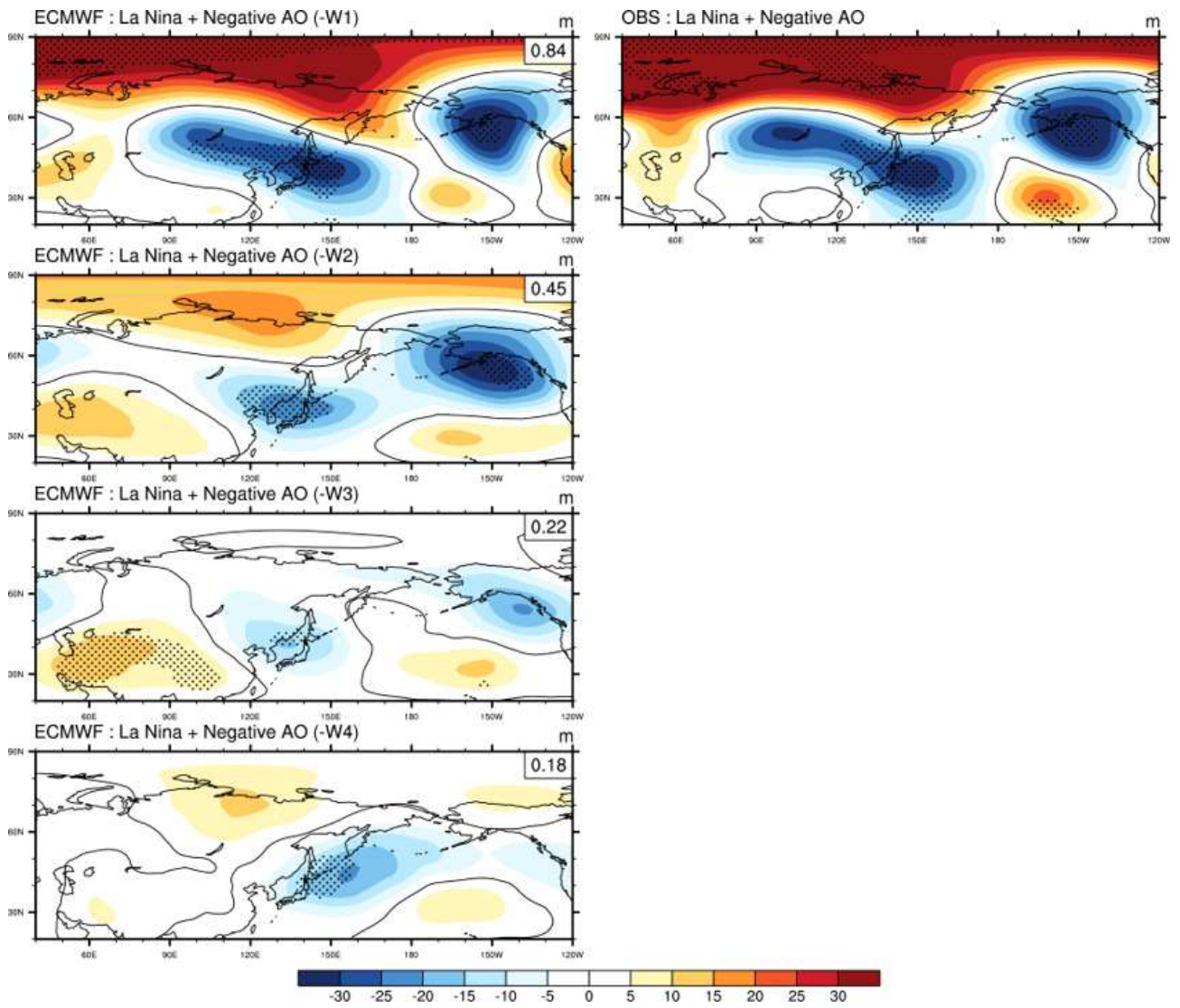


Figure 175. Same figure as in Figure 173 but for PA case.

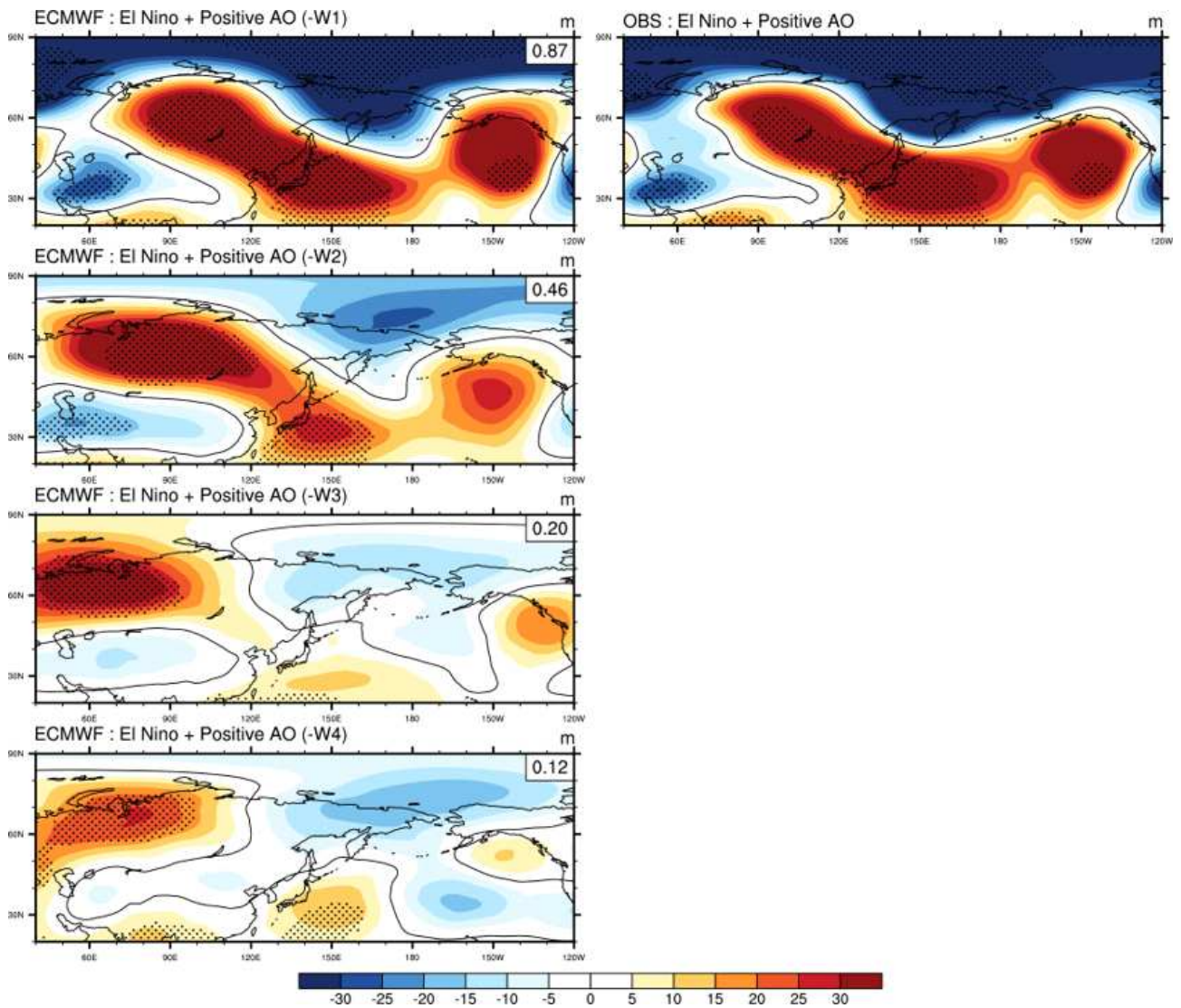


Figure 176. Same figure as in Figure 173 but for NA case

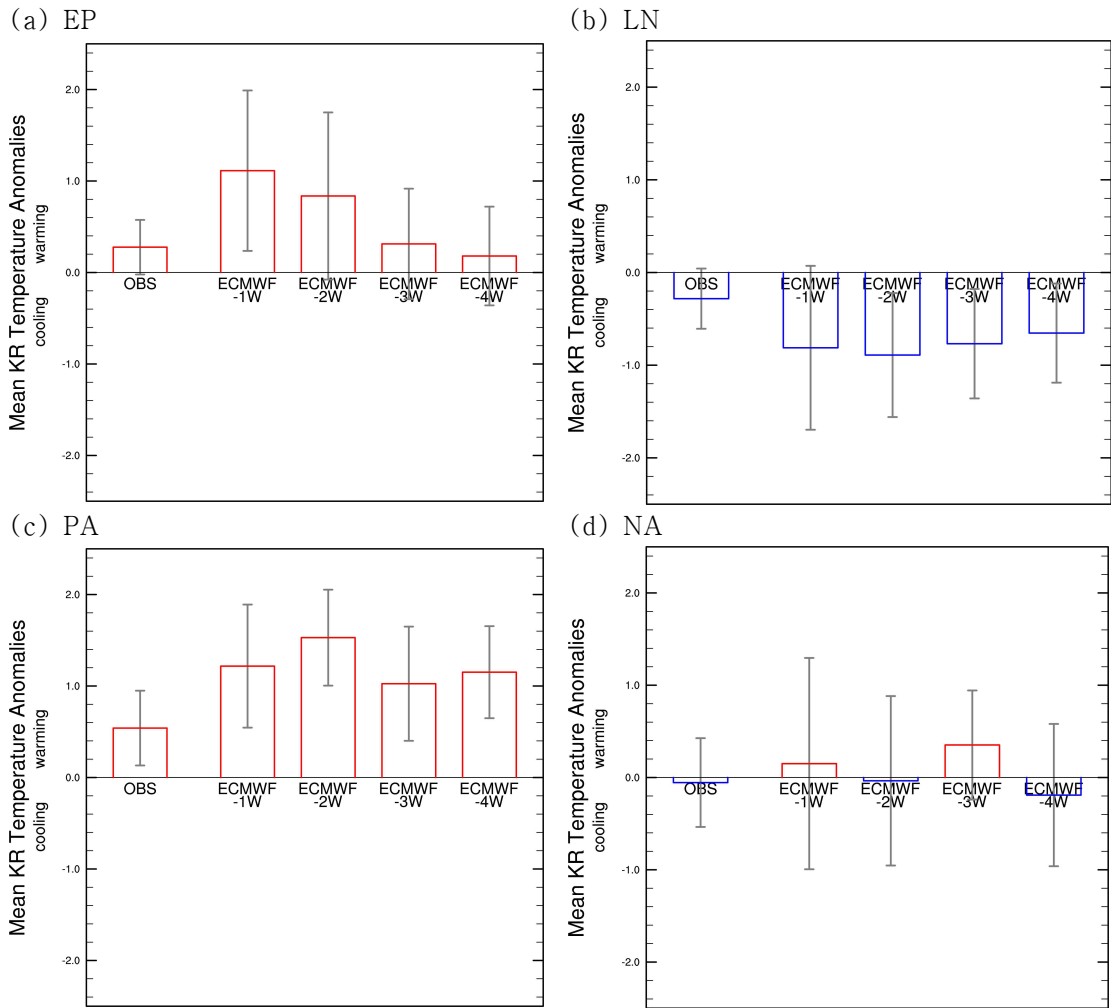


Figure 177. Mean 2m temperature anomalies with standard errors from ASOS data and ECMWF Hindcast from lead-4 to lead-1 for (a) EP, (b) LN, (c) PA and (d) NA case.

우리나라 ASOS 45개 관측지점의 평균 기온과 표준오차, 그리고 ECMWF 계절 내 예측에서 우리나라에 해당하는 5개 격자점에 대하여 lead time에 따라 평균 기온의 사례별 평균과 표준오차를 Figure 177에 나타내었다. EP와 PA인 경우 한반도의 기온은 관측과 모델 hindcast에서 모두 평년보다 높은 경향이 강하게 나타났고, LN인 경우에는 평년보다 기온이 낮은 경향이 강하게 나타났다. EP, LN, 그리고 PA 사례에서는 4주 전 예측에서부터 우리나라 평균 기온의 경향성을 잘 예측하였으나, NA 사례에서는 선행시간에 따라 평균 기온의 경향성이 다르게 나타나며 표준오차의 범위 또한 크게 나타난다.

(5) 요약 및 결론

이 연구에서는 북극진동지수와 엘니뇨-남방진동지수가 모두 $|0.5|$ 이상인 경우를 기준으로 하여 두 기후인자의 위상에 따른 우리나라 겨울철 기온의 주별 특성과 이에 대한 계절 내 예측모델에서의 예측성을 분석하였다. 먼저 재분석 및 관측 자료 기반 분석에서 EP와 PA

사례일 때에는 한반도 상공으로 양의 지위고도 편차가 나타나고 하층으로 남풍계열 바람이 유입되며 한반도 주별 평균 기온이 상승하고, LN 사례일 때에는 한반도 상공으로 음의 지위고도 편차가 나타나고 하층으로는 북풍계열 바람이 유입되어 한반도 주별 평균 기온이 낮게 나타난다. 위와 같은 경우에는 기후인자의 영향으로 인한 특징적인 대기순환장 패턴이 약 4주 전부터 유의하게 지속되는 것으로 나타나 기후인자의 위상에 따른 한반도 겨울철 기온의 예측성을 기대할 수 있다. 그러나 NA인 경우에는 한반도 기온에 영향을 줄 수 있는 지위고도 편차와 하층 바람장도 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이 사례일 때 평균적으로 한반도 평균 기온과 평균 오차가 크다.

계절내 예측 모델(ECMWF)에서 북극진동은 약 2주 전 예측에서까지 관측 북극진동지수와 상관관계수 0.5이상의 예측성을, 엘니뇨-남방진동은 6주 전 예측에서까지 예측성을 나타내었다. 또한 두 기후인자의 위상에 따른 동아시아 지역의 대기순환장 패턴을 약 3주 전 예측에서까지 잘 모의하였으며 우리나라 평균 기온의 경향성도 잘 모의하였다. 특히 두 기후인자를 함께 고려하는 경우에 한반도 주별 평균 기온 예측에 있어 보다 높은 예측성을 나타내며 음의 북극진동만 나타나는 경우에는 겨울철 한반도 계절 내 기온 예측에 불확실성이 크다.

이 연구를 통해 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 영향에 따라 특징적으로 나타나는 대기순환장 패턴이 서로 중첩되거나 상쇄되면서 한반도 겨울철 기온의 주별 특성에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었으며 1개월 전망의 겨울철 주별 기온 예측에 예측인자로서 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 활용성을 기대할 수 있다.

4. WMO 장기예보 선도센터 운영

가. WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영

(1) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영의 배경

기후예측을 위한 역학모형은 최근까지도 꾸준히 발전되어 왔고, 다양한 기관에서 역학모형을 이용하여 기후예측을 하고 있다. 그러나 역학모형 자체에 포함된 계통적 오차 또는 초기조건 불확실성 등은 여전히 역학모형 예측성 향상의 걸림돌로 남아있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 다양한 역학모형에 통계적 후처리를 적용하는 다중모델앙상블(Multi-Model Ensemble, 이하 MME) 기법이 널리 사용되고 있다.

현재 ECMWF, NCEP를 비롯한 다양한 현업 기관에서 MME 기법을 활용한 계절예측 서비스를 제공하고 있다 (Palmer et al., 2004; Min et al., 2009; Wang et al., 2009; Kirtman et al., 2014). 세계기상기구(World Meteorological Organization, 이하 WMO)에서도 이에 대한 중요성을 인식하고 WMO 전지구 장기예측자료 생산센터(WMO Global Producing Centre for Long-range Forecast, 이하 GPC)간의 협력을 통해 국가의 장기예보 결과를 공유하고 MME 기후예측시스템을 개발하여 계절예측 성능을 향상시키고자 제 14차 WMO 기본체계위원회(Commission for Basic Systems, CBS)에서 WMO 장기예보 선도센터(WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble, LC-LRFMME)를 승인하였다. 이에 따라 GPC 중 하나인 한국 기상청(GPC Seoul)과 미국 기상청(GPC Washington)이 WMO 장기예보 선도센터를 공동 운영해오고 있다. WMO 장기예보 선도센터는 각 GPC에서 생산하는 장기예보 자료를 수집하고, MME 기법을 개발하여 서비스하고, 각 GPC의 예측자료와 MME 예측자료를 일관된 형태로 제공하는 ‘one-stop shop’이 되는 것을 궁극적인 목표로 하여 운영되고 있다 (Graham et al., 2011).

그러나 상당한 기상·기후 업무 및 관련 행정 업무를 수행하고 있는 기상청의 특성상 WMO 장기예보 선도센터를 지속하여 안정적으로 운영하고, 특히 WMO 회원국 또는 WMO 장기예보 전문가팀(WMO Expert Team for Extended and Long-range Forecasting, ET-ELRF)의 요구에 대응하는 등의 업무를 함께 수행하기에는 다소 간의 어려움이 따를 수 있다. 따라서 기술력을 확보한 전문기관에서 기상청을 대신하여 운영할 경우 기술적인 부분에서 전문성을 강화하는 동시에 기상청은 기획 및 국제 협력 업무에 집중하며 WMO 장기예보 선도센터의 중·장기 발전방향을 설립하는 등의 시너지 효과를 창출할 수 있기에 APCC는 WMO 장기예보 선도센터를 운영하며 관련 연구 개발을 지원하는 역할을 현재 수행하고 있다.

APCC는 지난 10여 년 간 다양한 MME 기법을 활용하여 아시아·태평양 지역에 MME 계절예측 정보를 생산하여 제공해온 전문기관으로, 2011년부터 2016년까지 APCC가 “WMO 장기예보 선도센터 운영” 사업을 지속적으로 수탁 운영하면서 기상청과의 업무 분담 및 협조가 이루어졌으며, WMO 회원국의 요구에 부합하는 고품질 서비스를 안정적으로 제공할 수 있게 되었다. 더 나아가 WMO 장기예보 선도센터의 위상을 제고하는 것에 일조하였다. 따라서

이 장을 통해 2019년 APCC가 수행한 WMO 장기예보 선도센터 운영의 전반적인 내용과 MME 시스템의 개선 사항을 정리하고자 한다.

(2) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 운영 개요

앞서 설명한 바와 같이, ‘one-stop shop’ 으로서의 WMO 장기예보 선도센터 역할을 수행하기 위해 각 GPC들로부터 기후예측자료를 수집하고 MME 예측자료를 생산하여 WMO 선도센터의 회원국에 홈페이지를 통해 디지털 자료와 그림 형식으로 제공하고 있다 (Figure 178). 그러나 각 GPC에서 생산하는 계절예측자료는 파일 형식 (Binary, GRIB1, GRIB2, NetCDF), 앙상블 수, 변수 등에서 차이가 있다. 따라서 WMO 장기예보 선도센터의 자료 교환 정책 (data exchange policy)에 따라 GPC별로 6개 변수 (2m 기온, 강수, 해수면온도, 해면기압, 850hPa 온도, 500hPa 지위고도. 단, 해수면온도의 경우는 제공되는 GPC에 한함)만을 포함하는 GRIB1 형식의 월별 3개월 앙상블 평균 자료로 표준화 하고 있다.

WMO 장기예보 선도센터의 초창기에는 11개의 GPC로부터 계절예측자료를 수집하였다. 2010년 6월에 브라질의 CPTEC (Centre for Weather Forecasts and Climate Studies, GPC CPTEC)이 참여하면서 12개 GPC의 예측자료로 다년간 운영되어 오다가 2017년 독일 기상청 (Deutsche Wetterdienst, GPC Offenbach)이 GPC가 되면서 현재는 총 13개의 GPC로부터 계절예측자료를 제공받고 있다(Table 23).

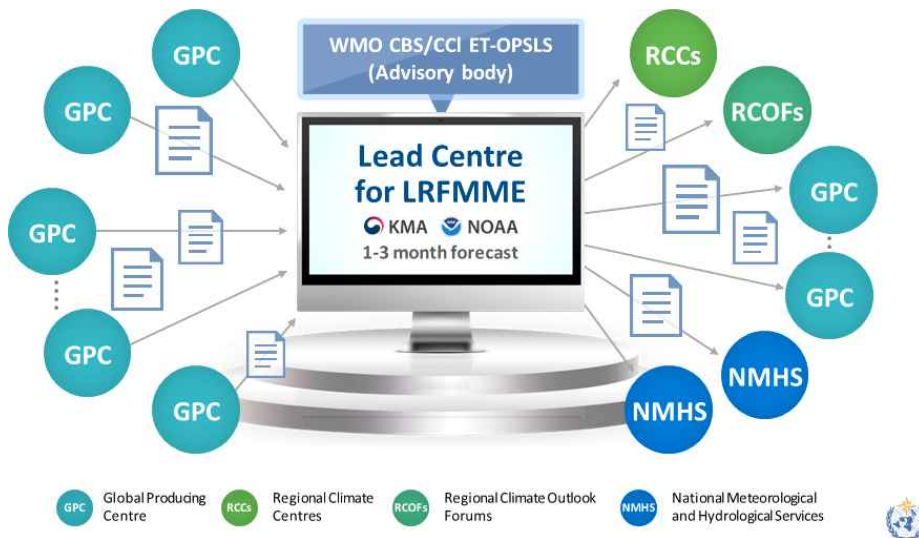


Figure 178. Functions of WMO LC-LRFMME.

13개 GPC의 forecast와 hindcast 자료에 대한 표준화를 완료한 후, 4개의 결정론적 MME 기법 (Simple Composite Method, SCM; Simple Linear Regression, SLR; Singular Value Decomposition, SVD; Genetic Algorithm, GA)과 확률론적 MME 기법 (Min et al., 2009)으로 매월 3개월 계절예측자료를 생산하게 된다. Hindcast 기간은 GPC 간의 공통 hindcast 기간인 1993-2009년을 기준으로 한다. 각 기법에 대한 자세한 설명은 아래와 같다.

- Simple Composite Method (SCM)

SCM은 모든 예측 모델에 동일한 기중치를 주어 단순 평균하는 방법으로, 쉽고 간단하게 사용할 수 있다. 선도센터에서는 GPC별로 forecast에서 공통 기간인 1993-2009년에 대한 기후값을 제거한 forecast anomaly (F'_i)를 계산하여 더한 후 GPC 개수 (N)로 나누어준다(Eq. [16]). 이 기법은 현재 계절예측을 위한 여러 현업 기관에서 널리 사용되고 있다 (예를 들어, APCC; Development of a European Multi-model Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction project (DEMETER); North American Multi-Model Ensemble (NMME); WMO LC-LRFMME, 등) (Kim et al., 2016; Kirtman et al., 2014; Min et al., 2014; Palmer et al., 2004).

$$MME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F'_i \quad [16]$$

- Simple Linear Regression (SLR)

단순선형회귀기법을 이용한 MME는 공통 hindcast 기간에 대해 구해진 GPC별 선형회귀계수 (a_i)를 각 forecast anomaly에 곱한 후 단순 평균해주는 방법이다 (Eq. 17).

$$MME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i F'_i \quad [17]$$

- Singular Value Decomposition (SVD)

이 기법은 각 GPC에 해당하는 가중치를 구하기 위해서 아래 Eq. 18과 같은 SVD 방식을 사용하여 GPC 간의 교차 공분산 행렬을 풀어내고자 하였다 (Krishnamurti et al., 2000; Yun et al., 2003).

$$C_{i,j} = (UVW^T)_{i,j} = \sum_{k=1}^N w_k U_{ik} V_{jk} \quad [18]$$

이렇게 구해진 GPC별 선형회귀계수(b_i)를 forecast anomaly에 곱한 값을 아래(Eq. 19)와 같이 더해줌으로서 예측 결과를 얻을 수 있다.

$$MME = \sum_{i=1}^N b_i F_i \quad [19]$$

- Genetic Algorithm (GA)

기후 시스템은 구성 요소들 간의 내적, 외적 상호작용에 의해 비선형성, 비예측성을 갖고 있기 때문에 기존의 선형적인 통계방법으로는 예측성을 향상시키는 데에 한계가 있다. 따라서 비선형성을 고려한 MME 방법 중 최근 널리 사용되고 있는 유전 알고리즘이 WMO 장기예보 선도센터를 위한 MME 기법 중 하나로 사용되고 있다. WMO 장기예보 선도센터에서 제공하는 MME 기법 중 비선형 기법으로는 유전 알고리즘이 유일하다.

유전 알고리즘은 부모의 유전자로부터 자손의 유전자를 형성하는 유성생식과 자연환경 속의 진화원리를 흉내 내는 알고리즘이다 (Holland, 1975). 유전 알고리즘은 초기화, 적합도 평가와 재생산(선택, 교배, 돌연변이), 또 다시 적합도 평가의 4단계로 구분되는 유전 탐색 프로세스를 통해 가장 높은 적합도를 가진 (즉, 관측과의 오차가 상대적으로 적은) 가중치들만이 다음 세대 생성을 위해 선택되어 복제되는 과정을 반복하여 최적의 가중치를 찾아내는 방법이다. 계절예측에 유전 알고리즘과 SCM을 이용한 MME 기법을 비교했을 때, 유전 알고리즘을 이용한 MME가 SCM 기법의 예측성보다 더 좋다고 알려져 있기도 하다 (Ahn and Lee, 2016).

- Probabilistic Multi-Model Ensemble (PMME)

2012년 ET-ELRF 회의를 통해 APCC에서 개발된 확률론적 MME 기법이 WMO 장기예보 선도센터에 도입되었다 (Final Report of 2012 CBS/ET-ELRF meeting, <http://www.wmo.int/pages/prog/www/CBS-Reports/documents/Final-Report-ET-ELRF-March2012.pdf>). PMME 기법은 계절예측자료가 표준정규분포를 따른다고 가정한 후 앙상블 멤버들의 hindcast의 평균적인 확률분포(정규분포)에서 평균(μ)과 분산(σ)을 이용하여 33.3% ($x_a = \mu + 0.43\sigma$), 66.7% ($x_b = \mu - 0.43\sigma$)에 해당하는 두 개의 기준값을 결정하고 예측값의 확률분포를 이용하여 기후 평균적인 확률분포로부터 결정된 기준값에 따른 각 카테고리의 확률을 계산하는 방법이다(Figure 179). 이렇게 계산된 각 GPC의 카테고리별 확률값은 각 GPC의 앙상블 멤버의 제공근에 따른 가중치를 곱해주어 다중모델 앙상블 확률값을 얻게 된다 (Min et al., 2009).

WMO 장기예보 선도센터 운영을 통해 생산된 각 GPC와 MME의 예측 성능을 파악하기 위해 앞서 언급했던 6개 변수의 hindcast 및 forecast 에 대한 검증은 매 달 수행하고 있다. 예측성능의 검증은 결정론적 예측과 확률론적 예측에 대해 수행하고 있다. (결정론적 MME의 경우 SCM에 대한 검증만 수행함). 이 중 hindcast에 대한 검증은 공통기준기간인 1993-2009년에 대해 계산된다. 검증에 사용되는 재분석 관측 자료는 forecast와 hindcast에 따라 다르며, Table 24와 25에 자세히 나타내었다.

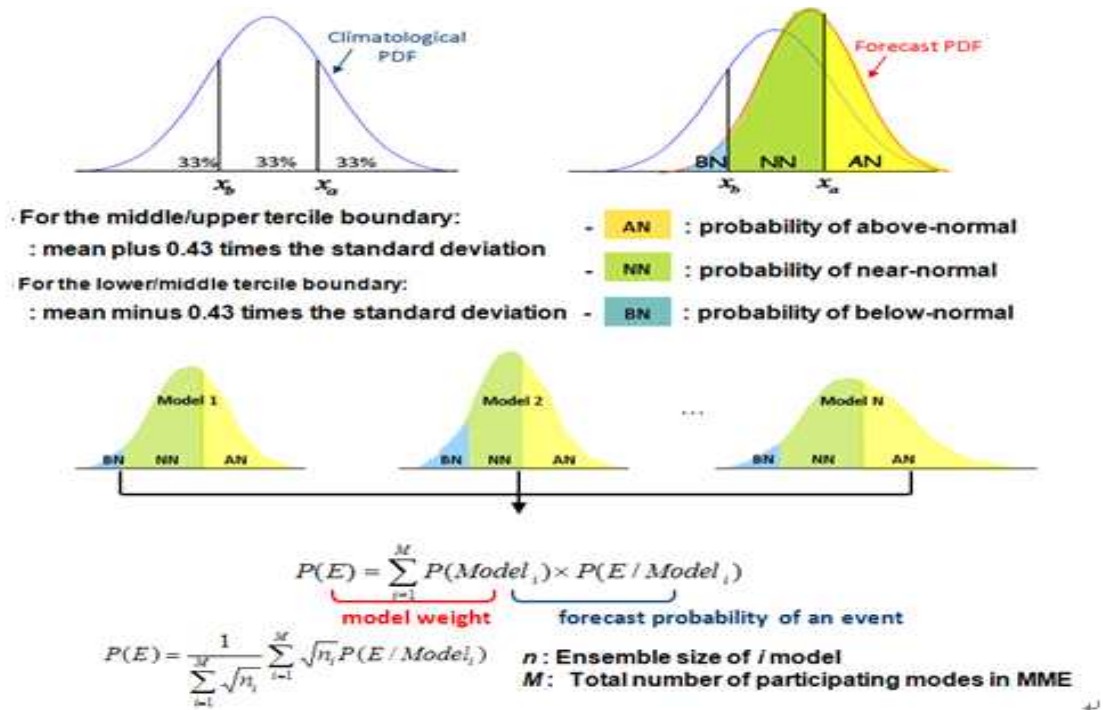


Figure 179. A parametric Gaussian fitting method for estimate of tercile-based categorical probabilities.

NetCDF 포맷으로 표준화된 GPC 자료들과 MME 예측자료는 GRIB1과 GRIB2로 변화되어 총 3가지의 자료 포맷으로 형태로 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 (<https://www.wmolc.org/>)를 통해 제공된다. 관리자가 표준화된 GPC와 MME 예측자료는 자동으로 DB에 저장되고, 사용자는 NetCDF, GRIB1, GRIB2 중에 선택하여 다운로드 할 수 있다. 참고로, 각 GPC의 자료 재배포 정책에 따라 재배포가 금지된 경우도 있으므로 모든 GPC의 예측자료를 다운로드 받을 수 있는 것은 아니다. WMO 장기예보 선도센터 홈페이지에서 다운로드 받을 수 있는 GPC 자료는 Table 23에 제시하였다. 또한 예측자료는 그래픽으로도 제공되고 있으며, 사용자가 예측월, 변수, GPC, 지역 등을 선택할 수 있다. 특히, SCM의 경우에는 사용자가 예측기간 (1~6개월)을 선택할 수 있는 사용자 맞춤형 서비스를 제공하고 있다. 그러나 이러한 디지털 자료 형식의 예측자료들은 홈페이지 사용자 등급A와 B 등급에 해당하는 WMO 회원국에만 제한적으로 제공되고 있다.

WMO 장기예보 홈페이지에는 예측자료 뿐만 아니라 결정론적 검증과 확률론적 검증 결과 도 제공한다. 당초 forecast 검증결과는 WMO 장기예보 선도센터에서 제공하고, hindcast 검증결과는 호주기상청에서 운영하는 WMO 장기예보 검증센터 (<http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/>)에서 제공하였으나, 2016년부터 WMO 장기예보 선도센터에서는 forecast 뿐만 아니라 hindcast에 대한 검증결과를 함께 제공하기로 결정하였다. 따라서, 2016년 이후부터 WMO 장기예보 선도센터의 A등급과 B등급 회원에게 forecast와 hindcast 검증자료가 제공되고 있다. 한 달 동안 주기적으로 수행되는 WMO 장기예보 선도센터의 계절예측 현업에 대한 일련의 과정은 Figure 180에 간략하게 도식하여 나타내었다.

Table 23. Characteristics of seasonal forecast model from GPCs.

<2019년 12월 기준>

GPC	Beijing	CPTEC	ECMWF	Exeter	Melbourne	Montreal	Moscow	Offenbach	Pretoria	Seoul	Tokyo	Toulouse	Washington
Institute	BCC	CPTEC	ECMWF	UK Met Office	BoM	MSC	HMC	DWD	SAWS	KMA	JMA	Météo-France	NCEP/CPC
Country	China	Brazil	United Kingdom	United Kingdom	Australia	Canada	Russia	Germany	South Africa	Korea	Japan	France	United States
System	Coupled	2-tier	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled	Coupled
Digital data download ¹⁾	o	o	x	x	o	o	o	o	o	o	x	o	o
Forecast													
Data format	NetCDF	GRIB1	GRIB1	GRIB2	GRIB1	GRIB2	GRIB1	GRIB2	GRIB1	GRIB2	GRIB2	GRIB2	GRIB1
Forecast period	6month	6month	5month	5month	6month	12month	3month	5month	3month	6month	3month	5month	9month
Ensemble size	24	15	51	42	33	20	20	50	40	42	51	51	40
Hindcast													
Hindcast Period	1991-2010	1979-2010	1993-2016	1993-2015	1981-2011	1981-2010	1986-2010	1990-2017	1982-2009	1991-2010	1981-2010	1993-2016	1982-2010
Ensemble size	24	10	25	28	99	20	10	30	10	12	10	25	20

1) GPC별 자료 정책 상, GPC에서 예측자료를 직접 제공하는 것이 아닌 다른 기관 등에서 2차 제공이 가능한지에 대한 여부. x로 표시된 GPC는 WMO 장기에보 선도센터 홈페이지로부터 예측자료를 다운로드 받을 수 없음.

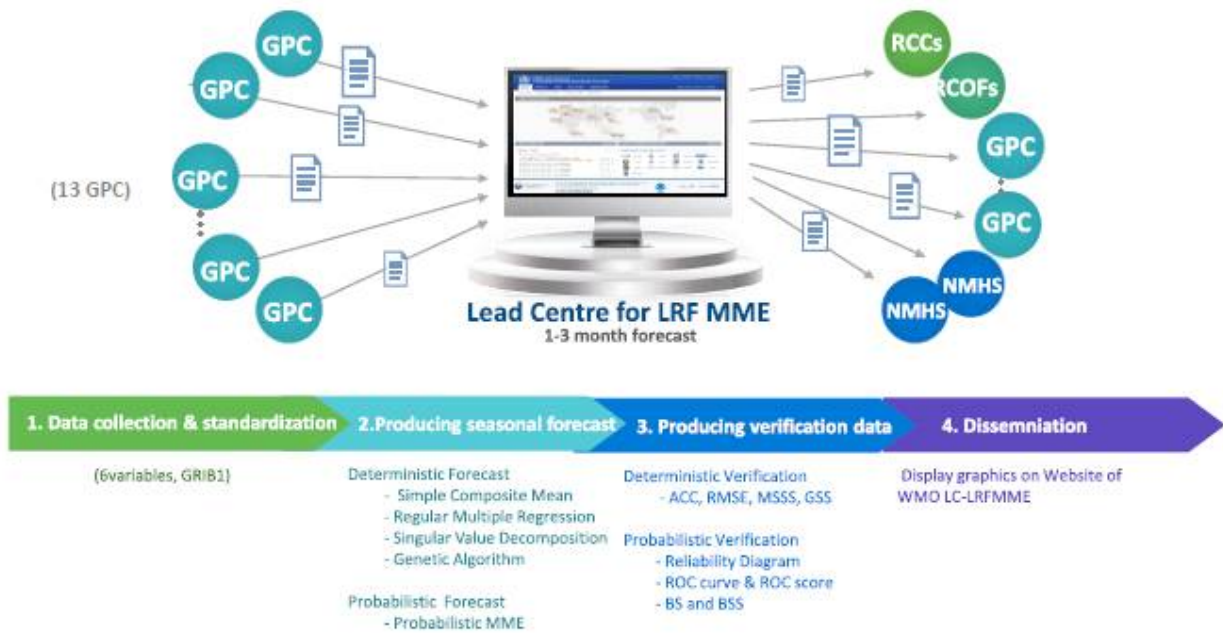


Figure 180. Forecast procedures at WMO LC-LRFMME.

WMO 장기예보 선도센터 자료의 검증은 WMO 장기예보 표준 검증 체계 (WMO Long-Range Forecast Standardised Verification System, WMO LRF-SVS)에 의거하여 수행되고 있다. 결정론적 예측 검증에는 아노말리 상관계수분석 (Anomaly Correlation Coefficient, ACC), 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), MSSS와 Gerrity Skill Score (GSS)가 사용되고 확률 예측의 검증에는 Reliability Diagram, Roc Curve 및 Score, ROC map, Brier Score (BS), Brier Skill Score (BSS)가 이용되고, 자세한 내용은 부록 C에 나타내었다.

WMO 장기예보 선도센터에 참여하는 개별 GPC와 PMME의 실시간 확률 예측 성능을 살펴보았다 (Figure 181, 182). 각 카테고리별 ROC Score의 시계열 분석에 사용된 예측기간은 2017년 JFM부터 2019년 SON 이다. Figure 181과 Figure 182에서 붉은 실선은 MME를 나타내며, 각 점들은 개별 GPC를 의미한다. 파란색으로 표시된 점은 ECMWF의 예측 성능을 나타낸다. T2m의 경우, WMO 장기예보 선도센터에서 생산하는 계절예측 MME는 2017년과 2018년에는 AN과 BN 카테고리에서 GPC의 예측성능의 평균과 비슷한 값을 보이며, 계절적으로는 봄과 겨울보다 여름과 가을철에 예측력이 높은 특성을 보였다. 이는 강수에서도 동일한 특성을 보이고 있다. 기온 및 강수의 예측력은 ENSO의 발달과 관련되어 있기에 ENSO의 발달 특성을 고려한 상세 예측력 분석이 필요하다 (Wang et al., 2009; Min et al., 2014). 또한 NN 카테고리 예측성능이 AN과 BN 카테고리의 성능에 비해 떨어지는 특성을 보였다 (Van den Dool and Toth, 1991). 이에 대한 보다 상세한 분석을 통해 WMO 장기예보 선도센터에서 생산되는 MME 계절예측의 특성을 파악하고 이에 대한 원인을 분석한다면 보다 효율적인 MME 예측 시스템을 개발할 수 있을 뿐만 아니라 MME 예측성 향상 또한 기대할 수 있을 것으로 보인다.

또한 2018년 WMO 장기예보 선도센터에 참여한 개별 GPC와 MME의 hindcast 기간 (1993~2009년, 총 17년) 동안의 PCC (Pattern Correlation Coefficient)를 간단하게 살펴보았다 (Figure 183, 184). 또한 MME 사용자가 개별 모형의 예측성을 바탕으로 한 모델 선택에 관심이 많은 만큼 WMO 장기예보 선도센터 참여하는 모든 GPC를 사용한 MME (M13)와 앞서 상대적으로 예측성이 낮은 GPC를 제외한 MME (M10)의 예측성능의 상대적 변화 정도를 살펴보았다. T2m 계절 예측의 경우, WMO 장기예보 선도센터 참여 GPC 중 CP와 Ms, Pr의 예측 성능이 타 GPC에 비해 낮고, GPC EC, Ex, Se가 상대적으로 높은 값을 나타내었다. MME (M13, M10 모두)는 개별 GPC 보다 높은 PCC 값을 보였으나 그 차이는 크지 않다. 이는 T2m의 경우는 MME에 의한 효과가 크지 않은 것으로 보인다. WMO 장기예보 선도센터에 참여하는 모든 GPC를 사용한 MME (M13)와 앞서 언급한 세 GPC를 제외한 MME (M10)의 예측성능의 상대적 변화 정도를 살펴보면 계절예측의 경우 (Figure 183a), M13과 M10의 차이는 약 1~2% 정도로 그리 크지 않음을 알 수 있다. 강수의 PCC는 전체적으로 T2m에 비해 낮은 값을 나타내었으며, MME가 개별 GPC에 비해 높은 값을 보인 T2m가 유사한 특성을 보였다. M13과 M10의 상대적인 PCC 값의 변동성을 살펴보면, 상대적으로 낮은 예측력을 보인 GPC를 제외한 M10이 M13에 비해 강수의 예측력을 약 10% 정도 향상 시키는 것으로 보였다. 이 분석은 WMO 장기 예보 선도센터 참여 GPC의 순위를 정하기 위해 수행된 것이 아니라 계절 예측 성능을 향상 시킬 수 있는 방안의 하나로 실험되었다. 또한 MME 결과 사용자가 MME 시 개별 모형의 예측성을 바탕으로 한 모델 선택에 관심이 많은 만큼 각 GPC 계절예측 모형의 상세한 특성을 파악하고 이에 대한 정보를 제공할 수 있다면 효율적인 MME 예측 시스템 개발에 도움이 될 수 있을 것이다. 향후 WMO 장기예보 선도센터 참여 GPC와 MME 예측결과에 대한 상세한 특성 분석이 필요할 것으로 보인다.

Table 24. Reanalysis data used for verification of real-time forecast.

	NCEP-DOE Reanalysis-1	CAMS OPI	OISST v2
Source	NCEP/CPC	NCEP/CPC	NCEP/CPC
Variable	50hPa GPH (gpm), Sea level pressure (hPa), 2m temperature (K), 850hPa temperature (K)	Precipitation (mm/day)	Sea surface temperature (K)

Table 25. Reanalysis data used for verification of hindcast.

	ERA-interim	GPCP	OISST v2
Source	ECMWF	NASA	NCEP/CPC
Variable	50hPa GPH (gpm), Sea level pressure (hPa), 2m temperature (K), 850hPa temperature (K)	Precipitation (mm/day)	Sea surface temperature (K)

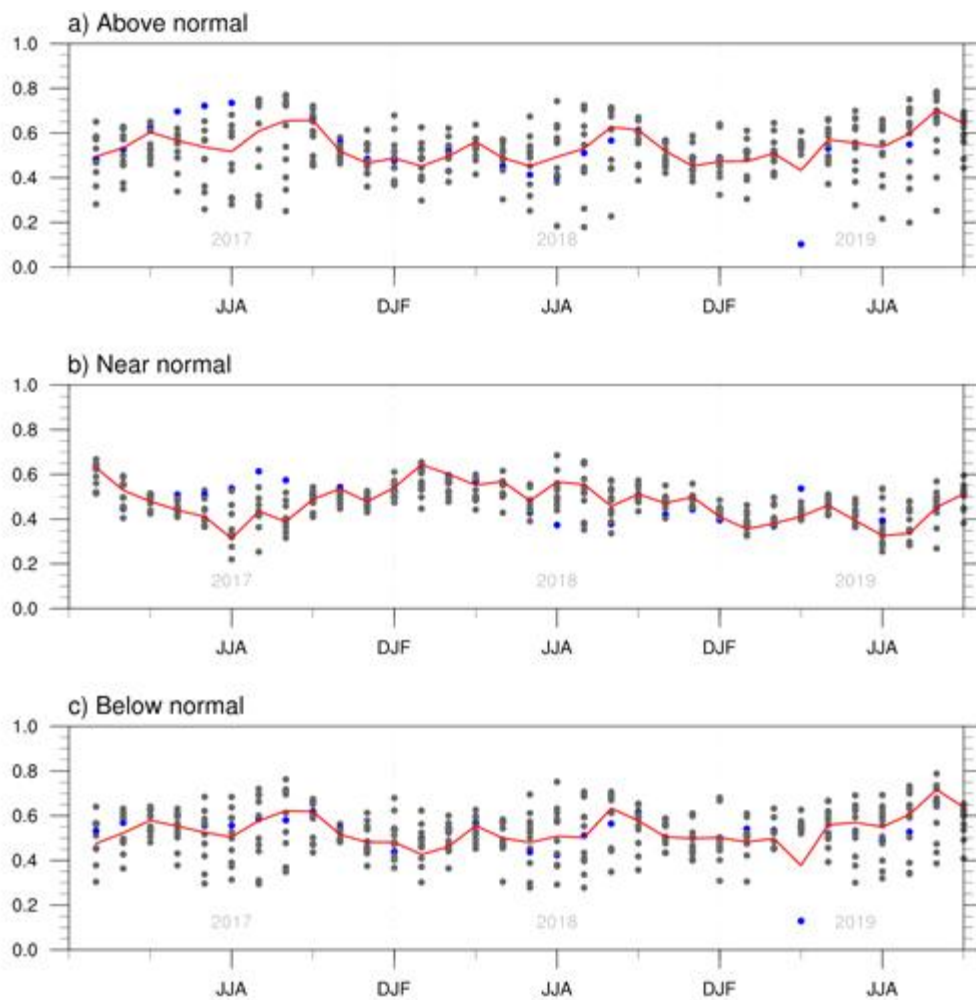


Figure 181. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of 2m temperature for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SON2019. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF.

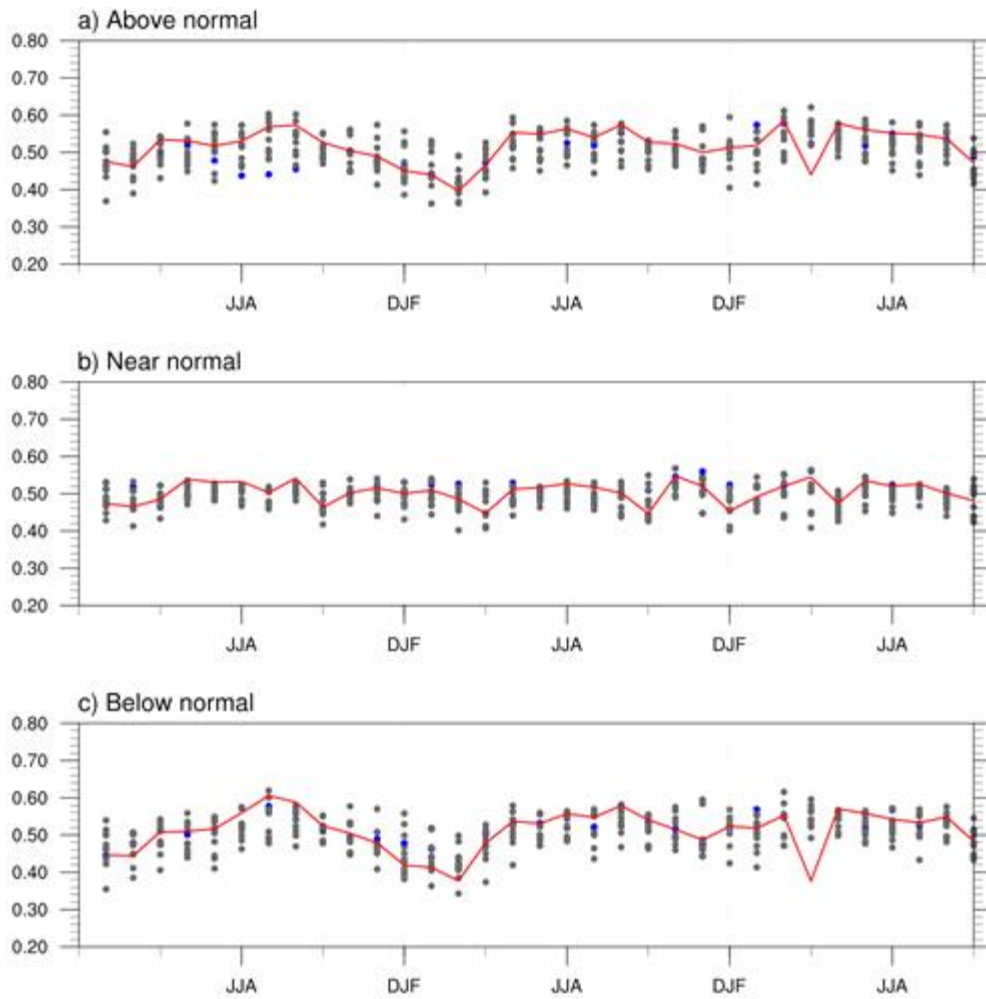


Figure 182. Relative Operating Characteristic (ROC) score aggregated over globe of probabilistic real-time forecast of precipitation for three terciles, i.e., a) the above normal, b) near normal and below normal for the period JFM2017–SON2019. ROC score for PMME prediction is indicated by red line. The grey dots indicate the ROC score of the WMO LC-LRFMME individual GPCs and the blue dot indicates ECMWF.

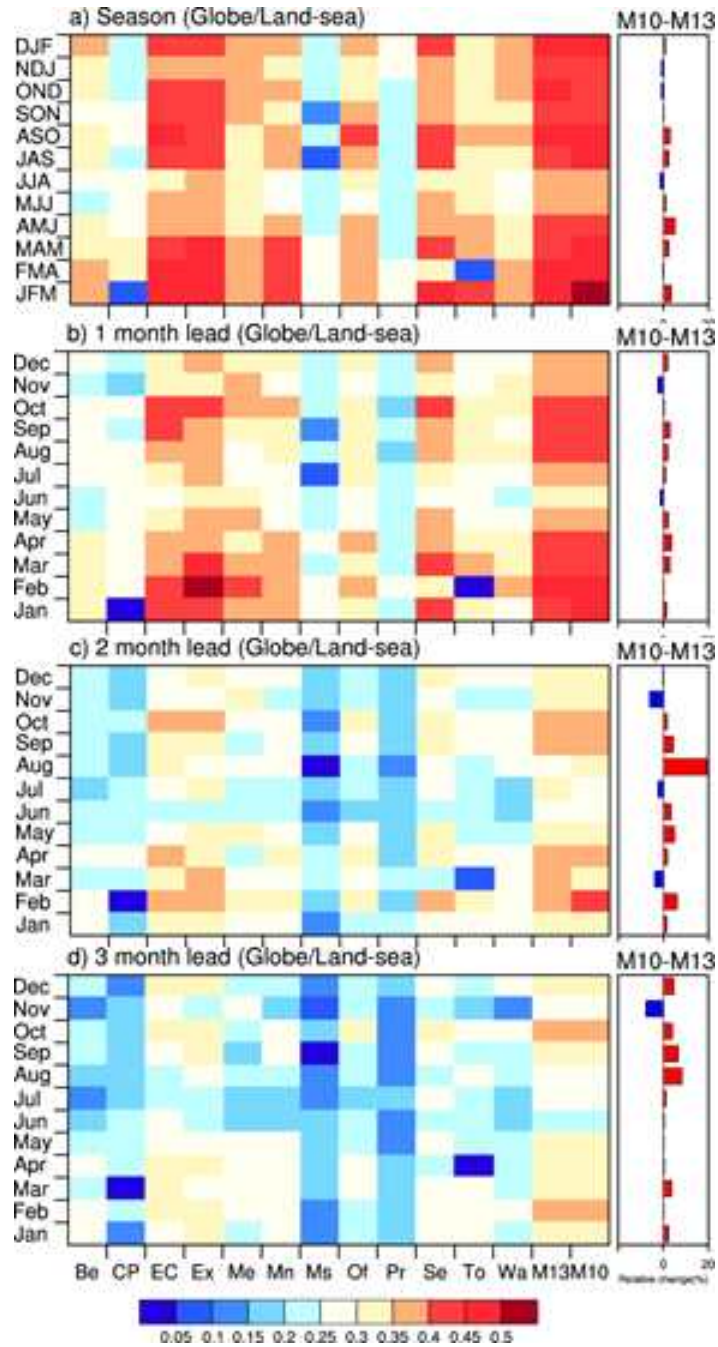


Figure 183. PCCs of 2m temperature over globe from each individual GPCs and SCM MME as a function of target season, target month and lead time for the hindcast periods (1993-2009). M13 indicates SCM MME using all GPCs and M10 indicates SCM MME except for Be, CP and Mo. The relative differences (bar) between M13 and M10 are shown.

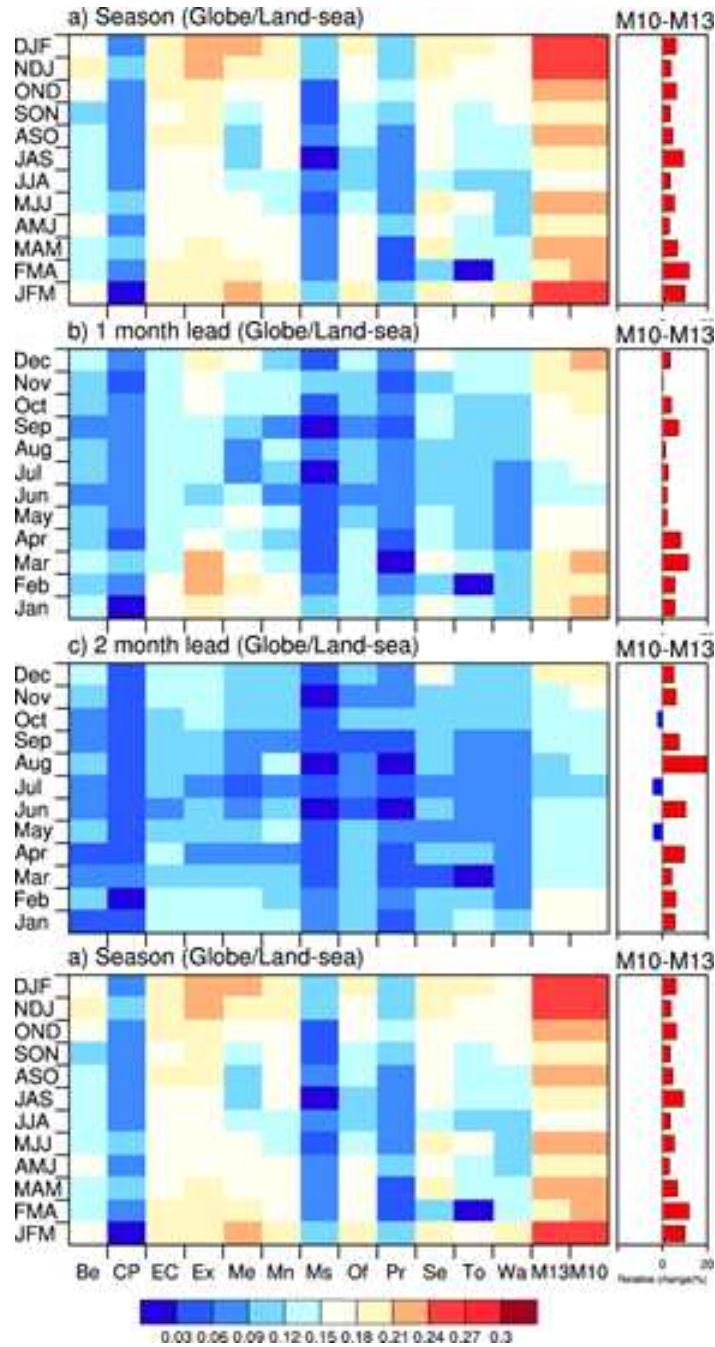


Figure 184. PCCs of precipitation over globe from each individual GPCs and SCM MME as a function of target season, target month and lead time for the hindcast periods (1993–2009). M13 indicates SCM MME using all GPCs and M10 indicates SCM MME except for Be, CP and Mo. The relative differences (bar) between M13 and M10 are shown.

(3) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템 개선

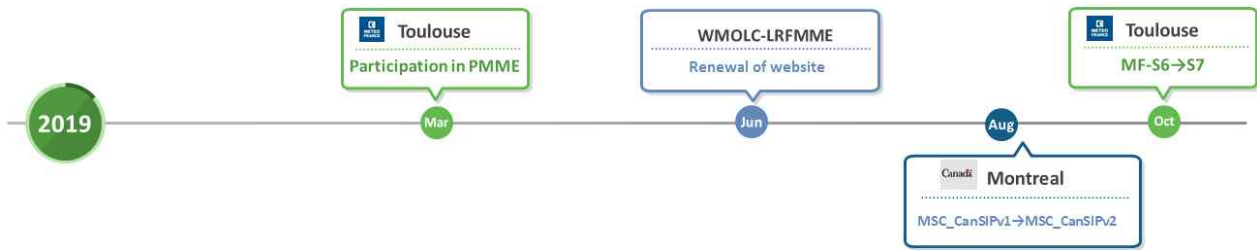


Figure 185. Improvements of operational system at WMO LC-LRFMME in 2019.

(가) GPC 계절예측모델 업데이트 현황

WMO 장기예보 선도센터에 참여하고 있는 GPC는 지속적으로 계절예측시스템 개선하여, 계절예측의 정확도 향상을 위해 노력하고 있다. 각 GPC의 계절예측시스템 개선으로 인한 예측 성능 향상은 WMO 장기예보 선도센터 다중 모델 앙상블 예측성능 향상을 기대할 수 있을 것이다. 2019년에는 GPC Toulouse, Montreal의 계절예측 시스템이 개선되어 WMO 장기예보 선도센터 다중모델 앙상블 예측 시스템에도 반영되었다. GPC Montreal은 2019년 8월부터 기후예측 모델이 개선되었으며, GPC Toulouse는 10월부터 System 6에서 System7로 개선되었다.

- GPC Toulouse는 2019년 10월 MF-S6에서 MF-S7로 계절 예측 모델이 개선되었다. 개선된 MF-S7는 기존 MF-S6와 대기 및 해양 모델은 동일하나, hindcast와 Forecast 앙상블 생산 방법이 ERA5를 이용한 3 lagged initialization 방법으로 변경되었다. 각 초기장별로 12, 12, 1개의 앙상블 초기장이 만들어진다. 상세한 개선 사항은 Table 26에서 확인 할 수 있다.
- GPC Montreal 계절예측 모델은 2019년 8월에 개선되어 WMO 장기예보 선도센터 다중모델 앙상블 예측시스템에 적용되었다. 개선된 GPC Montreal 계절예측 모델은 기존 대기와 해양모델이 개선되었으며, 기존 전지구 4차원 자료 동화 방식으로 대기의 초기장을 생성하던 것을 Cavitating fluid approach 방식으로 변경하였다. 해양의 초기장 역시 NCEP의 GODAS 3D자료에서 GPC 자체의 GDPS 분석 기법을 적용하였다. 이에 대한 상세한 정보는 Table 27에 나타내었다.

Table 26. Improvements of long-range forecast system from GPC Toulouse.

	September 2018	September 2018
Is it a coupled forecast system?		Yes
Is it a Tier-2 forecast system?		No
Atmospheric model resolution		T359L91
Ocean model (if applicable)	NEMO v3.6 , ORCA 1° grid, 75 model levels. Frequency of coupling is 3 hours	
Source of atmospheric initial conditions	ECMWF operational analysis	
Source of ocean initial conditions	Mercator-ocean analysis	
If Tier-2, what is the source of SST predictions?	N/A	
Hindcast period	1993-2016	
Ensemble size for the hindcasts	25 members	
How is the hindcast ensemble configured?	1 atmospheric condition from ERA-Interim - 1 oceanic condition from Mercator analysis, ensemble generation by stochastic dynamics technique (Batté and Déqué 2016).	3 lagged initialization (12 runs, 12 runs, 1 run), each built with 1 atmospheric condition from ERA5 and 1 oceanic condition from Mercator analysis. For the 2 first initialization dates, ensemble generation by stochastic dynamics technique (Batté and Déqué 2016). The last initialization date begins the 1st of initialization month.
Ensemble size for the forecast	51 members	
How is the forecast ensemble configured?	Generated by a stochastic dynamics technique in addition to using a lagged initialization	Same method as for the hindcast. 3 lagged initialization (25 runs, 25 runs, 1 run)
Length of forecasts	7 months	
Data format	GRIB 2 or ascii for digital data Giffographics	
What is the latest date predicted anomalies for the next month/season become available?	8th of each month	13th of each month
How are the forecast anomalies constructed?	Departures from the model climate estimated by the hindcast integrations	
URL where forecast(maps) are displayed	http://seasonal.meteo.fr	
Point of Contact	JM Soubeyroux (Jean-Michel.soubeyroux@meteo.fr) Jacques Richon (Jacques.richon@meteo.fr) Christian Viel (Christian.viel@meteo.fr)	

Table 27. Improvements of long-range forecast system from GPC Montreal.

	December 2013	September 2019
Is it a coupled forecast system?		Yes
Is it a Tier-2 forecast system?		No
Atmospheric model resolution	T63 (64x128 gaussian native grid). Date is sent on the 2.5 deg lat-long grid.	CanAM4 (T63L35) GEM 4.8-LTS13 (1.4x1.4 deg)
Ocean model (if applicable)	OGCM4 uses a z-level vertical coordinate, with horizontal differencings formulated on an Arakawa B-Grid. It was developed from the NCAR CSM Ocean Model (NCOM). There are 40 vertical levels with spacings ranging from 10m near the surface (there are 16 levels in the upper 200m) to nearly 400m in the deep ocean. Horizontal coordinates are spherical with grid spacings approximately 1.41 degrees in longitude and 0.94 degrees in latitude.	CanOM4 (1.40 x 0.94 deg) NEMO 3.6 (1 x 1 deg)
Source of atmospheric initial conditions	The CMC Global 4D-var analysis is assimilated.	Cavitating fluid approach CICE 4
Source of ocean initial conditions	CMC SST and sea-ice analysis at the surface and NCEP GODAS 3D ocean below the surface. In all cases, these analyses are assimilated; there's no cold start directly from them.	Nudging to CMC GDPS analysis CMC GEPS from EnKF
If Tier-2, what is the source of SST predictions?		N/A
Hindcast period		1981-2010
Ensemble size for the hindcasts	10 CanCM3 members + 10 CanCM4 members	10 members CanCM4i 10 members GEM-NEMO
How is the hindcast ensemble configured?	For each month of the hindcast, a 12-month forecast is produced. There is no lagged initial conditions, all the 20 members start on the first of the month.	
Ensemble size for the	20 members, 10 for each model	

forecast		
How is the forecast ensemble configured?	Every month, a 12-month forecast is produced. There is no lagged initial conditions, all the 20 members start on the first of the month.	Every month, a 12-month forecast is produced. There is no lagged initial conditions, all the 20 members start on the last day of month.
Length of forecasts	12 months	
Data format	Experimental GRIB1 pushed to LC-LRFMME ftp site Operational GRIB2 also available at http://weather.gc.ca/grib/grib2_cansips_e.html .	
What is the latest date predicted anomalies for the next month/season become available?	The forecasts will be available every first day of the month. There's a possibility for a 6-month forecast issued on the 15th of each month starting sometime in 2013.	
How are the forecast anomalies constructed?	By subtracting the ensemble forecast mean from the hindcast mean.	
URL where forecast(maps) are displayed	http://www.weatheroffice.gc.ca/saisons/index_e.html	
Point of Contact	R&D : Dr. Bertrand Denis (Bertrand.denis@ec.gc.ca) Operational implementation: Mr. Benoit Archambault (benoit.archambault@ec.gc.ca)	

(나) GPC Toulouse 확률 예측 서비스 개시

WMO 장기예보선도센터는 2019년 12월 현재 13개의 GPC에서 계절예측자료를 제공받아 개별 GPC 및 MME 예측결과를 홈페이지를 통해 제공하고 있다. 13개의 GPC 중 GPC Toulouse의 경우, 초기 WMO 장기예보 선도센터 참여할 때부터 기관에서 생산된 편차장과 기후장 만을 제공하고 계절 예측 모델에서 생산된 Forecast와 Hindcast의 앙상블별 평균장을 WMO 장기예보 선도센터에 제공하지 않음으로 인해 확률 예측정보를 생산에 참여하지 못하였다. 그러나 2019년 3월 GPC Toulouse는 기관에서 생산된 각 변수별 Forecast와 Hindcast 앙상블 평균장을 모두 WMO 장기예보 선도센터에 제공하게 되면서 GPC Toulouse의 확률 예측 정보를 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 통해 제공할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 PMME 예측정보 생산 시에도 활용 할 수 있게 되었다. 이는 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자의 요구를 충족시킬 뿐만 아니라 다양한 서비스를 통한 기후정보의 사회적 가치 증대에 이바지 할 수 있을 것이다. Figure 186은 현재 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 통해 제공되고 있는 GPC Toulouse의 확률 예측 정보의 예시이다.

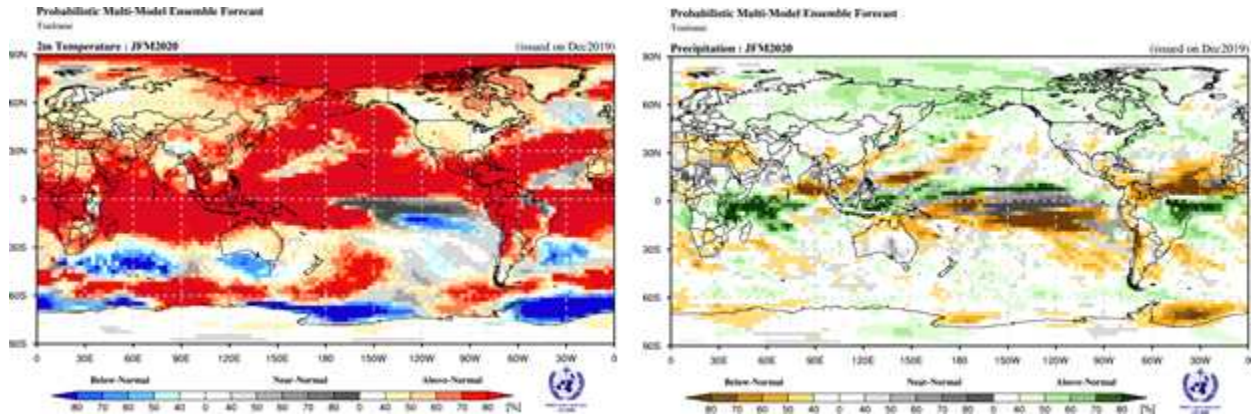


Figure 186. Example of probabilistic forecast based on tercile categories for GPC Toulouse provided from WMO LC-LRFMME website.

(다) 신규 홈페이지 오픈

2019년 6월에는 기존에 구축된 PHP 기반의 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 Java 기반으로 프로그램을 변경하고 홈페이지 디자인, 메뉴 등을 개선하여 신규 홈페이지를 서비스 했다. WMO 장기예보 선도센터와 GPC Seoul 홈페이지의 메인화면 디자인을 사용자 친화적으로 구성하였으며, 특히 사용자들이 많이 사용하는 MME 예측정보와 ENSO 예측정보 아이콘을 메인 페이지에 표시함으로써 사용자의 편의성을 증대시켰다. Figure 187은 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 메인화면이다. 또한 홈페이지의 기능적인 개선 사항으로는 홈페이지내에서 제공하는 그래픽 품질을 개선하고 계절내 예측 정보의 임의 영역 표출 기능을 추가하여 사용자 인터페이스 기능을 강화하였다. 홈페이지 관리자 메뉴 기능을 강화하고, 개인정보 보안성 강화와 취약성 보안을 위한 작업을 수행하였다. 신규 홈페이지 서비스가 개시되면서 홈페이지 사용자와 관리자의 편의성이 증대되었을 뿐만 아니라 WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 정보를 보다 안정적으로 제공할 수 있게 되었다.



Figure 187. Main page of improved WMO LC-LRFMME website.

(4) WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 자료 제공

기상청은 현재 1개월 및 3개월 전망 발표를 통해 주별·월별 기압계 동향 및 전망, 기온 강수량 예보 등을 발표하고 있으며, 3개월 장기예보 생산을 위해 기상청 계절 예측 현업 모델 뿐만 아니라 다양한 기관에서 생산된 예측 결과를 활용하여 토의하고 있다. WMO 장기예보 선도센터에서 생산하는 3개월 MME 예측자료도 기상청의 3개월 전망을 위한 중요한 참고자료로 활용되고 있다. 따라서 WMO 장기예보 선도센터는 매월 3개월 전망 내부토의만을 위한 다양한 예측 콘텐츠(기온, 강수량, 지위고도)를 생산하여 지속적으로 제공하고 있을 뿐만 아니라 Figure 188과 같이 한반도 영역에 대한 각 개별 GPC 및 MME 예측 결과표를 생산하여 기상청의 3개월 전망 의사결정을 위해 매달 자료를 제공하고 있다. 또한 2019년에는 Figure 189와 190과 같이 한반도 영역에 대한 기온과 강수량에 대한 개별 GPC 및 MME 예측 확률 그래프를 생산하여 제공함으로써 기후예측 생산을 위한 다양한 참고 콘텐츠 확대에 기여하였다.

또한 WMO 장기예보 선도센터는 WMO 주관으로 지역별 기상청과 전문가들이 합의된 기후 전망을 제시하고, 이와 관련된 다양한 응용 분야 (농업, 식량안보, 수자원, 공중보건 등)의 전문가와 의견을 교환하기 위해 마련되는 다양한 지역기후포럼 (Regional Climate Outlook Forum, RCOF)에 참석한다. 기상청 기후예측과와 APCC는 RCOF회의에서 맞춤형 MME 예측자료를 제공하고 장기예보 선도센터 자료의 활용도를 향상시키고 국제 협력과 장기예보 선도센터의 입지를 강화시키기 위해 노력하고 있다. 이를 위해 2012년부터 매년 다양한 지역기후포럼에 APCC와 기상청의 기후예측과에서 참석하여 WMO 장기예보 선도센터의 MME 예측결과를 지역 전문가들과 공유하고 있으며, 2019년에는 총 6개의 지역기후포럼에 WMO 장기예보 선도센터 MME 기후예측정보를 제공하였다 (Table 28). 상반기에는 아시아 지역의 여름철 기후전망을 위해 개최된 FOCRAII와 서남 아시아 지역의 여름철 기후 몬순 전망을 위해 개최된 SASCOF-14에 WMO 장기예보 선도센터 MME 예측정보를 제공하였으며, 특히

FOCRAII는 기상청 기후예측과에서 참석하여 예측정보를 발표하였다. SASCOF-14는 전자메일을 통해 지역기후포럼 담당자에게 예측 결과를 제공하였다. 하반기에는 SASCOF-15, PICOF-5, ASEANCOF-13, EASCOF-7에 MME 예측자료를 제공하였다. 이 중 PICOF-5와 ASEANCOF-13은 WMO 장기예보 선도센터에서 직접 참석하여 WMO 장기예보 선도센터에서 생산된 MME 계절 예측정보를 발표하고 지역의 각국 기상청 참석자와 세계 유수의 계절 예측 생산 기관의 참석자와 지역의 기후전망에 대한 의견을 공유하고 계절예측 정보 활용 사례를 공유하고 의견을 교환하였다. SASCOF-15와 EASCOF-7은 WMO 장기예보 선도의 MME 계절예측 정보를 전자메일로 제공하여 지역별 합의된 기후전망 도출을 위한 참고자료로 활용할 수 있도록 하였다.

3 month Outlook (2020Jan-2020Mar)

Issued Date : 2019.12.16

GPCs		2m Temp.						Prec.					
		Jan		Feb		Mar		Jan		Feb		Mar	
GPC	Seoul	+		+		+		+		+		0/+	
		81% (+)		79% (+)		93% (+)		55% (+)		56% (+)		46% (+)	
	Melbourne	+		+		+		0		0		0	
		69% (+)		66% (+)		55% (+)		EQ		EQ		EQ	
	ECMWF	+		+		+		0/+		0		0	
		73% (+)		65% (+)		67% (+)		55% (+)		EQ		EQ	
	Montreal	+		+		+		0		0/+		0/+	
		49% (+)		46% (+)		50% (+)		EQ		45% (+)		41% (+)	
	Moscow	0/+		0		0		0/+		0		0/-	
		46% (+)		EQ		EQ		49% (+)		41% (0)		EQ	
	CPTEC	+		+		+		0/+		0		0	
		83% (+)		85% (+)		64% (+)		50% (+)		EQ		EQ	
	Beijing												
	Toulouse	+		+		+		0/+		0		0	
71% (+)		50% (+)		64% (+)		47% (+)		EQ		EQ			
Washington	+		+		+		0/+		0		0		
	85% (+)		77% (+)		68% (+)		45% (+)		44% (0)		EQ		
Exeter	+		+		+		0/+		0		0		
	68% (+)		48% (+)		81% (+)		50% (+)		EQ		EQ		
Tokyo													
Pretoria													
Offenbach	+		+		+		0		0/+		+		
	66% (+)		58% (+)		64% (+)		EQ		45% (+)		49% (+)		
SCM		+		+		+		0/+		0		0	
PMME		+		+		+		+					
		70%		61%		65%		46%		EQ		EQ	
Summary of GPCs except for SCM, PMME		A	9	A	9	A	9	A	1	A	1	A	1
		+N	1	+N	0	+N	0	+N	6	+N	2	+N	2
		N	0	N	1	N	1	N	3	N	7	N	6
		-N	0	-N	0	-N	0	-N	0	-N	0	-N	1
		B	0	B	0	B	0	B	0	B	0	B	0

Figure 188. Example of seasonal outlook table.

3 month Outlook (2020Jan-2020Mar)

Issued Date : 2019.12.16

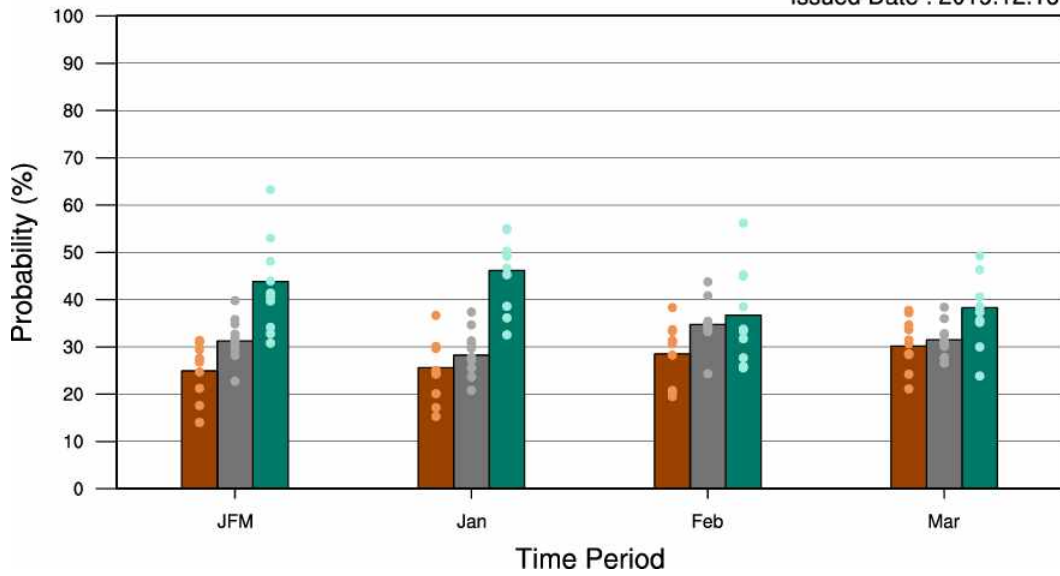


Figure 189. Example of precipitation probability forecast based on WMO LC-LRFMME.

3 month Outlook (2020Jan-2020Mar)

Issued Date : 2019.12.16

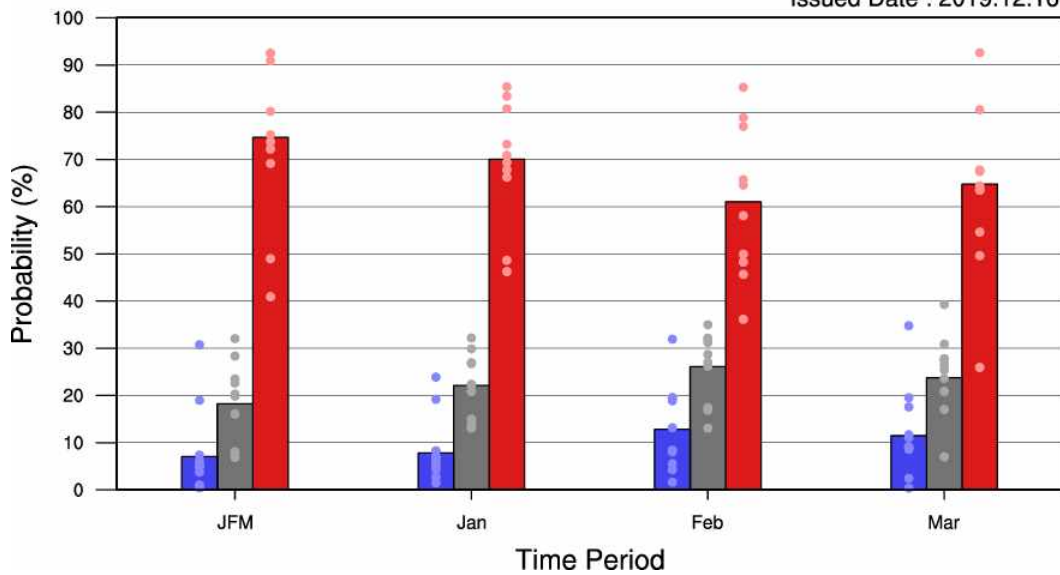


Figure 190. Example of temperature probability forecast based on WMO LC-LRFMME.

Table 28. The list of participating RCOF in 2019.

RCOF	Place	Date
Thirteenth Session of the Forum on Regional Climate Monitoring-Assessment-Prediction for Asia (RAII) (FOCRAII)	Nanning, China	8-9 May 2019
Fourteenth Session of the South Asian Climate Outlook Forum (SASCOF-14)	Kathmandu, Nepal	22-23 April 2019
Fifteenth Session of the South Asian Climate Outlook Forum (SASCOF-15)	Thiruvananthapuram, India	23-25 September 2019
Fifth Pacific Islands Climate Outlook Forum(PICOF-5)	Noumea, New Caledonia	17-18 October 2019
Seventh Session of East Asia winter Climate Outlook Forum (EASCOF-7)	Ulaanbaatar, Mongolia	5-7 November, 2019
Thirteenth Session of ASEAN Climate Outlook Forum (ASEANCOF-11)	Bangkok, Thailand	20-21 November, 2019

WMO에서는 자연재해 감소를 위해 지난 10여 년간 El Nino/La Nina Update를 발간하여 열대 태평양의 해수면 온도 변화에 관한 감시·전망 자료를 지속적으로 제공해왔다. 그러나 계절기후에 대한 보다 포괄적인 정보를 제공할 필요성이 제기되어, 제 15회 세계 기상회의에서 최근 기후감시 및 예측 정보를 제공할 목적으로 GSCU (Global Seasonal Climate Update)의 발간을 결정하였다. 이를 지원하기 위해 WMO 장기예보 선도센터는 매 분기 (2월, 5월, 8월, 11월)에 기후예측정보를 생산하여 GSCU의 기본적인 초안을 제공하고 있다. GSCU 초안의 내용은 아래와 같다.

- WMO 장기예보 선도센터에서는 공통 기간에 대한 각 GPC별 예측 자료
- 결정론적 및 확률론적 MME 기법을 적용한 예측자료 및 Consistency map,
- ACC를 이용한 GPC 및 결정론적 MME의 검증 (SST, 2m 기온, 강수, 500hPa의 지위고도, 해면기압)
- ROC map, ROC curve and score, reliability diagram을 이용한 GPC 및 확률론적 MME의 검증자료를 제공(2m 기온, 강수, 500hPa의 지위고도, 해면기압)
- Nino 1+2, Nino3.4, IOD, NTA, STA 지수

이를 통해 GSCU 발간 팀과의 활발한 교류가 이루어지고, APCC와 WMO 장기예보 선도센터의 입지가 강화될 수 있다.

(5) 기타 기상청 기후예측과의 협력 사항

APCC와 기상청 기후예측과 간의 원활한 업무 협력을 위해서 매월 초에 지난달 WMO 장기예보 선도센터 운영에 관한 운영 보고서를 작성하여 기상청 기후예측과 및 국립기상과학원 지구환경시스템과 및 미래전략팀에 제공하고 있다. 보고서에는 WMO 장기예보 선도센터 현업시스템 및 서버 운영상의 특이 사항, 홈페이지 이용 현황 및 WMO 장기예보 선도센터 예측자료 제공 실적 등을 포함하고 있다. 그 중 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 2019년 월별 이용 현황을 Figure 191에 나타내었다.

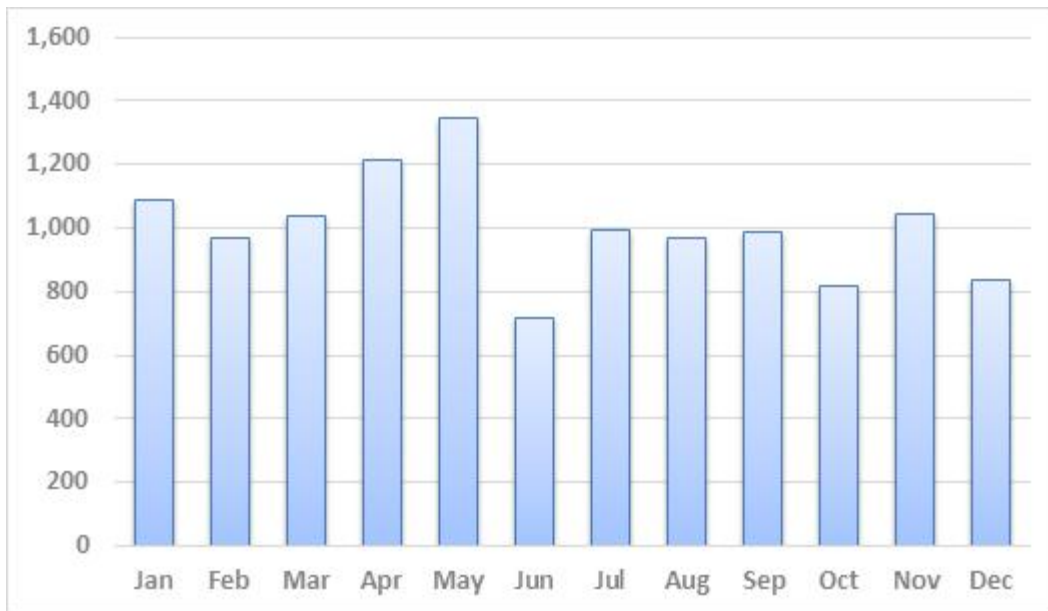


Figure 191. The number of monthly visitors of WMO LC-LRFMME website in 2019.

기상청에서는 「개인정보 보호법」 제 31조제2항제2호(개인정보 처리 실태 및 관행의 정기적인 조사 및 개선), 제6호(개인정보파일의 보호 및 관리·감독)에 따라 개인정보보호 수준 향상과 인식 제고를 위하여 기상청 및 산하기관의 개인정보 관리체계와 침해예방 활동 등을 주기적으로 점검하고 있다 (월, 분기별). 따라서 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 개인정보처리시스템 접근 권한 및 접속 기록 점검을 매월 그리고 반기별로 수행하여 점검 결과를 기후예측과에 제공하고 있다. 또한 2019년 6월에는 WMO 장기예보 선도센터 이용 회원 가입자의 개인정보 분실·도난·유출·위조·변조 또는 훼손을 방지하고 시스템 관리체계 강화를 위해 개인정보 접근권한 관리 기준을 마련하였다(부록C). 여기서 개인정보 접근권한이란 개인정보처리시스템에 접근하여 개인정보를 열람, 기록, 정정, 삭제, 저장(다운로드), 출력 등을 수행할 수 있는 권한을 말한다.

또한 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 사용하는 실제 회원들의 다양한 의견과 요구 사항을 수렴하여 보다 객관적인 서비스 수준을 진단하고 개선하여 실용적으로 효율적인

서비스를 제공하기 위해 2019년 9월 1일부터 11월 30일까지 총 3개월 동안 홈페이지 사용자 (비회원 포함)를 대상으로 만족도 조사가 진행되었다. 설문은 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 팝업창을 통한 전자 설문으로 이루어졌으며, 홈페이지 서비스 종합 만족도를 9문항 (자료 활용 목적, 활용도 높은 자료 등)으로 구성하여, 항목별 7점 척도로 측정 후 100점 기준으로 환산하였다. 설문에는 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자 142명이 참여하였으며, 총 만족도를 100점 만점으로 환산하였을 때 82.9점으로 2018년 83.1점과 큰 차이를 보이지 않았으며, 설문에 참여한 사용자중 86%가 WMO 장기예보 선도센터 서비스에 긍정적인 만족도를 보였다. WMO 장기예보 선도센터 2019년 만족도 조사 문항 및 결과는 부록 D에 자세하게 설명되어 있다.

나. WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템 시범운영

(1) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템 개발의 개요

극한 기후 현상 등을 보다 정확하고 상세하게 예측하기 위하여 계절 예측정보를 계절내 시간 규모로 확장하는 요구가 국제 사회에서 지속적으로 제기되고 있다. 2011년에 열린 Sixteenth World Meteorological Congress (Cg-XVI)에서는 계절내 시간 규모까지 예측자료를 제공하는 것을 포함하여 WMO 장기예보 선도센터의 역할이 확장될 수 있도록 GPC들의 지원을 요청하였다. 이후 2012년에 개최된 ET-ELRF의 전문가 회의 및 Expert Team on Operational Predictions from Sub-seasonal to Longer-Time Scales (ET-OPSL) 아래 Task Team 3 (TT3)의 협의 등을 통해 보다 구체적인 계절내 MME 예측을 위한 계획이 수립되었다.

이러한 국제적 협의에 의해 WMO 장기예보 선도센터의 홈페이지에서는 계절예측 자료의 MME 결과 표출뿐만 아니라 계절내 MME 예측결과를 추가로 제공하기 위한 사업을 진행하게 되었다. 2014년에는 계절내 MME 시스템에서 제공할 콘텐츠를 발굴하는 등 사전 조사를 수행하였으며, 2015년에는 3개의 GPC (ECMWF, Tokyo (JMA), Washington (NCEP))의 예측자료를 바탕으로 파일럿 시스템을 구축하였고, 홈페이지에서는 MME 예측 정보만 표출한 바 있다. 2016년도 사업에서는 MME 뿐만 아니라 각 GPC 별 예측 결과를 추가적으로 표출하여 예측자료의 분석 시 보다 다양한 정보를 획득 할 수 있도록 하였다. 또한 2016년 4월 베이징에서 개최된 WMO 현업장기예보 전문가팀 회의 (the meeting of WMO Joint Commission for Basic Systems (CBS)-Commission for Climatology (CCI) ET-OPSL)의 TT3 회의 결과에 따라 5개의 GPC (Beijing (CMA), Exeter (UKMO), Melbourne (BoM), Montreal (ECCC), Seoul (KMA))의 참여가 확정되었으며, 예측변수의 추가 등이 결정되었다. 2017년에는 hindcast 기간 연장과 모델 특성변경에 따른 수정, 활용가이드 및 홈페이지 안내페이지 개선, 기후값 계산방법 변경 등을 작업을 수행하였다. 2018년에는 자료수신 속도 향상을 위한 프로그램 개선과 GPC Seoul 예측자료가 안정적으로 제공되면서 MME 예측에 GPC Seoul 예측결과를 포함하였다.

2019년에도 지속적으로 계절내 MME 예측시스템을 계속적으로 시범운영 하였으며, 신규 현업 서버로의 이전을 안정적으로 완료하였다. 또한 GPC Seoul hindcast 자료의 오류를 추가로 발견하여 기상과학원에 관련 내용을 전달하였다.

(2) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 시스템의 참여모델 특성

계절내 MME 기후예측자료의 생산에 필요한 각 GPC의 일별예측자료는 현재 ECMWF Sub-seasonal to Seasonal (S2S) data portal (Vitart et al., 2017)로부터 수신하고 있다. 현재 Beijing과 ECMWF, Exeter, Melbourne, Montreal, Seoul, Tokyo, Washington 자료가 계절내 MME에 사용되고 있으며, 예측에 사용된 8개 모델의 특성은 아래 Table 29에 간략히 나타내었다. Table 29은 각 GPC 별로 forecast 자료를 생산하는 주기와 예측기간, forecast 앙상블 멤버의 수, hindcast 자료의 생산주기, hindcast 앙상블 멤버의 수, hindcast 수행기간을 나타낸 것이다 (2019년 10월 기준). 계절내 MME 예측에 사용되는 모델의 보다 자세한 설명은 ECMWF S2S data portal 웹사이트의 모델 설명 부분에서

(<https://software.ecmwf.int/wiki/display/S2S/Models>) 확인할 수 있다.

Table 29. Characteristics of GPC data for WMOLC-LRFMME subseasonal prediction.

GPC name (Center)	Forecast Frequency	Forecast Time range	Forecast Ens. Size	Hindcast Frequency	Hindcast Ens. Size	Hindcast length
Beijing (CMA)	daily	0-60 days	4	daily	4	1994-2014
ECMWF (ECMWF)	2/week (Mon,Thu)	0-46 days	51	2/week (Mon, Thu)	11	past 20 years
Exeter (UKMO)	daily	0-60 days	4	4/month (1,9,17,25)	7	1993-2016
Melbourne (BoM)	2/week (Sun,Thu)	0-62 days	33	6/month (1,6,11,16,21,26)	33	1981-2013
Montreal (ECCC)	weekly (Thu)	0-32 days	21	weekly (Thu)	4	1998-2017
Seoul (KMA)	daily	0-60 days	4	4/month (1,9,17,25)	3	1991-2010
Tokyo (JMA)	weekly (Wed)	0-33 days	50	3/month (10,20,last day)	5	1981-2010
Washington (NCEP)	daily	0-44 days	16	daily	4	1999-2010

(3) WMO 장기예보 선도센터 계절내 MME 예측 방법

계절내 MME 예측을 수행하기 위해서 각 GPC의 예측자료의 표준화 과정이 필요하다. Table 29에 나타난 바와 같이 각 GPC 별 예측자료는 다양한 예측시간과 해상도, 앙상블 크기, 예측주기 등을 가지고 있기 때문이다. 특히 매주 계절내 MME를 구성 하는 각 모델의 예측 시작 시간이 상이하므로 계절내 MME 예측시작 시점을 정하는 것이 중요한 이슈가 된다. WMO 장기예보 선도센터의 계절내 예측 시스템을 처음 구축할 당시에는 MME 참여모델의 선행시간 손실을 최소화하기 위해 MME 예측시작 일을 목요일로 정한 바 있다. 하지만 MME 예측의 시작이 월요일로 정하는 것이 실제 계절내 예측자료의 활용 면에서 더 필요하다고 판단되어 2016년에 예측 시작시간을 변경하였다. 따라서 WMO 장기예보 선도센터에서는 계절내 MME 예측을 월요일에 시작하도록 정하였으며 매주 1회 예측을 수행한다. 이러한 계절내 MME 예측을 위해 사용되는 각 GPC 모델의 예측시작 시간은 예측자료의 수집에 소요되는 시간을 고려하여 직전 수요일에서 금요일 사이의 GPC 예측결과가 사용된다.

다만 Beijing과 Exeter, Seoul 예측자료는 1회 예측 시 앙상블 멤버의 수가 4개로 매우 적으며, 개별모델의 확률예측 등을 원활히 계산하기 위해 7일간의 예측결과를 모두 사용하였다. 즉 계절내 MME에 사용되는 Beijing과 Exeter, Seoul 예측자료는 MME 예측이 시작되기 2주전의 토요일부터 1주전 금요일에 예측된 자료를 평균하여 사용한다.

계절내 MME 예측을 수행함에 있어서 또 하나의 중요한 이슈는 hindcast 자료의 선택과 모델의 기후값 계산 방법이다. Table 29에서 보이는 바와 같이 각 GPC 별로 다양한 주기와 기간의 hindcast 자료를 제공하고 있다. forecast 자료로 부터 anomaly 계산을 위해서는 사전에 각 GPC 별로 기후값을 구해야 한다. 매주 예측을 수행하는 계절내 예측의 경우 hindcast 자료 또한 forecast 예측 시작날짜와 동일한 날짜의 자료가 매주 생산되는 것이 이상적이다. 하지만 일부 GPC (Exeter, Melbourne, Seoul, Tokyo)의 경우 매달 고정된 특정날짜를 기준으로 생산된 hindcast 자료를 제공한다. 이러한 GPC간의 차이점에도 불구하고 MME 예측을 위해서는 최대한 유사한 방법으로 각 GPC의 기후값을 계산해야 하며, 계절내 MME 예측에서는 forecast 시작 날짜(월, 일)와 가장 가까운 날짜의 hindcast 자료를 선택하도록 정하였다. 따라서 Beijing과 ECMWF, Montreal, Washington의 자료는 forecast 시작날짜와 동일한 날짜의 hindcast 자료가 선택되며, 그 외 Exeter와 Melbourne, Seoul, Tokyo의 경우 forecast 시작날짜와 가장 가까운 날짜의 hindcast 자료가 선택된다. Beijing과 Exeter, Seoul 예측자료와 같이 7일간의 예측결과를 합쳐서 사용하는 경우 hindcast 자료의 선택 기준은 가장 마지막 날짜(1주전 금요일)의 forecast 예측 시작날짜로 정하였다. 또한, 기후값 계산 기간은 전체 GPC에서 공통적으로 제공되는 1999년부터 2010년까지 12년의 자료를 사용한다. Table 30은 계절내 MME 예측을 수행함에 있어 forecast와 hindcast 자료의 선택과 관련하여 앞서 설명한 내용을 정리한 것이다.

Table 30. Operational setup for subseasonal MME prediction system.

GPC name (Center)	Forecast Init. Date	Forecast Time range	Forecast Ens. Size	Hindcast Init. Date	Hindcast Ens. Size	Common Hind. period
Beijing (CMA)	2 weeks ago Sat - last Fri	4(10)-45(51) days	28 (4*7)	Same date as fcst	4	1999-2010
ECMWF (ECMWF)	last Thu	5-46 days	51	Same date as fcst	11	1999-2010
Exeter (UKMO)	2 weeks ago Sat - last Fri	4(10)-45(51) days	28 (4*7)	Closest date to fcst	7	1999-2010
Melbourne (BoM)	last Thu	5-46 days	33	Closest date to fcst	33	1999-2010
Montreal (ECCC)	last Thu	5-32 days	21	Same date as fcst	4	1999-2010
Seoul (KMA)	2 weeks ago Sat - last Fri	4(10)-45(51) days	28 (4*7)	Closest date to fcst	3	1999-2010
Tokyo (JMA)	last Wed	5-32 days	50	Closest date to fcst	5	1999-2010
Washington (NCEP)	last Thu	5-39 days	16	Same date as fcst	4	1999-2010

Table 29에서 보인 바와 같이 각 GPC 모델별로 MME 예측에 사용가능한 예측결과의 길이는 4주에서 6주까지 다양하다. WMO 장기에보 선도센터 계절내 예측은 최대 6주간의 예측을 수행하고 있으며, MME 예측은 참여모델의 일관성을 유지하는 방향보다는 최대한 많은 모델의 예측결과를 사용하는 방향으로 구축을 하였다. 그 결과 4주 예측에서는 8개 GPC의 예측결과를 모두 사용하지만 6주 예측에서는 Table 31에서와 같이 5개만을 사용한다.

Table 31. Participating GPCs in subseasonal MME prediction each forecast.

Forecast Time range	Participating GPCs in subseasonal MME prediction
1~4 weeks	Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Montreal, Seoul, Tokyo, Washington
5 weeks	Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Seoul, Washington
6 weeks	Beijing, ECMWF, Exeter, Melbourne, Seoul

WMO 장기에보 선도센터에서는 계절내 MME 예측방법으로 SCM 방법과 PMME 방법을 사용한다. SCM 방법은 Eq. [20] 및 Eq. [21]와 같이 각 GPC의 예측결과에 대한 간단한 산술평균 방식이지만 각 모델이 가지고 있는 계통적 오차를 효과적으로 줄여 예측성을 높이는 방법이다(Krishnamurti et al., 2000).

$$A_i = \frac{1}{M_i} \sum_{m=1}^{M_i} (F_m - \bar{F}_i) \quad [20]$$

$$SCM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i) \quad [21]$$

여기서 i 는 각 GPC를 나타내고, m 은 각 GPC 내 앙상블 멤버이며, A_i 는 각 GPC의 anomaly 앙상블 평균을 뜻한다. M_i 는 각 GPC의 앙상블 멤버 수를 나타내고, F_m 은 앙상블 멤버 각각의 개별 예측결과이며, \bar{F}_i 는 앞서 설명한 각 GPC의 기후값이다. 이렇게 구해진 SCM 결과값은 WMO 장기에보 선도센터 홈페이지를 통해 이미지화 하여 표출되거나 GRIB edition 1 파일 형식으로 제공된다.

PMME는 각 격자점 별로 Above-Normal (AN), Near-Normal (NN), Below-Normal (BN)에 해당하는 이벤트가 발생할 확률을 구한 것이며, 2 meter temperature (T2M)과 total precipitation (PREC)에 대해서만 예측을 수행한다. AN, NN, BN을 구분하는 임계값은 hindcast 결과를 바탕으로 확률밀도함수를 구하고, 함수의 면적을 삼등분 하는 지점을 값으로 한다.

확률밀도함수 fitting 시 T2M은 normal distribution를 따르고, PREC는 gamma distribution를 따르는 것으로 가정하였다. 이렇게 구해진 삼분위 지점 값을 기준으로 각 GPC의 forecast 결과가 각 category에 얼마나 포함되는지 확률을 계산하여 개별모델의 확률 예측 값이 생산된다. PMME는 Eq [22]와 같이 개별모델의 확률의 평균으로 구해지며, 이때 각 모델 간 동일한 가중치를 가진다. 추후 PMME 계산에서 각 모델별 최적의 가중치 값을 찾기 위한 연구를 수행할 계획이다(Min et al., 2009).

$$P(E_j) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P(E_j/mdl_i)) \quad [22]$$

여기서 P 는 예측 확률이며, E_j 는 AN, NN, BN 각각의 확률을 의미한다. M 은 PMME에 참여한 GPC의 수이며, mdl_i 은 i 번째 GPC를 의미한다. 또한, $P(E_j/mdl_i)$ 는 개별 GPC의 각각의 경우에 대한 확률을 의미한다.

(4) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 자료수신 및 시스템 운영

현재 WMO 장기예보 선도센터의 계절내 예측 시스템은 시범운영 중이다. 계절내 예측시스템의 원활한 운영을 위해, APCC는 자료 수신 상태를 실시간으로 모니터링하고, 오류에 대한 대응을 지속적으로 수행하는 등 현업에 준하는 운영을 하고 있다. 먼저 시스템 운영에 기본이 되는 각 GPC의 forecast 및 hindcast 자료는 자료제공 주기에 맞춰 주기적 또는 비주기적으로 수신한다. 또한 예측성 검증에 필요한 관측 자료는 계절내 예측결과 생산에 맞춰 주기적으로 수집한다. 계절내 MME 예측 시스템에서 수신 중인 자료에 대한 보다 자세한 사항은 Table 32에 자료의 목록과 주기, 목적별로 정리하였다. 이러한 절차를 통해 수집된 계절내 예측 자료는 WMO 장기예보 선도센터 운영뿐만 아니라 APCC, 기상청, 그리고 기상과학원의 매주 1개월 전망을 위한 예측 및 사후 분석 자료로 이용되며, 계절내 MME 예측 연구에도 사용되고 있다.

Figure 192는 현재 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지에 제공(WMO 전문가 그룹 일부만 확인가능)되고 있는 산출물을 정리한 그림이다. 추가적으로 PMME 예측정보와 DMME 예측정보 외에 개별 GPC의 예측정보 또한 MME 예측과 동일한 형식으로 제공하고 있다. 다만, 검증 정보는 hindcast MME에 대한 결과만을 제한적으로 제공하고 있다.

Table 32. Used data list for subseasonal MME prediction system.

Data Name	Variable	Download frequency	Purpose
GPCs Forecast	<ul style="list-style-type: none"> · Sea Surface Temperature · 2 metre Temperature · Mean Sea Level Pressure · Total Precipitation · Outgoing Longwave Radiation · Geopotential Height at 500hPa · U/V wind component at 850 hPa · U/V wind component at 200 hPa 	<ul style="list-style-type: none"> · weekly : ECMWF, Melbourne, Montreal, Tokyo, Washington · daily : Beijing, Exeter, Seoul 	<ul style="list-style-type: none"> · Subseasonal MME prediction
GPCs Hindcast	<ul style="list-style-type: none"> · Sea Surface Temperature · 2 metre Temperature · Mean Sea Level Pressure · Total Precipitation · Outgoing Longwave Radiation · Geopotential Height at 500hPa · U/V wind component at 850 hPa · U/V wind component at 200 hPa 	<ul style="list-style-type: none"> · First one time : Beijing, Tokyo, Melbourne, Washington · weekly : ECMWF, Montreal, · non periodical : Exeter, Seoul 	<ul style="list-style-type: none"> · Anomaly and PDF calculation
ERA-Interim daily	<ul style="list-style-type: none"> · 2 metre Temperature · Total Precipitation 	<ul style="list-style-type: none"> · monthly 	<ul style="list-style-type: none"> · Verification
NCEP Reanalysis 1	<ul style="list-style-type: none"> · 2 metre Temperature · Mean Sea Level Pressure · Geopotential Height at 500hPa · U/V wind component at 850 hPa · U/V wind component at 200 hPa 	<ul style="list-style-type: none"> · weekly 	<ul style="list-style-type: none"> · Verification · ISO monitoring and prediction
NOAA Interpolated OLR	<ul style="list-style-type: none"> · Outgoing Longwave Radiation 	<ul style="list-style-type: none"> · First one time 	<ul style="list-style-type: none"> · Verification · MVEOF mode calculation
NOAA Uninterpolated OLR	<ul style="list-style-type: none"> · Outgoing Longwave Radiation 	<ul style="list-style-type: none"> · weekly 	<ul style="list-style-type: none"> · ISO monitoring and prediction

	Products/Variable	Covering Periods	Charts	Verification scores
Probabilistic MME	<ul style="list-style-type: none"> Precipitation 2m Temperature 	<ul style="list-style-type: none"> Weeks 1, 2, 3, 4, 5, 6, 3-4, 5-6, 3-6 	<ul style="list-style-type: none"> Probabilistic maps 	<ul style="list-style-type: none"> ROC Curve ROC Score map Reliability Diagram
Deterministic MME	<ul style="list-style-type: none"> Precipitation 2m Temperature Mean Sea Level Pressure Geopotential Height at 500hPa 850hPa Wind 200hPa Wind 200hPa Velocity Potential 200hPa Stream Function 	<ul style="list-style-type: none"> Weeks 1, 2, 3, 4, 5, 6, 3-4, 5-6, 3-6 	<ul style="list-style-type: none"> Each variable anomaly map 	<ul style="list-style-type: none"> Pattern Correlation Coefficient Root Mean Square Error Time Correlation Coefficient
Intraseasonal Oscillations	<ul style="list-style-type: none"> MJO Need: OLR, U850, U200 BSISO Need: OLR, U850 Outgoing Longwave Radiation 	<ul style="list-style-type: none"> 42 days 	<ul style="list-style-type: none"> Hendon and Wheeler Diagram Hovmöller diagram 	<ul style="list-style-type: none"> Root Mean Square Error Correlation Coefficient

Figure 192. The variables and covering periods of graphical products for subseasonal prediction.

(5) WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 검증

WMO 장기예보 선도센터에서 시범운영 중인 계절내 MME 결과에 대한 검증을 실시하였다. 검증 기간은 2016년 1월 11일부터 2019 6월 24일 사이에 예측한 것이며, 검증 대상은 개별 GPC 및 MME 예측 결과이다. 검증기간을 2019년 6월 24일로 제한한 이유는 검증기준자료로 선택한 ERA-Interim 자료가 2019년 8월말까지 제공되기 때문이다. 향후 WMO 장기예보 선도센터에서는 검증을 위해 ERA5 등 다른 재분석 자료를 사용할 예정이다. 본 보고서에서 hindcast에 대한 검증을 제외한 이유는 각 GPC 별로 hindcast 시작 날짜가 다르며 때 예측마다 손실되는 선행시간이 변화되기 때문에 일정한 모델의 예측성을 분석하기 어렵기 때문이다. 반면 forecast 예측결과는 MME 참여를 전제로 예측에서 제외되는 초기 선행시간이 일정하고, 모델별 차이가 적기 때문이다. 검증 변수는 T2M과 PREC, MSLP, geopotential height at 500hPa (Z500) 이며, 검증 영역으로는 Global 영역에 대한 결과만을 제시하도록 하겠다. 또한 ERA-Interim 자료의 기후값은 계절내 예측 모델의 공통 hindcast 기간과 동일한 1999년부터 2010년까지로 정하였다. 참고로 주별 평균한 예측결과 생산을 위해 예측 시작 기준을 월요일로 정하면서 모델의 실제 예측 시작날짜부터 약 4일 정도의 예측 선행시간 결과가 생략된 검증결과이므로 분석 시 유의하여야 한다.

(가) 계절내 예측결과의 ACC 검증

먼저 전구영역에 대한 anomaly correlation coefficient (ACC) 검증을 하였다. Figure 193은 4개 변수의 전구영역 주별 평균 예측결과에 대한 ACC 검증결과를 각 GPC와 SCM 예측결과별로 검증기간 전체에 대해서 평균하여 나타낸 것이다. 변수별로 예측성을 비교해보면 일반적으로 알려진 바와 같이 PREC 변수의 예측성은 다른 변수에 비해 1주 예측에서도 ACC 값이 0.2 이상 낮게 나타났으며, 나머지 세변수의 ACC 값은 0.6에서 0.8 사이로 변수에 차이

없이 비슷한 값으로 시작하였다. 그중에서도 Z500 변수가 1주 예측에서는 비교적 높은 값을 보였으며, SCM은 0.83, ECMWF는 0.85의 값을 보였다. 기상청의 1개월 전망에서 중요한 3주 예측결과에 대한 ACC 검증 결과를 보면, 예측성이 비교적 우수한 Z500 변수에서 SCM은 0.24, ECMWF는 0.23의 값을 보였고, T2M 변수에서는 SCM은 0.34, ECMWF는 0.35의 값을 나타냈다. 일반적으로 Z500변수의 예측성이 우수하다고 알려졌으나 전구 영역에 대한 3주 예측 시 변동성이 적은 해수면 온도의 영향으로 장기 예측에서 보다 높은 예측성이 나온 것으로 분석된다.

모델별 ACC 검증결과를 비교하면, 검은색 실선으로 표시한 SCM과 붉은색 실선으로 표시한 ECMWF 예측의 ACC 검증 결과는 네 변수와 6주의 예측기간 모두에서 다른 모델에 비해 뚜렷하게 높게 나타났으며, 푸른색의 Melbourne과 남색으로 표시한 Beijing 모델은 상대적으로 낮은 ACC 값을 보였다. SCM과 ECMWF 예측결과를 비교하면 예보 1주와 예보 2주에서는 ECMWF 예측결과가 0.02 정도 약간 높게 나타났으며, 예보 3주와 4주에서는 비슷하거나 SCM이 예측성이 ECMWF보다 우수하였다. 이러한 특징을 보았을 때, 2주 이상의 계절내 규모의 예측에서 예측성을 향상시키기 위해서는 MME 기법을 활용하는 것도 유용하다는 것을 보여준다.

Figure 194와 Figure 195는 각 모델 및 변수 별로 계절내 예측을 시작한 이후부터 현재까지 예측성의 변화 경향을 파악하기 위해 각각 1주와 3주 예측 선행시간의 주별 평균 예측결과에 대한 ACC 검증 결과를 시계열로 나타낸 것이다. 주 단위로 생성되는 검증결과를 분석에 용이하도록 해당 월별로 평균하여 시계열로 표출하였다. 월별 평균하는 기준은 주 평균값의 시작일이 속하는 월을 기준으로 월별 평균을 수행하였으며, 그에 따라 4회에서 5회의 검증결과가 평균되며, 시계열의 시작과 끝은 월 평균되는 검증결과 수가 그 보다 적을 수 있다.

Figure 194의 예보 첫째 주 예측성을 보면, 앞서 분석한 바와 같이 ECMWF의 ACC 값이 꾸준히 높은 수준을 유지하고 있으며, 모델간의 격차도 일정하게 유지되는 경향을 보여준다. 또한 강수량 변수를 제외하고는 계절적인 예측성의 특성도 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 반면, Figure 195에서와 같이 예측 선행시간이 3주가 되면, SCM 예측결과가 전반적으로 가장 높은 ACC 값을 보여준다. 하지만 예측성의 변동 폭이 첫째 주보다 매우 크며 모델간의 예측성 순위 변화도 크게 나타났다.

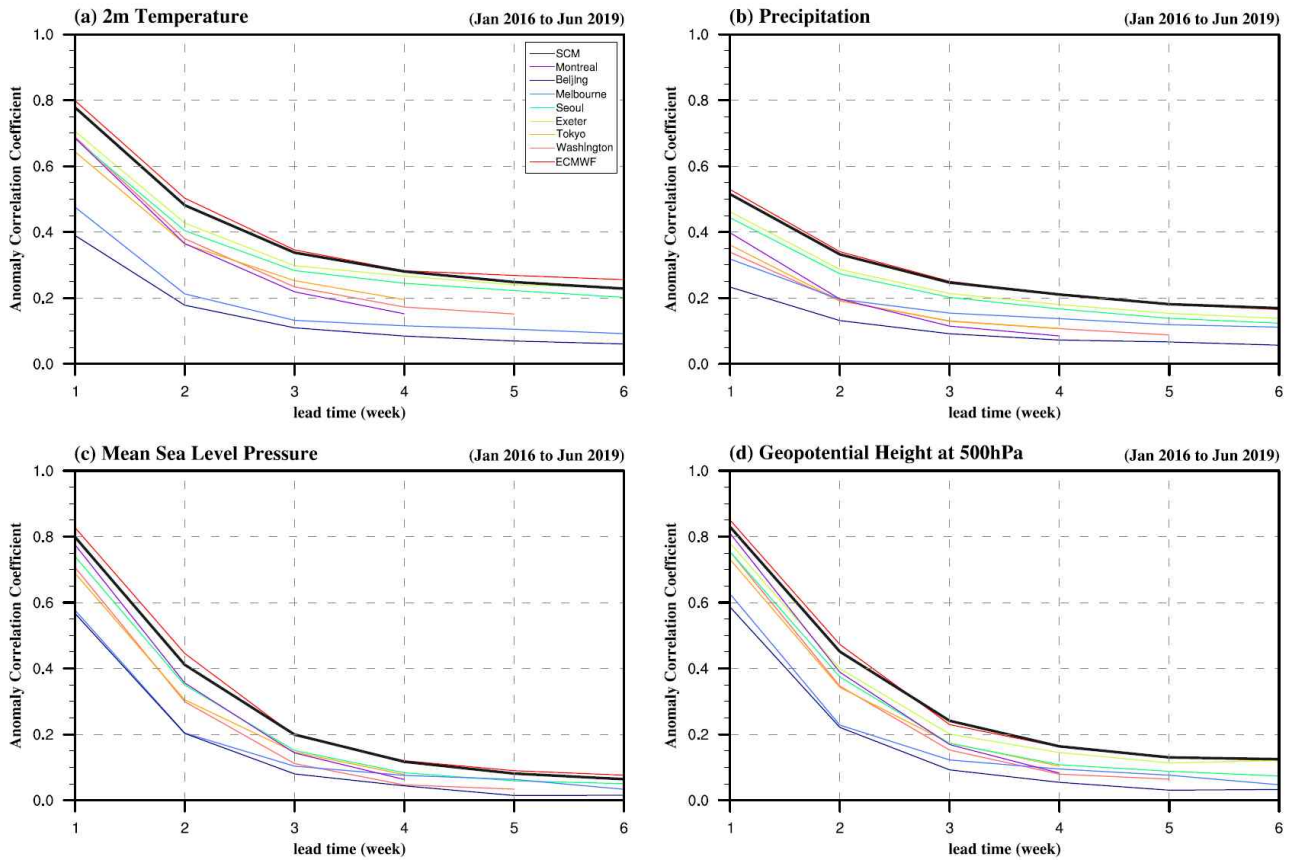


Figure 193. Anomaly correlation coefficient (ACC) of weekly mean real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe. ACC for SCM prediction is indicated by black line.

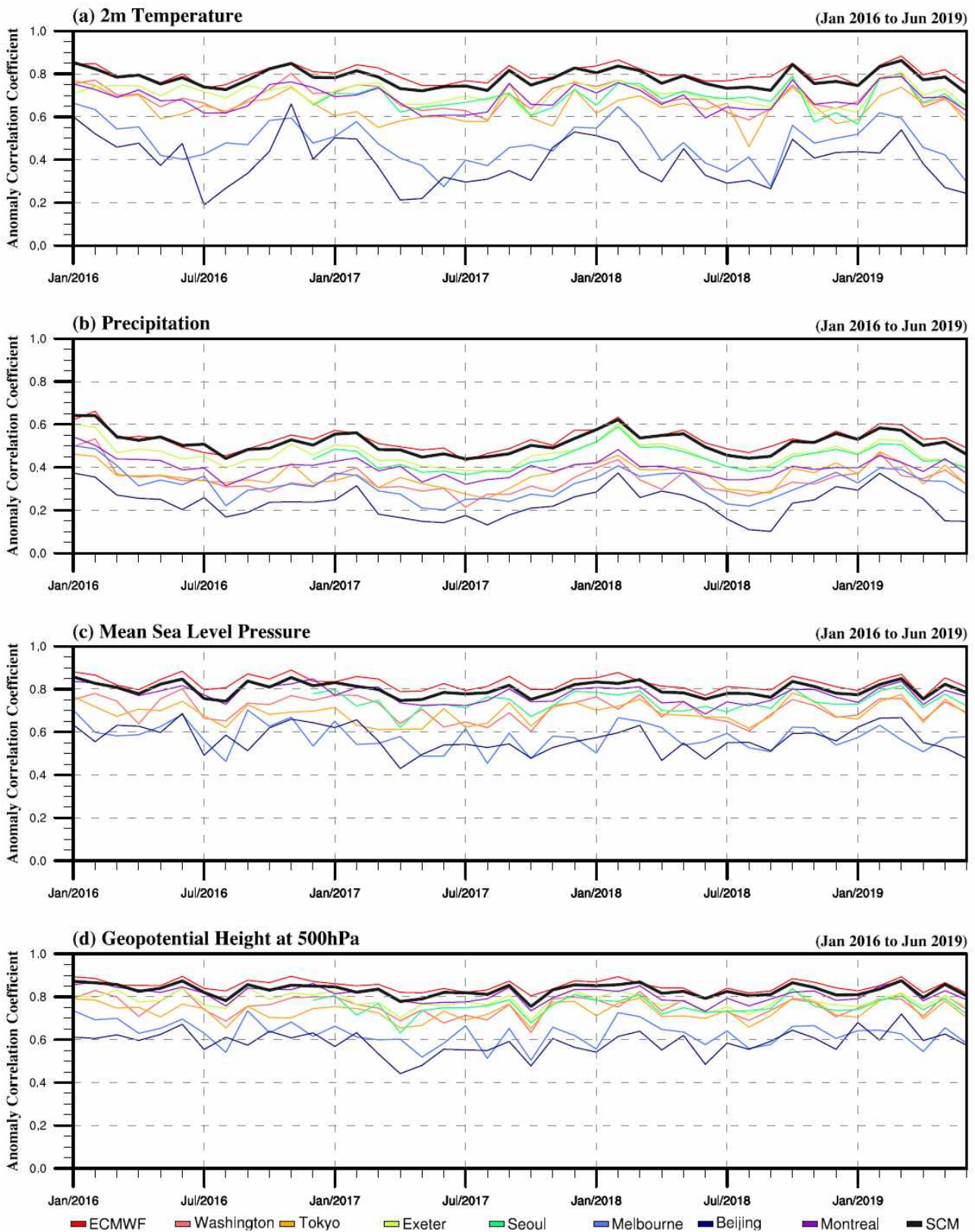


Figure 194. Anomaly correlation coefficient (ACC) of monthly averaged 1 week real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe. ACC for SCM prediction is indicated by black line.

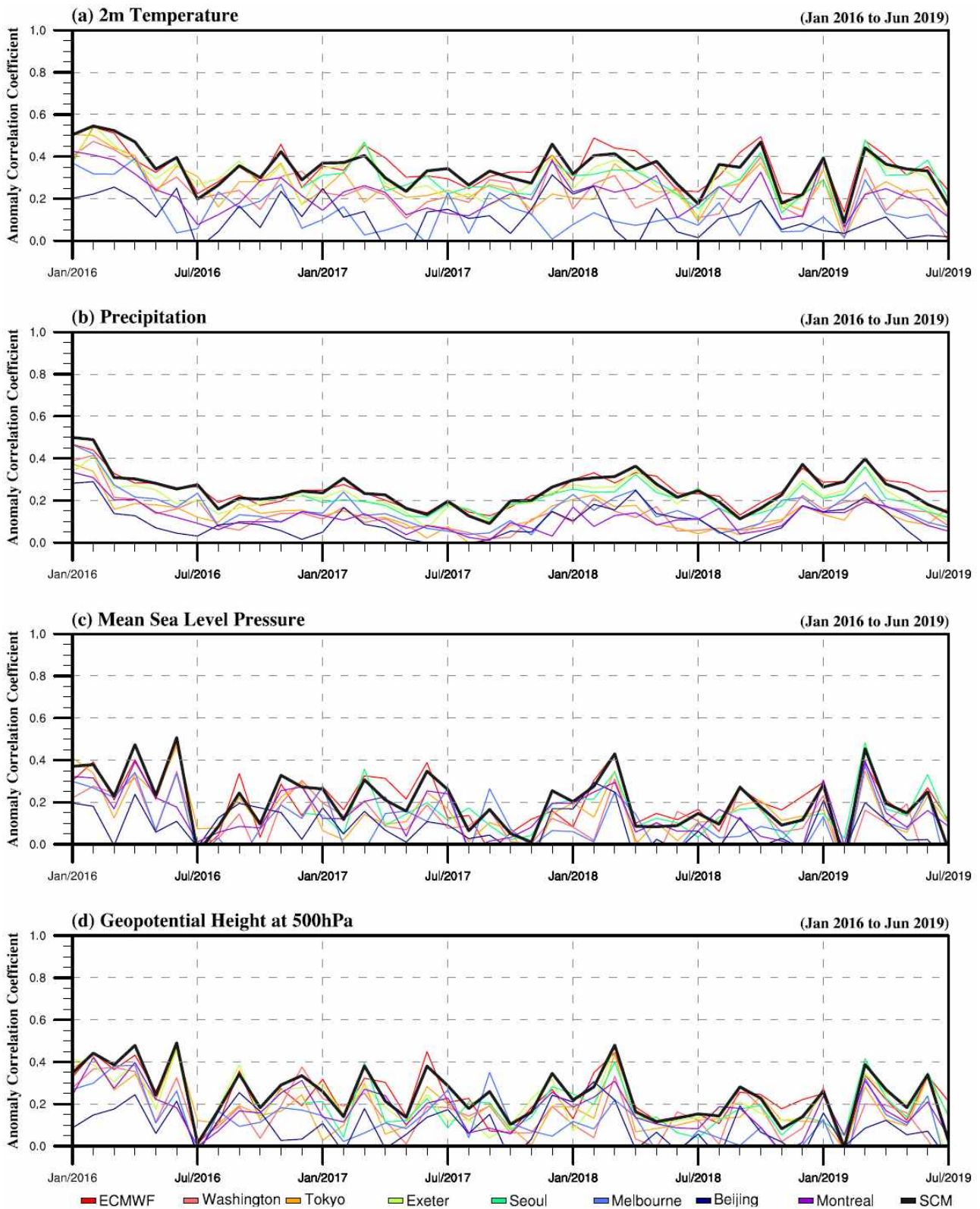


Figure 195. Anomaly correlation coefficient (ACC) of monthly averaged 3 weeks real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to July 2019 over the globe. ACC for SCM prediction is indicated by black line.

(나) 계절내 예측결과의 RMSE 검증

ACC 검증과 동일한 방법으로 전구영역에 대한 root mean square error (RMSE) 검증 결과를 4개의 변수와 각 GPC 별로 분석하였다(Figure 196). Figure 193의 ACC 검증결과를 뒤집은 것과 비슷하게 예측 초반에는 낮은 RMSE 수치를 보이며, 3주 이후의 RMSE 값이 일정한 수준에서 수렴하는 양상을 보였다. T2M과 PREC 변수에서는 SCM과 ECMWF의 ACC 값이 다른 GPC 모델들보다 뚜렷하게 낮은 값을 보였으며, MSLP와 Z500 변수에서는 그 차이가 비교적 적게 났다. T2M과 MSLP, Z500 변수에서는 1주와 2주 예측에서 ECMWF 예측이 비교적 우수하였으며, SCM은 3주 이상의 예측에서 RMSE 값이 낮게 나타났다. 반면, 다른 변수와는 달리 PREC 변수에서는 예측 초반부터 SCM의 RMSE 값이 꾸준히 낮은 값을 보였다.

Figure 197과 Figure 198은 각 모델 및 변수 별로 예측성의 변화 경향을 파악하기 위해 각각 1주와 3주 예측 선행시간의 주별 평균 예측결과에 대한 RMSE 검증 결과를 시계열로 나타낸 것이다. 예측결과 및 검증기준 자료처리 방법은 Figure 180과 동일하게 분석하였다. Figure 197은 1주 예측 선행시간에 대한 RMSE 검증 결과이다. T2M 변수는 북반구 겨울철에 예측성이 뚜렷하게 떨어지는 모습을 보였으며, 다른 변수에서는 계절적인 예측성의 변화는 적었다. 다만, 2016년 1월에는 강한 엘니뇨의 영향으로 T2M의 RMSE 값이 모든 모델에서 낮은 경향을 보였으나, PREC는 다른 기간에 비해 높은 값을 보였다. 계절예측 뿐만 아니라 계절내 규모의 예측에서도 ENSO의 변화에 따라 모델의 예측성이 차이남을 알 수 있다.

Figure 198은 3주 예측 선행시간에 대한 RMSE 검증 결과이다. 모든 변수들이 1주 예측 선행시간에 대한 결과보다 계절적인 영향을 더 받는 것으로 분석된다. T2M은 물론 MSLP와 Z500 변수에서도 북반구 겨울철에 전반적으로 RMSE 값이 높게 나타났다. 또한 예측성이 떨어지는 월에는 모든 모델에서 RMSE 값이 동시에 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 이러한 월별 변동은 MSLP와 Z500 변수에서 더욱 뚜렷하게 보였으며, 모델간의 RMSE 차이보다 크게 나타났다. 이것은 현재 계절내 예측모델의 수준에서 3주 이후의 기압계 배치에 대한 예측은 모든 모델에서 어려운 문제로 남아있음을 의미한다.

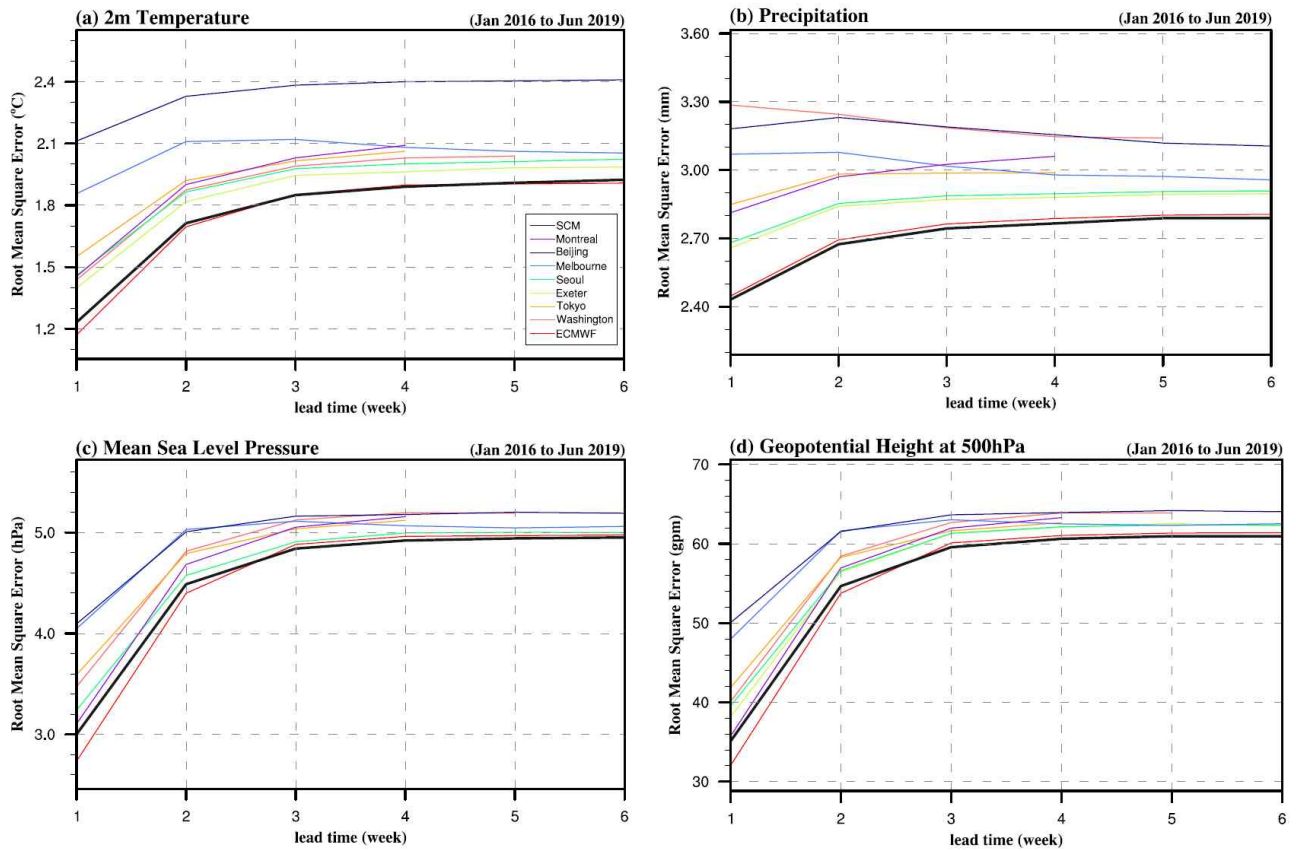


Figure 196. Root mean square error (RMSE) of weekly mean real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe. RMSE for SCM prediction is indicated by black line.

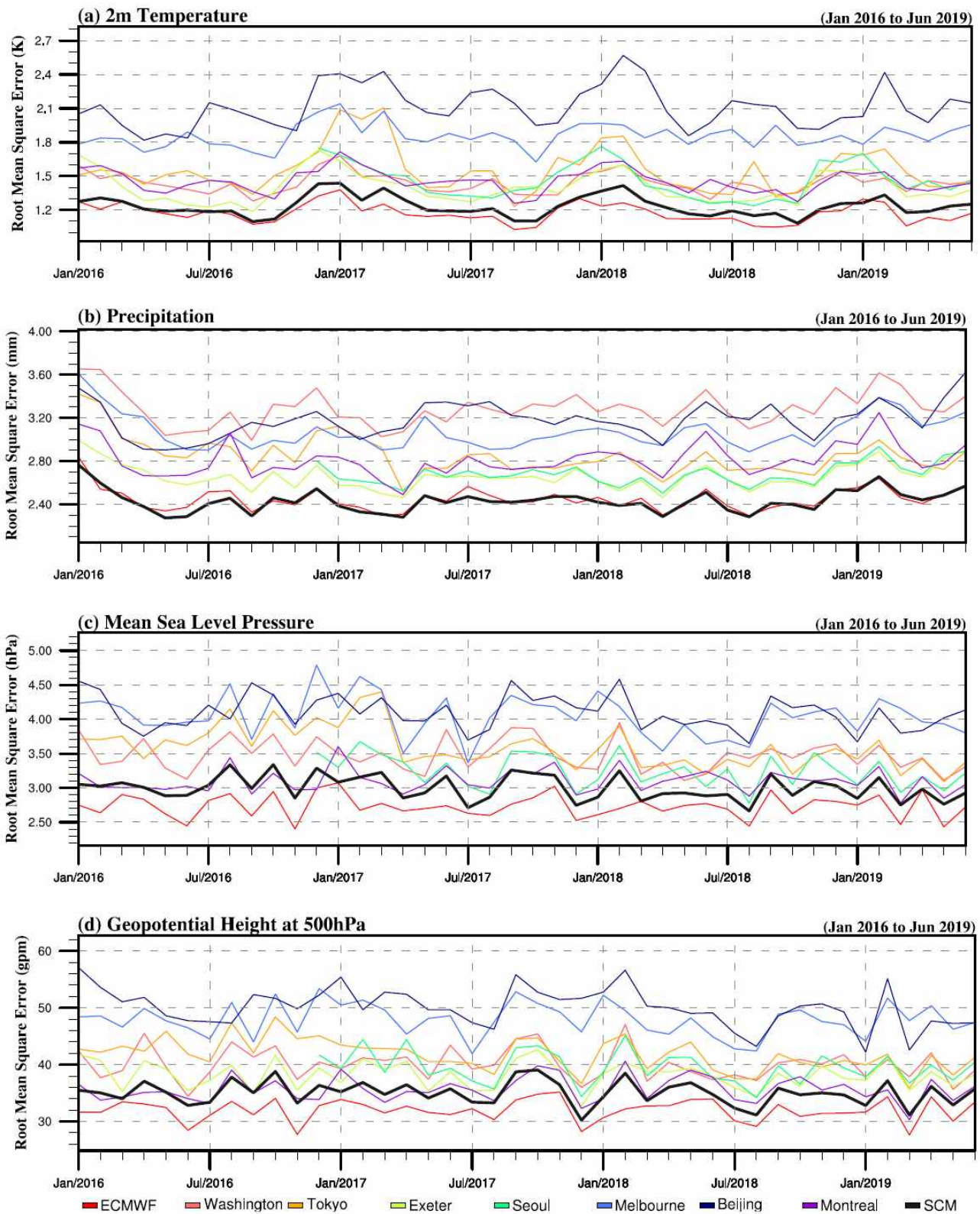


Figure 197. Root mean square error (RMSE) of monthly averaged 1 week real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to Jun 2019 over the globe. RMSE for SCM prediction is indicated by black line.

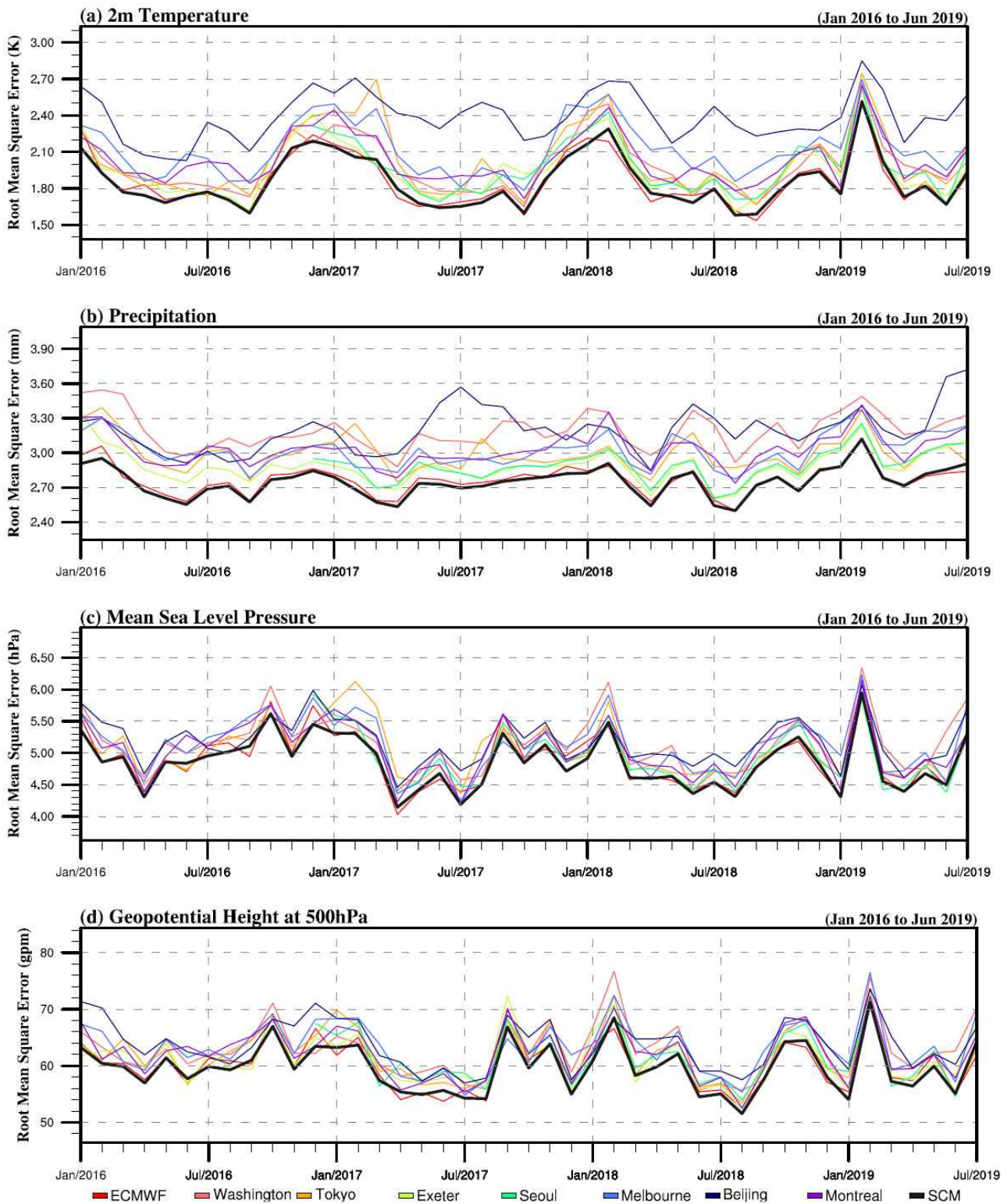


Figure 198. Root mean square error (RMSE) of monthly averaged 3 weeks real-time subseasonal forecast of (a) T2M, (b) PREC, (c) MSLP and (d) Z500 for the period Jan 2016 to July 2019 over the globe. RMSE for SCM prediction is indicated by black line.

다. WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 개선 용역 사업 지원

(1) 목적 및 기대효과

WMO 장기예보 선도센터는 2009년 4월 한국 기상청과 미국 기상청 (GPC Washington)의 공동 운영 형태로 지정되면서 표준화된 GPC 자료 및 다중모델앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME) 예측자료를 제공하여 장기예보 업무를 지원하는 역할을 수행해 왔다. 현재 WMO 장기예보 선도센터 예측시스템은 자료처리 기술, 웹시스템 기술, 데이터베이스 기술을 종합적으로 적용하여 운영하고 있으며, 사용자 맞춤형 예측정보 제공 서비스 구현, 기후 모델의 추가 등에 따른 서비스 확대, 최신 기술 적용 및 관리 방안의 개선을 통해 전 세계 WMO 회원국에 장기예보 자료를 제공하는 기본 업무를 보다 안정적으로 수행할 필요가 있다.. 또한 WMO 전문가 그룹의 권고사항을 반영한 계절 및 계절내 예측자료 생산 및 표출 서비스를 추진하여 국제 사회에 기여 할 필요가 있다. 이를 위해 2019년 4월부터 11월 15일까지 약 7.5개월 동안 WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 개선 용역 사업이 진행되었다. 용역사업에서는 “사용자 맞춤형 예측정보 제공 서비스 개발” 과 “WMO 장기예보 선도센터 및 GPC Seoul 서비스 확대”, “계절 및 계절내 예측 자료 관리 방안 개선” 으로 과업 범위로 나누어 진행하였다. WMO 장기예보 선도센터 예측 시스템 개선 용역 사업 수행으로 WMO 장기예보 선도센터 기후예측 자료 활용도와 편의성을 증대시키고, WMO 장기예보 선도센터에 자료를 제공하는 GPC와의 국제적 협업 체계를 강화할 수 있을 것으로 기대된다. 본 용역 사업은 기상청에서 발주하고 APCC의 기술지원을 통해 이루어졌다.

(2) 사업 수행 내용

(가) 사용자 맞춤형 예측정보 제공 서비스 개발

본 과업에서는 사용자 맞춤형 예측 정보를 제공하기 위해 사용자 선택 영역에 대한 Hindcast 및 Forecast의 검증결과 표출 시스템을 구축하고, 검증결과 이미지를 다운로드 할 수 있는 기능을 추가하였으며, 또한 사용자 선택 영역에 대한 Digital data 형식의 검증결과 생성하고 다운로드 할 수 있는 기능을 추가하였다. 뿐만 아니라 Digital data 형식의 예측자료를 지정된 링크를 포함하는 메일링 서비스를 구축하면서 WMO 장기예보 선도센터 사용자의 예측 및 검증자료의 활용도를 높이고자 하였다. WMO 전문가 그룹에서 제안된 표준화된 계절 예측 정보 보고서 생성 시스템을 구축하고 WMO 장기예보 선도센터와 GPC와의 국제적 협업 체계를 강화를 위해 각 GPC에 표준화된 계절 예측 보고서 제공을 위한 메일링 기능을 추가하였다.

(나) WMO 장기예보 선도센터 및 GPC Seoul 서비스 확대

본 과업에서는 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지에서 제공하는 GPC 와 다중모델 확률론적 예측의 선행시간을 3개월에서 6개월로 확장하였다. 이에 따라 기간별, 지정된 영역과 사용자 선택 영역에 대한 예측정보와 검증결과를 제공할 수 있게 되었고 Digital data 형식의 예측결과를 다운로드 할 수 있는 기능을 추가하였다. 또한 기존에 기온 및 강수를 포함한 6개 변수에 대한 예측 정보를 제공하는 것에 850 hPa의 바람장에 대한 예측 자료를 수집하고

DMME와 PMME 계절예측 정보를 생산, 그래픽 자료를 서비스 할 수 있도록 WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 시스템을 개선하였다. 850 hPa의 바람장 정보는 500 hPa 지위고도와 해면기압 등과 함께 대기순환 패턴을 이해는 중요한 인자 활용될 수 있다. 또한 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자의 요구에 부합할 뿐만 아니라 다양한 예측 정보 서비스는 확대는 WMO 장기예보 선도센터 예측정보 활용성 증대에 기여에 기여할 수 있을 것이다.

(다) 계절 및 계절내 예측자료 관리 방안 개선

2019년 6월 신규 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 서비스가 오픈되면서, 기존에 제공하던 계절 예측 및 검증 결과의 이미지와 digital data가 신규 홈페이지의 형식과 달라 제공하지 못하는 한계가 있었다. 이를 개선하고자 과거 생산된 GPC 및 MME의 이미지와 digital data 형식을 개선하여 신규 홈페이지에서 사용자들이 확인할 수 있게 과거자료를 변환하였다. 또한 기후값 계산 방식의 변경과 다양한 MME 계산 방법을 고려하여 디렉토리 구조를 변경하였으며, 개별 모델의 예측결과를 결정론적 예측과 확률론적 예측으로 분리하여 저장할 수 있도록 시스템을 변경하여 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측 운영자가 예측자료를 효율적으로 관리 할 수 있도록 개선하였다. 시스템 내 디렉토리 및 파일 네이밍 규칙 중 대/소문자 사용과 약어 사용 등의 자료 구조와 네이밍 규칙을 개선하였고 계절예측 시스템 내에 반복적으로 사용하는 기능을 모듈화하여 시스템의 효율성을 증대시켰다. 또한 일반사용자와 관리자의 로그인 페이지 분리를 통해 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 보안성을 강화시켰다.

5. 요약 및 결론

신뢰도 높은 장기예보 생산에 기여하고자 APCC와 기상청의 협력 과제를 수행하였다. 이 과제에서는 현업 장기예보 업무에 직접 적용 할 수 있도록 관측 자료와 모델 자료를 기반으로 다양한 연구를 수행하였다. 각 장의 주요 연구 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

2장에서는 기후 예측 및 분석 업무에 활용하고자 관측 자료를 바탕으로 우리나라 기후 변동성에 대하여 연구하였다. 먼저 우리나라 폭염에 대해 분석하였는데 대부분의 폭염 사례는 대기 순환 구조에 따라 유라시아 대륙을 가로지르는 동-서 방향 파동형태 폭염과 아열대 북서태평양부터 우리나라까지 연결되는 남-북 방향 파동형태 폭염으로 나뉘어진다. 동-서 방향 파동 형태 폭염은 대서양 대기 순환과 인도 여름 몬순의 영향을 받는 반면, 남-북 방향 파동 형태 폭염은 아열대 서태평양 대류활동 강화의 영향을 받는 것으로 분석되었다. 둘째로 우리나라 여름철 강수 변동성을 북서태평양 아열대 고기압과의 관련성을 바탕으로 살펴보았다. 특히 둘 사이에 비선형적인 관련성이 뚜렷하게 나타났는데 북서태평양 아열대 고기압의 발달과 함께 우리나라 강수가 증가하는 경우 엘니뇨 쇠퇴와 인도양 온난화 신호가 영향을 미친 반면, 북서태평양 지역에 저기압성 순환이 발달하면서 강수가 증가한 경우는 라니냐 쇠퇴 신호가 관련되어 있다. 또한 북서태평양 지역에 저기압성 순환이 발달하면서 강수가 감소한 경우는 아열대 서태평양 대류활동의 영향이 크게 나타났으며 북서태평양 아열대 고기압이 우리나라까지 북상하여 발달한 경우에는 강수가 감소하는데 이는 중태평양 엘니뇨의 쇠퇴와 관련 있다는 것을 확인하였다.

다음으로 우리나라 여름철과 겨울철 월별 기온 극값 사례에 대한 심층 분석을 하였다. 여름철 사례는 사례별로 고온이 나타난 원인이 다양했다. 6월 사례는 대규모 순환장이나 기후 인자의 영향 보다는 하층에서 고온 건조한 공기가 서풍을 타고 유입되면서 기온이 상승한 사례였다. 7월 사례는 아열대 서태평양 대류활동과 유라시아 대륙에서의 파동전파로 인한 순압구조의 고기압성 순환 영향으로 기온이 높았고, 고기압성 순환의 발달에 북대서양 해수면온도와 상층 고기압의 장출 등이 영향을 준 것으로 분석되었다. 8월 사례는 캄차카반도 주변의 블로킹 고기압과 몽골 상층 고기압성 편차에 의한 고온 건조한 북풍의 영향을 받아 기온이 높았던 사례였다. 겨울철 사례는 저온이 발생한 원인이 대체로 비슷했는데, 우랄산맥 주변에 기압능이 발달하고 동아시아 기압골이 강해지면서 우리나라는 북풍의 영향을 받아 기온이 하강했다. 기압능과 기압골 발달에는 북극 해빙의 영향, 특히 바렌츠-카라 해의 적은 해빙의 영향과 열대 태평양의 라니냐 해수면온도 분포와 인도-서태평양에서 활발한 대류활동의 영향으로 인한 저기압성 순환 형성 등이 공통적으로 영향을 준 것으로 분석되었다. 기온 극값 사례에 대한 분석 내용은 기상청에서 사례집으로 발간되었다.

또한 Prophet 시계열 모델과 기후지수를 이용하여 한반도 3개월 기온예측과 겨울철 기온 예측을 간단히 모의하였다. Prophet 모델은 시계열 데이터의 트렌드와 계절성을 반영하여 예측하는 것에 초점이 맞추어진 모델이다. Prophet 모델로 한반도 기온 트렌드 변화점을 분석한 결과 1979년부터 2018년까지 한반도 기온은 약 1.2°C 증가했으며 1992년 5월을 기점으로 트렌드가 변화했다. 기후지수 AO, SOI, TSA, PACWARM을 이용하여 한반도 3개월기온을 예측하였다. 2017년부터 2018년 기간에 대한 Prophet 모델의 Hit rate는 0.625로 나타났고

hss는 0.438로 나타났다. 같은 기간 MME는 Hit rate가 0.521, hss가 0.313으로 나타났다. 겨울철 기온 예측에서도 Prophet 모형이 MME에 비해 아노말리 상관관계와 Hit rate, hss가 개선된 결과를 보여주었다.

3장에는 현업 장기예보에 사용되는 기후예측 모델의 예측 성능 분석과 예측 기술 개발에 관한 내용을 기술하였다. 먼저 우리나라 강수와 열대 서태평양 강수의 높은 관련성을 바탕으로 기후예측 모델의 결과를 활용하였다. 이는 대부분의 기후예측 모델에서 열대 서태평양 지역 강수를 합리적으로 모의하는 것에 기반을 둔 것으로 모델이 예측한 서태평양 강수를 바탕으로 우리나라 월별 강수 예측 결과를 도출하는 것이다. 분석 결과 4월, 9월, 11월과 12월 우리나라 강수 예측에 이러한 관련성을 적용할 수 있는 것으로 확인되었다. 둘째로 APCC MME를 기반으로 전문가의 지식을 통합하여 상세화된 우리나라 월별 기온, 강수 예측 정보를 생산하는 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 지난 2017년부터 구축되기 시작하여 올해에는 특히 1개월 선행 시간의 강수 예측 시스템을 구축하는데 주력하였고 시스템의 기술적인 부분을 보다 발전시켰다. 셋째로 기상청에 제공하고 있는 계절내 MME 예측결과의 현업 예보에 대한 활용도를 높이기 위해 기상청 예보관의 의견 등을 수렴하여 콘텐츠를 추가로 개발하였다. 먼저 우리나라 기온 예측을 위한 해면기압 예측결과를 추가하였으며, 우리나라 주변 지역의 변수 및 모델별 일단위 시계열 예측정보를 추가하였다. 또한 MME 예측뿐만 아니라 개별모델의 예측정보를 표 형식으로 추가하였으며 해당 모델들의 hindcast에 대한 검증 결과도 추가하였다. 마지막으로 북극진동과 엘니뇨-남방진동의 위상에 따른 우리나라 겨울철 주별 기온 특성과 이에 대한 계절내 예측 모델에서의 예측성을 분석하였다. 재분석 자료를 통해 살펴보면, AO 지수와 Nino3.4 지수가 모두 10.5이상일 때 두 기후인자에 의한 대기순환장 패턴은 약 4주 전부터 유의하게 지속되며 우리나라 겨울철 기온의 예측성을 기대할 수 있다. 계절 내 예측 모델 자료에서도 약 3주 전 예측에서까지 두 기후인자에 의한 동아시아 지역의 대기순환장 패턴을 잘 모의하였으며 우리나라 겨울철 주별 평균 기온의 경향성도 잘 모의하는 것으로 나타났다.

4장에는 WMO 장기예보 선도센터 운영에 관한 사항을 기술하였다. WMO 장기예보 선도센터는 수집된 다양한 형태의 각 GPC 예측자료를 표준화하고 DMME와 PMME 기법을 적용하여 얻은 MME 계절예측 결과와 검증 결과를 홈페이지를 통해 디지털 및 그래픽 형태의 자료로 WMO 회원국 및 일반 사용자에게 지속적이고 안정적으로 제공하고 있다. 또한 WMO 장기예보 선도센터에 생산되는 자료들은 WMO가 주관하는 다양한 지역기후포럼에 제공되어 각 지역의 계절전망 생산에 기여하고 있으며, 2019년에는 지역기후포럼에 2회 참석하고 4회 자료를 제공하였으며 이와 함께 우리나라 기상청의 매월 3개월 전망 회의에 동아시아와 한반도에 초점을 맞춘 계절예측 정보를 제공하였다. 뿐만 아니라 WMO가 매 분기 발간하는 GSCU의 기초자료로 제공되었다. 이와 같은 WMO 장기예보 선도센터의 국내·외 활동을 통해 국내외 협력 관계를 더욱 공고히 함으로써 WMO 장기예보 선도센터의 역할과 입지를 강화할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 WMO 장기예보 선도센터 계절 예측 정보 활용성과 사용자 편의성 증대와 보다 효율적이고 안정적인 시스템 운영을 위해 사용자 맞춤형 예측정보 제공 서비스 개발, 홈페이지 서비스 확대, 예측 자료 관리 방안 개선 측면의 WMO 장기예보 선도센터의 예측시스템 개선 작업이 함께 진행되었다. 본 과제를 통해 보다 효율적이고 안정적인 기후예측 서비스를 정기적으로 제공함으로써 WMO 장기예보 선도센터

기후예측자료의 활용도가 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같이 이 과제에서는 현업 장기예보에 직접적으로 기여할 수 있는 다양한 연구들을 수행하였으며 실제로 연구 결과들은 현업 장기예보 토의에 참여를 통해 활용되었다. 다양한 예보 토의 지원 및 기타 현업 지원에 관한 사항은 부록에 첨부하였다. APCC에서는 우리나라 기후 예측관련 과학적 역량을 강화하고 현업 장기예보 업무에 실질적인 도움이 되고자 내년도에도 이 과제를 지속적으로 수행할 계획이다.

사사

o 본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

References

- 관계부처합동, 2018: 이상기후보고서. 189-191.
- 국종성, 안순일, 예상욱, 함유근, 2017: 2016 엘니뇨 백서. *기상청*, 279 pp.
- 기상청 기후예측과, 2018: 기후감시 및 분석 기반의 장기예보 가이드스(III). *기상청*, 226 pp.
- 김연희, 김맹기, 이우섭, 2008: 한반도 기온 및 강수량 변동에 영향을 미치는 광역규모 기후지수들에 대한 고찰. *대기*, **18**(2), 85-97.
- 김유진, 우성호, 임슬희, 이우섭, 이현주, 윤순조, 김미아, 여새림, 김가은, 김상철, 2019: 현업 장기예보 정확도 향상을 위한 APCC-기상청 협력 시스템 구축 II. *APEC기후센터 연구보고서 2018*, 156 pp.
- 김진수, 국종성, 예상욱, 김현경, 박이형, 2014: 두 가지 형태의 엘니뇨 정의에 따른 한반도 기후 상관성 분석. *대기*, **24**, 89-99, <https://doi.org/10.14191/atmos.2014.24.1.089>.
- 손수정, 이태수, 2017: 통계적 축소법을 이용한 한반도 미래 기온 예측. *국토지리학회지*, **51**(3), 323-334.
- 안순일, 하경자, 서경환, 예상욱, 민승기, 허창희, 2011: 한반도 기후변화의 추세와 원인 고찰. *한국기후변화학회지*, **2**(4), 237-251.
- 원유진, 2017: *한반도 여름철 월별 기온 변동성 분석과 물리-통계 예측모델 개발*. Ph. D. thesis, 해양융합학과, 한양대학교.
- 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>.
- Ahn, J.-B., and J. Lee, 2016: A new multimodel ensemble method using nonlinear genetic algorithm: An application to boreal winter surface air temperature and precipitation prediction. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**(16), 9263-9277, doi:10.1002/2016JD025151.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.*, **104**(D24), 30937-30946, <https://doi.org/10.1029/1999jd900445>.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**(5542), 581-584, <https://doi.org/10.1126/science.1063315>.
- Baldwin, M. P., D. B. Stephenson, D. W. J. Thompson, T. J. Dunkerton, A. J. Charlton, and A. O' Neill, 2003: Stratospheric memory and extended-range weather forecasts. *Science*, **301**(5633), 636-640, <https://doi.org/10.1126/science.1087143>.

- Black, J., N. C. Johnson, S. Baxter, S. B. Feldstein, D. S. Harnos, and M. L. L'Heureux, 2017: The predictors and Forecast Skill of Northern Hemisphere Teleconnection PATterns for Lead times of 3-4 Weeks. *Mon. Weather Rev.*, **145**(7), 2855-2877, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-16-0394.1>.
- Breiman, L., 2001: Random forests. *Machine learning*, **45**, 5-32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Cai, W., L. Wu, M. Lengaigne, T. Li, S. Mcgregor, J. S. Kug, S, and Y. G. Ham, 2019: Pantropical climate interactions. *Science*, **363**(6430), eaav4236, <https://doi.org/10.1126/science.aav4236>.
- Chen, H.-F. Graf, and R. Huang, 2000: The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **17**, 48-60, <https://doi.org/10.1007/s00376-000-0042-5>.
- Chen, W., M. Takahashi, and H.-F. Graf, 2003: Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST. *J. Geophys. Res.*, **108**(D24), 4797, <https://doi.org/10.1029/2003JD003834>.
- Chen, W., S. Yang, and R.-H. Huang, 2005: Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon. *J. Geophys. Res.*, **110**(D14), <https://doi.org/10.1029/2004JD005669>.
- Chen, W., X. Lan, L. Wang, and Y. MA, 2013: The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia. *Chin. Sci. Bull.*, **58**(12), 1355-1362, <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5654-5>.
- Cheung, H. N., W. Zhou, H. Y. Mok, and M. C. Wu, 2012: Relationship between Ural-Siberian Blocking and the East Asian Winter Monsoon in Relation to the Arctic Oscillation and the El Niño-Southern Oscillation. *J. Clim.*, **25**(12), 4242-4257, <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00225.1>.
- Choi, G.-Y., W.-T. Kwon, D. A. Robinson, 2006: Seasonal Onset and Duration in South Korea. *J. Korean Geograp. Soc.*, **41**(4), 435-456.
- Chowdary, J. S., S. P. Xie, J. J. Luo, J. Hafner, S. Behera, Y. Masumoto, and T. Yamagata, 2011: Predictability of northwest Pacific climate during summer and the role of the tropical Indian Ocean. *Clim Dynam.*, **36**, 607-621, <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0686-5>.
- Cohen, J., and J. Jones, 2011: A new index for more accurate winter predictions. *Geophys. Res. Lett.*, **38**(21), <https://doi.org/10.1029/2011GL049626>.
- Cohen, J., J. Screen, J. Furtado, M. Barlow D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff,

- D. Entekhabi, J. Overland, and J. Jones, 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat. Geosci.*, **7**(9), 627–637, <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>.
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J. Clim.*, **18**(17), 3483–3505, <https://doi.org/10.1175/JCLI3473.1>.
- Ding, Y., 1990: Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **44**, 281–292, <https://doi.org/10.1007/BF01026822>.
- Feldstein, S. B., 2000: The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns. *J. Clim.*, **13**(24), 4430–4440, <https://doi.org/10.1175/1520-0442>.
- Francis, J. A., and S. J. Vavrus, 2015: Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 014005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014005>.
- Francis, J., and N. Skific, 2015: Evidence linking rapid Arctic warming to mid-latitude weather patterns. *Philos. Trans. R. Soc.*, **373**(2045), 20140170, <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0170>.
- Gao, M., B. Wang, J. Yang, and W. Dong, 2018: Are peak summer sultry heat wave days over the Yangtze-Huaihe River basin predictable?. *J. Clim. Res.*, **31**(6), 2185–2196, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0342.1>.
- Gong, D., S. Wang, and J. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **28**(10), 2073–2076, <https://doi.org/10.1029/2000GL012311>.
- Gong, D.-Y., and C.-H. Ho, 2002: The Siberian high and climate change over middle to high latitude Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, **72**, 1–9, <https://doi.org/10.1007/s007040200008>.
- Graham, R. J., and Coauthors, 2011: Long-range forecasting and the Global Framework for Climate Services. *Clim. Res.*, **47**, 47–55, doi:<https://doi.org/10.3354/cr00963>.
- Guan, Z., and T. Yamagata, 2003: The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(10), 1544, <https://doi.org/10.1029/2002GL016831>.
- Häkkinen, S., P. B. Rhines, and D. L. Worthen, 2011: Atmospheric blocking and Atlantic multidecadal ocean variability. *Science*, **334**(6056), 655–659, <https://doi.org/10.1126/science.1205683>.
- Harvey, A. C., and S. Peters, 1990: Estimation procedures for structural time series models. *J. Forecast.*, **9**(2), 89–108, <https://doi.org/10.1002/for.3980090203>.
- Hastie, T., and R. Tibshirani, 1987: Generalized additive models: some applications. *J. Amer. Stat. Assoc.*, **82**(398), 371–386, <https://doi.org/10.2307/2289439>.

- He, S., and H. Wang, 2013: Oscillating relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO. *J. Clim.*, **26**(24), 9819–9838, <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00174.1>.
- Higgins, R. W., Y. Zhou and H.-K. Kim, 2001: Relationships between El Nino–Southern Oscillation and the Arctic Oscillation: A Climate–Weather Link. *NCEP/Climate Prediction Center ATLAS 8*.
- Holland, J. H., 1975: Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. *Univ. Michigan Press*, 228 pp.
- Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1981: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon. Weather. Rev.*, **109**(4), 813–829, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0813:psapaw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0813:psapaw>2.0.co;2).
- Huang, W., R. Chen, Z. Yang, B. Wang, and W. Ma, 2017: Exploring the combined effects of the Arctic Oscillation and ENSO on the wintertime climate over East Asia using self-organizing maps. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**(17), 9107–9129, <https://doi.org/10.1002/2017JD026812>.
- Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(14), <https://doi.org/10.1029/2005GL023024>.
- Jhun, J., and E. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Clim.*, **17**(4), 711–726, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0711:aneawm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0711:aneawm>2.0.co;2).
- Ji, L., S. Sun, K. Arpe, and L. Bengtsson, 1997: Nodel study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence. *Adv. Atmos. Sci.*, **17**, 1–22, <https://doi.org/10.1007/s00376-997-0039-4>.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**(11), 1631–1643, <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>.
- Kang, H., C.-K. Park, S. N. Hameed, and K. Ashok, 2009: Statistical downscaling of precipitation in Korea using multimodel output variables as predictors. *Mon. Weather Rev.*, **137**(6) 1928–1938, <https://doi.org/10.1175/2008MWR2706.1>.
- Kang, I. S., C. H. Ho, Y. K. Lim, and K. M. Lau, 1999: Principal modes of climatological seasonal and intraseasonal variations of the Asian summer monsoon. *Mon. Weather Rev.*, **127**(3), 322–340, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<032:PMOCSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<032:PMOCSA>2.0.CO;2).
- Kang, I.-S., and J. Shukla, 2006: Dynamical seasonal prediction and predictability of the

monsoon. Springer. *The Asian Monsoon*, 585-612, 978-3-540-40610-5, https://doi.org/10.1007/3-540-37722-0_15.

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.*, **4646**, <https://doi.org/10.1038/ncomms5646>.

Kim, G., J. B. Ahn, V. N. Kryjov, S. J. Sohn, W. T. Yun, R. Graham, and J. P. Ceron, 2016: Global and regional skill of the seasonal predictions by WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble. *Int. J. Climatol.*, **36**(4), 1657-1675.

Kim, J. E., S. W. Yeh, and S. Y. Hong, 2009: Two types of strong northeast Asian summer monsoon. *J. Clim.*, **22**(16), 4406-4417, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2434.1>.

Kim, J.-W., S.-I. An, S.-Y. Jun, H.-J. Park, and S.-W. Yeh, 2017: ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone. *Clim. Dynam.*, **49**(4), 1157-1179, <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3371-5>.

Kirtman, B. P., and Coauthors, 2014: The North American Multi-Model Ensemble (NMME): Phase-1, seasonal-to-interannual prediction; phase-2, toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**(4), 585-601

Korea Clim. Rescal Administration (KMA), 2011: Typhoon White Book. 358 pp, 11-1360016-000001-01 (in Korean).

Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **132**(619), 2009-2030, <https://doi.org/10.1256/qj.05.204>.

Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, Z. Zhang, T. LaRow, D. Bachiochi, C. E. Williford, S. Gadgil, and S. Surendran, 2000: Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. Clim.*, **13**(23), 4196-4216.

Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min, and S.-W. Son, 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nat. Geosci.*, **8**(10), 759-762, <https://doi.org/10.1038/ngeo2517>.

Kwon, M., J. G. Jhun, B. Wang, S. I. An, and J. S. Kug, 2005: Decadal change in relationship between East Asian and WNP summer monsoons. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(16), L16709, <https://doi.org/10.1029/2005GL023026>.

Lee, E. J., J. G. Jhun, and C. K. Park, 2005: Remote connection of the northeast Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index. *J. Clim.*, **18**(21), 4381-4393, <https://doi.org/10.1175/JCLI3545.1>

- Lee, H.-S., and J.-G. Jhun, 2006: Two types of the Asian continental blocking and their relation to the east Asian monsoon during the boreal winter. *Geophys. Res. Lett.*, **33**(22), L22707, <https://doi.org/10.1029/2006GL027948>.
- Lee, W. S., and M. L. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *Inter. J. Clim.*, **36**(15), 4815–4830, <https://doi.org/10.1002/joc.4671>.
- Li, C., 1990: Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events. *Adv. Atmos. Sci.*, **7**, 36–46, <https://doi.org/10.1007/bf02919166>.
- Li, S., J. Lu, G., Huang, and K. Hu, 2008: Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM study. *J. Clim.*, **21**(22), 6080–6088, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2433.1>.
- Liebmann, B., and C. A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**(6), 1275–1277.
- Lin, J. S., B. Wu, and T. J. Zhou, 2016: Is the interdecadal circumglobal teleconnection pattern excited by the Atlantic multidecadal Oscillation?. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **9**(6), 451–457, <https://doi.org/10.1080/16742834.2016.1233800>.
- Liren, J., S. Sun, and K. Arpe, 1997: Model study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 1–22.
- Liu, Y., L. Wang, W. Zhou, and W. Chen, 2014: Three Eurasian teleconnection patterns: Spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies. *Clim. Dynam.*, **42**(11), 2817–2839, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2163-z>.
- Lu, R., 2004: Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction. *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II*, **82**, 155–165, <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.155>.
- Lu, R., and B. Dong, 2001: Westward extension of North Pacific subtropical high in summer. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, **79**(6), 1229–1241, <https://doi.org/10.2151/jmsj.79.1229>.
- Lu, R., and Z. Lin, 2009: Role of subtropical precipitation anomalies in maintaining the summertime meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia. *J. Clim.*, **22**(8), 2058–2072, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2444.1>.
- Luo, D., Y. Xiao, Y. Yao, A. Dai, I. Simmonds, and C. L. E. Franzke, 2016: Impact of ural blocking on winter warm Arctic–Cold Eurasian anomalies. Part I: Blocking-induced amplification. *J. Clim.*, **29**(11), 3925–3947, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0611.1>.
- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, and C.-K. Park, 2009: A probabilistic multimodel ensemble approach

- to seasonal prediction. *Wea. Forecasting*, **24**(3), 812–828, doi:10.1175/2008WAF2222140.1.
- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, and S. M. Oh, 2014: Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting: Retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013). *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**(21), 12 132–12 150, doi:https://doi.org/10.1002/2014JD022230.
- Mitchell, D. M., L. J. Gray, J. Anstey, M. P. Baldwin, and A. J. Charlton-Perez, 2013: The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate. *J. Clim.*, **26**(8), 2668–2682, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00030.1.
- Monerie, P. A., J. Robson, B. Dong, and N. Dunstone, 2018: A role of the Atlantic Ocean in predicting summer surface air temperature over North East Asia?. *Clim. Dynam.*, **51**, 473–491, https://doi.org/10.1007/s00382-017-3935-z.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geoscience*, **7**(12), 869–873, https://doi.org/10.1038/ngeo2277.
- Nakagawa, K. I., and K. Yamazaki, 2006: What kind of stratospheric sudden warming propagates to the troposphere?. *Geophys. Res. Lett.*, **33**(4), L04801, https://doi.org/10.1029/2005GL024784.
- Nigam, S., 1994: On the dynamical basis for the Asian summer monsoon rainfall-El Niño relationship. *J. Clim.*, **7**(11), 1750–1771, https://doi.org/10.1175/1520-0042(1994)007<1750:OTDBFT>2.0.CO;2
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, **65**(3), 373–390, https://doi.org/10.1251/jmsj1965.65.3_373.
- Overland, J., J. A. Francis, R. Hall, E. Hanna, S.-J. Kim, and T. Vihma, 2015: The melting arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected?. *J. Clim.*, **28**(20), 7917–7932, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00822.1.
- Palmer, T. N., and Coauthors, 2004: Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal-to-Interannual Prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**(6), 853–872.
- Park, C. Y., 2016: A simple diagnostic statistic for determining the size of random forest. *KDISS*, **27**(4), 855–863, <https://doi.org/10.7465/jkdi.2016.27.4.855>.
- Park, H. L., K. H. Seo, and J. H. Son, 2015: Development of a dynamics-based statistical prediction model for the Changma onset. *J. Clim.*, **28**(17), 6647–6666,

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00502.1>

- Park, H.-J., and J.-B. Ahn, 2016: Combined effect of the Arctic Oscillation and the Western Pacific pattern on East Asia winter temperature. *Clim. Dynam.*, **46**, 3205–3221, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2763-2>
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and S. Yang, 2011: Relationship between the Arctic Oscillation and Cold Surges over East Asia. *J. Clim.*, **24**, 68–83, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3529.1>
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and Y. Deng, 2014: A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Clim. Dynam.*, **43**, 753–770, <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1817-6>.
- 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. *J. Clim.*, **15**(13), 1609–1625, [https://doi.org/10.1175/1520-0042\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0042(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2).
- Sakai, K., and R. Kawamura, 2009: Remote response of the East Asian winter monsoon to tropical forcing related to El Niño–Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, **114**(D6), <https://doi.org/10.1029/2008JD010824>.
- Screen, J. A., and I. Simmonds, 2014: Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. *Nat. Clim. Change*, **4**(8), 704–709, <https://doi.org/10.1038/nclimate2271>.
- Shi, N., 1996: Features of the East Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate. *Quart. J. Appl. Meteor.*, **7**, 175–182.
- 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. *Clim. Dynam.*, **42**(11–12), 3171–3186, <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2008-1>.
- Song, L., R. Wu, and Y. Jiao, 2017: Relative contributions of synoptic and intraseasonal variations to strong cold events over eastern China. *Clim. Dynam.*, **50**, 4619–4634, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3894-4>.
- Sui, C. H., P. H. Chung, T. Li, 2007: Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high. *Geophys. Res. Lett.*, **34**(11), <https://doi.org/10.1029/2006GL029204>.
- Sun, S. Q. and B. M. Sun, 1995: The relationship between the anomalous winter monsoon circulation over East Asia and summer drought/flooding in the Yangtze and Huaihe River valley. *Acta Meteorol. Sin.*, **57**(4), 513–522.
- 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. *J. Atmos. Sci.*, **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).
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005: Mechanisms of Intraseasonal Amplification of the Cold Siberian High. *J. Atmos. Sci.*, **62**(12), 4423–4440, <https://doi.org/10.1175/jas3629.1>.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2013: Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves. *J. Clim.*, **26**(23), 9445–9461, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00842.1>.
- Tang, Q., X. Zhang, X. Yang, and J. A. Francis, 2013: Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss. *Environ. Res. Lett.*, **8**, 014036, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014036>.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**(9), 1297–1300, <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2001: Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*, **293**(5527), 85–89, <https://doi.org/10.1126/science.1058958>.
- Tomita, T., and T. Yosinari, 1996: Role of the northeast winter monsoon on the biennial oscillation of the ENSO/monsoon system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**(4), 399–413, https://doi.org/10.2151/jmsj1965.74.4_399.
- Ueda, H., T. Yasunari, and R. Kawamura, 1995: Abrupt seasonal change of large scale convective activity over the western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, **73**(4), 795–809, https://doi.org/10.2151/jmsj1965.73.4_795.
- Van den Dool, H. M., and Z. Toth, 1991: Why do forecasts for “near normal” often fail?. *Wea. Forecasting*, **6**, 76–85.
- Vitart, F., 2014: Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **140**(683), 1889–1899, <https://doi.org/10.1002/qj.2256>.
- Vitart, F., and Coauthors, 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163–173.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter. *Mon. Weather Rev.*, **109**(4), 784–812, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2).
- Wang, B., and Coauthors, 2009: Advanced and prospectus of seasonal prediction: assessment of

- APCC/CLIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction(1980~2004). *Clim. Dynam.*, **33**, 93–117.
- Wang, B., and Q. Zhang, 2002: Pacific–East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development. *J. Clim.*, **15**(22), 3252–3265, [https://doi.org/10.1175/1520-0042\(2002\)015<3252:PEATPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0042(2002)015<3252:PEATPI>2.0.CO;2).
- Wang, B., B. Xiang, and J. Y. Lee, 2013: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **110**(8), 2718–2722, <https://doi.org/10.1073/pnas.1214626110>.
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific–East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?. *J. Clim.*, **13**(9), 1517–1536, [https://doi.org/10.1175/1520-0042\(2000\)013<1517:PEATHED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0042(2000)013<1517:PEATHED>2.0.CO;2).
- Wang, B., Z. W. Wu, C. P. Chang, J. Liu, J. P. Li, and T. J. Zhou, 2010: Another Look at Interannual-to-Interdecadal Variations of the East Asian Winter Monsoon: The Northern and Southern Temperature Modes. *J. Clim.*, **23**(6), 1495–1512, <https://doi.org/10.1175/2009jcli3243.1>.
- 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**(9), <https://doi.org/10.1029/2010GL042659>.
- Wang, L., and W. Chen, 2014: An intensity index for the East Asian winter monsoon. *J. Clim.*, **27**(6), 2361–2374, <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00086.1>.
- Wang, L., W. Chen, R. Huang, 2008: Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **35**(20), <https://doi.org/10.1029/2008GL035287>.
- Wang, N., and Y. Zhang, 2015a: Connections between the Eurasian teleconnection and concurrent variation of upper-level jets over East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**(3), 336–348, <https://doi.org/10.1007/s00376-014-4088-1>.
- Wang, N., and Y. Zhang, 2015b: Evolution of Eurasian teleconnection pattern and its relationship to climate anomalies in China. *Clim. Dynam.*, **44**(3), 1017–1028, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2171-z>.
- Wei, K., M. Takahashi, and W. Chen, 2015: Long-term changes in the relationship between stratospheric circulation and East Asian winter monsoon. *Atmos. Sci. Lett.*, **16**(3), 359–365, <https://doi.org/10.1002/asl2.568>.
- Wen, X. Y., Y. Y. Hu and J.-P. Liu, 2013: The extremely cold 2009–2010 winter and its

relationship with the arctic oscillation. *Front. Phys.*, **8**(5), 590–603, <https://doi.org/10.1007/s11467-013-0376-y>.

- White, C. J., and Coauthors, 2017: Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. *Meteor. Appl.*, **24**(3), 315–325, <https://doi.org/10.1002/met.1654>.
- WMO, 2012: Subseasonal to seasonal prediction – Research implementation plan. *World Meteorological Organization*, 61 pp.
- Woo, S.-H., B.-M. Kim, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, and G.-H. Lim, 2012: Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979–2011). *J. Geophys. Res.*, **117**(D18), <https://doi.org/10.1029/2011JD016929>.
- Wu, B., and J. Wang, 2002: Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(19), 1897, <https://doi.org/10.1029/2002GL015373>.
- Wu, B., T. Zhou, and T. Li, 2016: Impacts of the Pacific–Japan and circumglobal teleconnection patterns on the interdecadal variability of the East Asian summer monsoon. *J. Clim.*, **29**(9), 3252–3271, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0105.1>.
- Wu, R., S. Yang, S. Liu, L. Sun, Y. Lian, and Z. Gao, 2010: Changes in the relationship between Northeast China summer temperature and ENSO. *J. Geophys. Res.*, **115**(D21), <https://doi.org/10.1029/2010JD014422>, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0105.1>.
- Wu, R., S. Yang, S. Liu, L. Sun, Y. Lian, and Z. Gao, 2011: Northeast China summer temperature and North Atlantic SST. *J. Geophys. Res.*, **116**(D16), <https://doi.org/10.1029/2011JD015779>.
- Wu, R., Z. Z. Hu, and B. P. Kirtman, 2003: Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. *J. Clim.*, **16**(22), 3742–3758, [https://doi.org/10.1175/1520-0042\(2003\)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0042(2003)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2).
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**(11), 2539–2558, <https://doi.org/10.1175/1520-0477>.
- 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. *J. Clim.*, **22**(3), 730–747, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2544.1>
- Yang, J., Q. Liu, S. P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **34**(2): L02708, <https://doi.org/10.1029/2006GL028571>

- Yeh, S. W., Y. J. Won, J.-S. Hong, K. J. Lee, M. H. Kwon, K. H. Seo, and Y. G. Ham, 2018: The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism. *Mon. Weather Rev.*, **146**(5) 1463–1474, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0205.1>.
- Yeo, S. R., J. G. Jhun, and W. Kim, 2012: Intraseasonal variability of western North Pacific subtropical high based on the El Niño influence and its relationship with East Asian summer monsoon. *Asia-Pac. J. Atmospheric Sci.*, **48**, 43–53, <https://doi.org/10.1007/s13143-012-0005-7>.
- Yeo, S. R., S. W. Yeh, Y. Won, H. S. Jo, and W. Kim, 2017: Distinct mechanisms of Korean surface temperature variability during early and late summer. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**(12), 6137–6151, <https://doi.org/10.1002/2017JD026458>.
- Yoshida, K., and K. Yamazaki, 2011: Tropical cooling in the case of stratospheric sudden warming in January 2009: Focus on the tropical tropopause layer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**(13), 6325–6336, <https://doi.org/10.5194/acp-11-6325-2011>.
- Yun, W. T., L. Stefanova, and T. N. Krishnamurti, 2003: Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecasts. *J. Clim.*, **16**(22), 3834–3840.
- Zhang, R., A. Sumi, and M. Komoto, 1996: Impact of El Niño on the East Asian monsoon: a diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J. meteor. Soc. Japan*, **74**, 49–62, https://doi.org/10.2151/jmsj1965.74.1_49.
- Zou, J., H.-L. Ren, J. Wu, Y. Nie, and Q. Li, 2016: Subseasonal variability and predictability of the Arctic Oscillation/North Atlantic Oscillation in BCC_AGCM2.2. *Dynam. Atmos. Oceans*, **75**, 33–45, <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2016.05.002>.
- Zou, J., W. Li, C. Sun, L. Xu, and H.-L. Ren, 2013: Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**(4), 1173–1186, <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2125-5>.

부록 A. 현업 장기예보 생산을 위한 관련 회의 참여 및 자료 지원

현업 장기예보 생산 업무를 실질적으로 지원하기 위하여 다양한 장기예보 관련 회의에 직접적으로 참여하고 예보관들에게 자료를 제공한 부분은 이 과제를 구성하고 있는 중요한 부분 중 하나이다. 참여한 장기예보 관련 회의 목적과 내용을 본문에 연구 내용과 함께 넣기에는 적절하지 않아 부록으로 첨부하였으며, 정기적으로 참여한 네 가지 내용에 대해 소개하고자 한다. 2019년 전체 지원 실적은 분기별로 기상청에 제출한 현업 지원 실적 문서로 첨부하였다.

1. 월 기후분석 토의

기상청에서는 우리나라 기후 특성에 대한 이해 제고 및 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 분석과 토의에 참여해 전 지구적으로 나타난 기후 현상의 특징과 우리나라 기온 및 강수와 관련된 기후 현상의 영향에 대한 분석 정보를 제공하고 있다. 월 기후분석 토의의 기본적인 내용은 당월의 우리나라 기온 및 강수량 현황과 기온 및 강수량과 전지구 순환장과의 상관성, 당월의 순환장 현황, 기후감시요소 현황, 특이 기상 현황과 원인 분석 등으로 구성되어 있다. 발표는 기상청 기후예측과와 함께 순환체제로 하고 있으며 토의 내용을 요약한 보고서를 매달 작성하였다. Figure A1과 Figure A2에 APCC에서 지원한 발표 내용과 회의 참석 보고서 예시를 첨부했다.

2. 3개월 전망회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑

기상청 기후예측과에서는 매월 중순 3개월 전망 내부토의를 개최하고 토의결과를 바탕으로 3개월 전망 예보를 발표하는데, APCC에서도 3개월 전망 내부토의에 참여해 APCC MME (Multi-Model Ensemble) 예측결과를 공유하고 토의를 통해 현업 예보를 생산하는데 참여하고 있다. Figure A3은 예측결과에 대한 내부토의 발표 내용, Figure A4는 3개월 전망 내부토의 참석 보고서 예시 그림이다. 3개월 전망 내부토의에서는 APCC MME의 ENSO 예측정보와 전지구 순환장, 기온, 강수 예측 정보에 대해 브리핑하며 우리나라 기온과 강수 예측 결과를 제공하고 있다.

3. 1개월 전망 화상회의 참석 및 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 브리핑

기상청 기후예측과는 매주 수요일 10시에 지역예보관과의 1개월 전망을 위한 내부토의를 진행하고 있다. APCC에서는 기상청의 1개월 전망 지원을 위하여 이 예보토의에 화상회의 시스템을 통해 매주 참여하고 있다. 이때 APCC는 WMO 장기예보 선도센터의 계절내 예측자료를 활용하여 기상청 1개월 전망 예보에 맞춘 추가적인 예측 시스템을 운영하고 있다. 이 예측 시스템은 2017년 8월부터 매주 화요일에 지난주 예측결과에 대한 검증과 동아시아 영역에 맞춘 MME 및 개별모델의 예측결과를 생산하여 PPT 형식의 발표자료 (Figure A5)로 기상청에 제공하고 있으며, 이 자료를 바탕으로 1개월 예보토의 시 발표를 진행한다.

4. 여름철 방재 기간 기후 감시 분석 정보 제공

최근 들어 여름철 폭염과 열대야 발생은 증가하는 경향을 보이고 이에 대한 국민적 관심이 증가함에 따라 기상청에서는 여름철 방재기간 동안 기후 이슈 발생을 사전에 감시하고 이슈 발생과 관련된 분석 정보를 제공함으로써 언론 소통 및 관계기관에 대한 지원을 강화하고자 했다. APCC도 여기에 참여하여 여름철 방재기간 동안 폭염 발생과 관련된 순환장 모니터링과 기후감시 요소에 대한 분석 정보를 매주 기상청에 제공했다. 폭염 발생과 관련된 모니터링에서는 아열대 서태평양 대류활동, CGT와 발달과 관련된 북대서양 진동, 유라시아 대륙 파동 전파와 인도 몬순 강화, 티베트와 중국 상층 고기압 발달을 감시 요소로 선정해 매주 모니터링한 정보를 제공했다. 기후감시 요소에 대한 분석에서는 한주 동안의 전지구 기압계와 해수면온도 분포 등에 대한 현황과 분석 정보를 제공했으며 기상청에서 이를 바탕으로 여름철 주간 기후감시 분석 정보를 작성해 기후정보포털에서 배포했다. Figure A6은 폭염 모니터링 자료, Figure A7은 주간 기후감시 분석 정보에 대한 예시 그림이다.

11월 기후 분석 토의

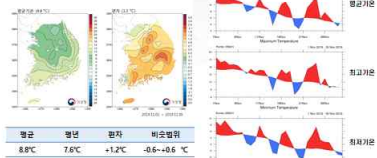


임승희
APEC Climate Center



11월 우리나라 기온 현황

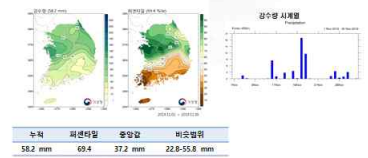
평균기온 및 편차 (11/1~11/30)



- 주거적인 기온변동이 크게 없었으며 평년보다 높은 기온, 평균/최고/최저기온 유사한 변동 모습
- 월 초반과 후반에 기온 높고 기간, 중반에 기온 변동성 크게 나타남
- 과거에 비해 최근 11월 기온은 평년보다 낮지 않은 경향 (A/N/E: 2000년 이후 4위/8위, 이전 7위/11)

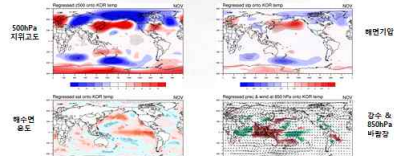
11월 우리나라 강수 현황

강수량 및 패턴달일 분포 (11/1~11/30)



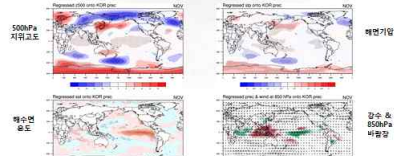
- 평년보다 조금 많은 수문이나 주로 중부/영남지방에 집중된 강수, 남부지방은 평년보다 강수 적은
- 기온변동이 있던 중반에 강수 많은 편
- 강수 있었던 시기에 주로 밤시를 제외 바람

11월 우리나라 기온과 전지구 순환장과의 상관성



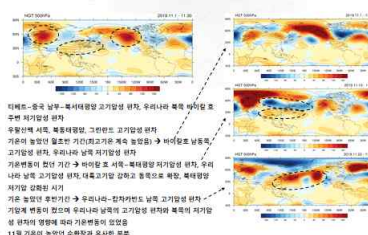
- 상층: 우리나라-북태평양 고기압성 편차, 북극해 저기압성 편차
- 하층: 우리나라 서쪽 저기압성 편차, 동북 북태평양 고기압성 편차 (중서 기압차 적어짐)
- 확률비율: 고기압성 순환에 의한 남풍
- SST: 열대 동태평양 높은 온도, 열대 서태평양 낮은 온도 → 엘니뇨-like, 우리나라 주변과 북태평양 높은 온도

11월 우리나라 강수와 전지구 순환장과의 상관성



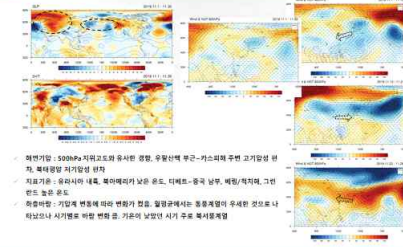
- 기온이 높았던 편차의 경우 유사 → 11월 기온강수 상관관계 < 0.6
- 상층 고기압성 편차, 하층 서쪽 저기압성 편차와 동북 고기압성 편차
- 확률비율&강수: 우리나라 고기압성 순환에 의한 남풍, 서태평양 건조, 동태평양 많은 강수
- SST: 열대 동태평양 높은 온도, 열대 서태평양 낮은 온도 → 엘니뇨-like

11월 평균 전지구 순환장 - 500hPa 지위고도



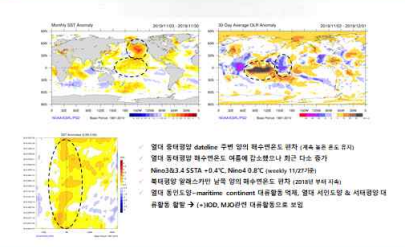
- 태평양-중국 남부-북서태평양 고기압성 편차, 우리나라 북쪽 방향에 집중된 저기압성 편차
- 유럽지역 서쪽, 북서태평양, 그 밖의 고기압성 편차
- 기온이 높았던 열화한 기온/최저기온 계속 나타남 → 비아열로 남풍
- 고기압성 편차, 우리나라 남쪽 저기압성 편차
- 고기압성 편차, 우리나라 서쪽 저기압성 편차, 우리 나라 남쪽 고기압성 편차/북태평양 건조, 동태평양 저기압 순환한 시기
- 기온 높았던 후반기 → 우리나라-인도양도 남쪽 고기압성 편차
- 기온이 높았던 전반기 우리나라 남쪽 고기압성 편차와 북극해 저기압성 편차의 영향에 의해 기온변동이 있음
- 11월 기온이 높았던 순환장 유사한 부분

11월 평균 전지구 순환장 - 해면 기압, 850hPa 바람, 지표 온도



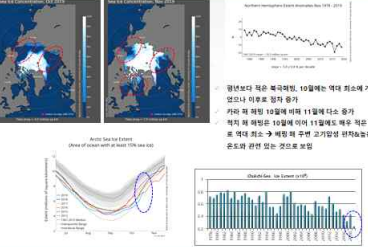
- 해면기압: 500hPa 지위고도와 유사한 경향, 우랄산맥 부근-기승회차 주변 고기압성 편차, 북태평양 저기압성 편차
- 지표기온: 중위에서 태풍, 북극해에서 낮은 온도, 태평양-중국 남부, 북극해/북극해, 그 밖의 높은 온도
- 확률비율: 기압에 변화에 따라 편차가 있음, 열대에서부터 중위에서부터 우세한 것으로 나타
- 태양이나 시계방향 회전 방향, 기온이 높았던 시기 주로 북서태평양

11월 평균 열대 상층 - 해수면온도, 상향장파복사



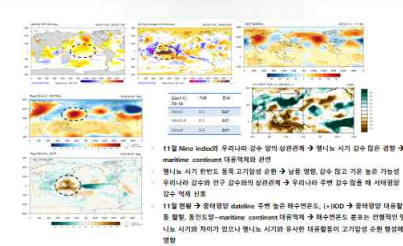
- 열대 동태평양 delatline 주변 열의 해수면온도 증가 (해수 온도 증가)
- 열대 동태평양 해수면온도 여중에 감소했으나 최근 다소 증가
- 북태평양 열대지역 남쪽 열의 해수면온도 증가 (central 10E/10E)
- 열대 동양도 열-malines continent 대륙상층 열, 열대 서인도양 열 서태평양 대륙상층 열 → (+100) MJO의 대륙상층으로 보임

11월 북극 해빙 현황



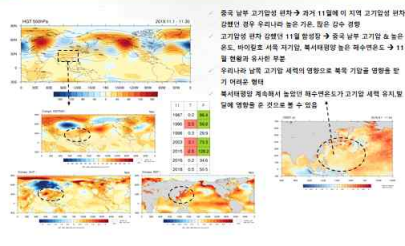
- 평년보다 적은 북극해빙, 10월에는 역대 최대 기록에 가까워 지었으나 11월은 평년 증가
- 가까이 채워진 10월에 비해 11월에 다소 증가
- 가까이 채워진 10월과 11월에도 적은 수문으로 인해 평년 수준의 해빙을 유지, 고기압성 편차/북극해 높은 해수면 온도에 관련 있는 것으로 보임

엘니뇨와 11월 우리나라 기온/강수



- 11월 Niño index(0) 우리나라의 강수와의 상관관계 → 엘니뇨 시기 강수량은 영향 → malines continent 대륙적외와 선
- 엘니뇨 시기 평년도 동쪽 고기압성 순환 → 남풍 영향, 강수 많고 기온 높을 가능성
- 우리나라의 강수량은 전구 강수량의 상관관계 → 우리나라의 주변 강수량을 해 서태평양 강수 지역 의존
- 11월 평년 → 동태평양 delatline 주변 높은 해수면온도, (+100) → 동태평양 대륙상층 열, 열대 동양도 열-malines continent 대륙적외와 선, 해수면온도 온풍은 상향장파복사
- 11월 엘니뇨 → 엘니뇨는 태평양-중국 남부-북서태평양 고기압성 순환에 영향

중국남부-북서태평양 고기압 영향



- 중국 남부 고기압성 편차 → 과거 11월에 이 지역 고기압성 편차
- 고기압성 편차 우리나라 높은 기온, 많은 강수 경향
- 고기압성 편차 11월 평년 → 중국 남부 고기압성 높은 온도, 비아열로 서쪽 저기압, 북서태평양 높은 해수면온도 → 11월 평년과 유사한 부분
- 기온이 높았던 전반기 우리나라 남쪽 고기압성 편차, 우리 나라 남쪽 고기압성 편차/북태평양 건조, 동태평양 저기압 순환한 시기
- 북서태평양 계속해서 높았던 해수면온도가 고기압성 편차 유지할 수에 영향은 온 것으로 볼 수 있음

11월 우리나라 기온 및 강수 특성 요약

기온 변동이 컸으나 평년보다 높은 기온, 많은 강수량을 보인 11월	
기온	<ul style="list-style-type: none"> 중국 남부 8.8°C → 평년보다 1.2°C 높음 고기압의 조성이 활발한 가운데 기온변동이 높고, 우리나라 남쪽 북서태평양 고기압 영향에 의해 평년보다 높음 남쪽 고기압의 영향이 강했던 시기에 높은 기온, 북극해 서태평양 영향에 의해 전반기 남풍한 시기에 적은 기온 현상이 나타남 우리나라 남쪽의 고기압은 북서태평양 저기압의 높은 해수면온도에 관련
강수	<ul style="list-style-type: none"> 전국 평균 강수량 58.2mm → 평년보다 다소 많은 강수량 (0.6/10년이상) 중대형일 높은 해수면온도 index Ocean Dipole pattern과 관련된 다른 열대 동양도 열(10E)은 열대 열대 열도 강수량이 많을 수 있는 관련 영향

Figure A1. 월 기후분석 토의 발표 자료 예시

2019년 4월 기후 분석 토의 APCC 참석 보고서

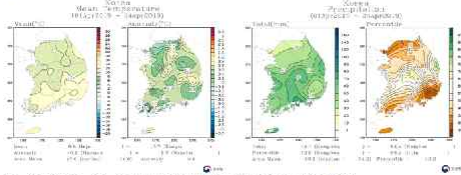
【 2019. 4. 25. / 기후예측본부 】

□ 회의 참석 개요

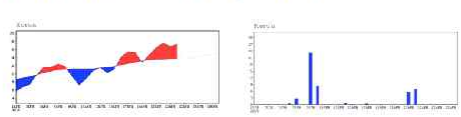
- 회의 참석
 - 2019년도 4월 우리나라 기상 특성 및 전 지구 기후시스템과 관련한 감시 요소 현황 분석에 대한 화상 회의 참석
 - 회의 일시: 2019년 4월 25일 (목)
 - 회의장소: 화상회의
 - 발표자: 여새림/보고서 작성자: 여새림

□ 2019년 4월 우리나라 기온과 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2019년 4월 우리나라 기온과 강수량 분포도 (~4/24까지)



[Fig.2] 2019년 4월 우리나라 기온과 강수량 시계열 (~4/24까지)



- 4월 24일 기준으로 평균기온은 12.0°C로 평년보다 0.4°C 높아 평년과 비슷한 기온을 기록했음. 강수는 49.1mm, 43.2 퍼센타일로 평년과 비슷했음 (#4월 기온의 평년 비숫 범위는 0.4°C, 강수의 평년 비숫 범위는 33-67 percentile)
- 4월 초순과 중순에는 평년보다 낮은 기온을 나타낸 후 4월 15일 이후 높은 기온이

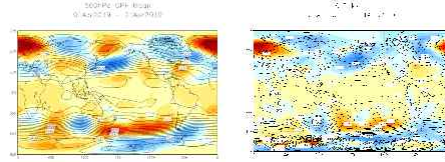
- 1 -

지속적으로 나타나면서 4월 전체적으로 평년과 비슷한 기온을 나타냄

- 4월 9-10일, 23-24일의 강수가 전체 강수에 기여하였음. 4월 9-10일 강수의 경우 우리나라 남서쪽으로 강한 저기압성 순환이 발달하면서 남풍이 유입되 전국적으로 많은 강수를 기록함

□ 2019년 4월 전 지구 순환장 특징

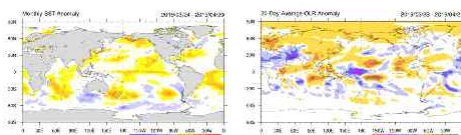
[Fig. 3] 2019년 4월 (좌) 500hPa 지위고도 편차, (우) 해면기압 편차



- 500hPa 전지구 순환장을 살펴보면 우리나라 동쪽 북태평양부터 북미지역까지 저기압성 편차가 나타나며 우리나라는 저기압성 편차의 왼쪽 가장자리에 위치해 북서풍의 영향을 주로 받게 됨. 이러한 대기 패턴은 4월 1일부터 15일 까지 저온 편차가 우세한 시기에 주로 나타난 대기 패턴으로 4월 15일 이후에는 대기 흐름이 다소 원활해지면서 중국내륙지역의 고기압성 순환이 우리나라에 영향을 미치면서 고온 편차가 나타나게됨. 그 외에 북대서양 지역에서의 강한 고기압성 순환과 베링해 지역에서의 고기압성 순환이 특징적으로 나타남
- 하층은 유라시아 대륙-우리나라 주변까지 저기압성 편차가 나타나 대륙고기압이 약했음. 그러나 저온 시기 (4월 1-15일)에는 중국내륙지역을 중심으로 대륙고기압의 발달이 나타났음

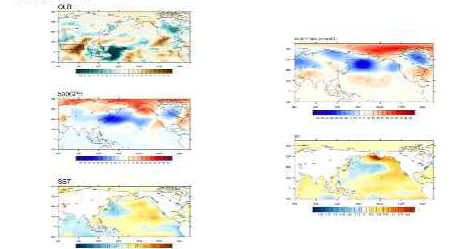
[Fig. 4] 2019년 4월 (좌) 해수면온도 편차 및 (우) OLR 편차

- 2 -



- 열대 태평양 해수면 온도는 Niño3.4지역에서 평년보다 1.0°C 높은 값을 보이며 약한 중태평양 엘니노 상태를 나타냄
- 약한 엘니노 신호가 지난해월부터 계속해서 나타나고 있음. 열대 대류활동 특징은 인도양 지역에서 대류활동 억제, 열대 서태평양부터 날짜변경선까지 대류활동 강화 신호가 나타났는데, 이러한 대류활동 특징은 엘니노의 전형적인 반응과는 다르나, Maritime continent 지역으로의 대류활동 억제 신호는 어느정도 엘니노의 반응으로 나타난 것으로 해석됨

[Fig. 5] 2019년 4월 열대 대류활동 및 베링해 지역의 온난화 신호가 대기 순환장에 미친 영향 분석



- 인도양 대류활동 억제 및 열대 서태평양 대류활동 강화 신호가 대기 순환장에 미치는 영향을 확인하기 위해 과거 유사사례를 추출하여 합성도 분석을 수행한 결과 우리나라 주변으로 저기압성 순환 그 북쪽으로 고기압성 순환이 특징적으로 나타나는데 이는 2019년 4월 현황과 유사함. 즉, 열대 지역 대류활동이 4월 대기 순환장 형성에 영

- 3 -

향을 미쳤을 가능성이 있음

- 베링해 지역에서의 해빙 감소 신호와 해수면 온도의 온난화 신호가 매우 뚜렷하게 나타났는데 이에 대한 영향을 확인하기 위해 과거 베링해 지역 해수면 온도가 높았던 해를 추출하여 합성도 분석을 수행함. 그 결과 북극지역으로 고기압성 순환, 그 남쪽으로 저기압성 순환, 다시 그 남쪽으로 고기압성 순환이 나타나 2019년 4월 현황과 유사한 패턴임. 즉, 베링해 지역의 온난화 신호 역시 2019년 4월 대기 패턴 형성에 기여하였을 가능성이 있음

□ 토의 사항

- 시베리아 지역에서 대기 흐름이 상당히 정체 되었던 것이 2019년 4월 대기 패턴의 하나의 특징인데, 그 원인과 관련된 분석이 필요함. 대서양 지역에서 강한 고기압성 순환이 역할을 했을 가능성이 있음
- ENSO의 영향 및 우리나라 기후와의 관련성을 살펴볼 때 현재 2019년 봄월부터 나타나는 엘니노를 엘니노의 decaying 신호로 보아야 할지 developing 신호로 보아야 할지에 대해 분석이 필요함
- 중·고위도 지역의 전체적인 대기 패턴이 북대서양, 베링해 지역으로 강한 고기압성 순환이 나타나면서 블로킹과 유사한 형태가 나타남. 특히 기후 모델의 블로킹 현상에 대한 예측성이 매우 떨어지기 때문에 이와 유사한 대기 패턴의 변화에 대한 향후 연구가 필요할 것으로 보임

- 4 -

Figure A2. 월 기후분석 토의 보고서 예시

2019년 10월 3개월 전망 회의 APCC 참석 보고서
 [2019. 10. 15. / 기후사업본부]

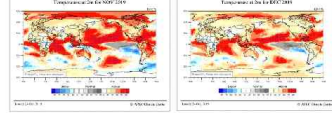
□ 방문 개요

- 방문목적
 - 2019년 11월 ~ 2020년 1월 전망을 위한 예보회의 참석 및 발표를 위해 기상청에 방문하여 APCC MME 결과를 발표하고 계절 전망에 대한 내부부외를 하였음
 - 방문일 : 2019년 10월 15일 (화)
 - 회의장소 : 서울 기상청 기후예측과
 - 회의 참석자 : 기후분석과 임승희

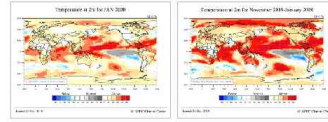
□ 2019년 11월 ~ 2020년 1월 장기예보 결과 (APCC)

- 7개 기후모델 165개 앙상블을 사용하여 2019년 11월, 12월, 2020년 1월에 대한 MME를 수행하였음. MME 예측결과는 다음과 같음

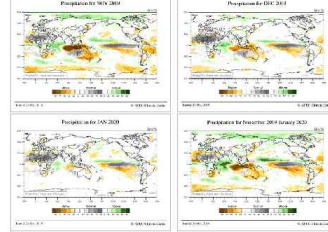
[Fig. 1] 2-m temperature anomaly [GAUS]



- 1 -



[Fig. 2] Precipitation anomaly [GAUS]



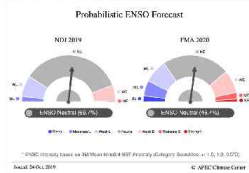
○ ENSO 예측

- 향후 3개월 (2019년 11월~2020년 1월)동안 APCC MME는 중립 상태의 ENSO를 예측함. Niño3.4 지수는 11월 0.13, 12월 -0.14, 1월 -0.12로 약한 양의 값에서 음의 값으로의 변화를 예측함. 모델 간 예측 결과에는 차이

- 2 -

가 있어 EOM과 NASA 모델은 라니냐에 가까운 음의 값을 예측하였고 나머지 모델은 0에 가깝게 예측하여 MME 결과 중립 상태를 나타냄. 특히 NASA 모델은 음의 값이 점점 커지는 것으로 예측해 다른 모델과 상이한 결과를 나타냄. APCC의 엘니뇨 발생 및 강도 예측시스템에서 11-1월 예측 기간 동안 69.7%의 확률로 중립 상태를 예측함. 이후(FMA)에는 48.4%의 확률로 중립 상태를 예측하였으나 중립 상태 확률은 점차 감소하고 라니냐 발생 확률이 증가하는 특성을 보임

[Fig. 3] Probabilistic ENSO Forecast



[Fig. 4] Individual Models' Niño3.4 Index

Model	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
HadGEM2	0.08	0.18	0.2	0.06	0.06	0.07
GISS	0.08	0.07	0.07	0.02	0.02	0.02
IPSL	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MIROC	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MRI	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
NCC	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
APCC	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MME	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

- 3 -

○ 대기 변수 예측장

- 500hPa 지위고도 예측장 : 11-1월에 한반도와 주변에는 양의 편차가 발달함. 유라시아 대륙 북쪽에도 양의 편차가 나타났으나 1월에는 약해졌으며 태평양 부근의 저기압성 편차는 11월에 강했다가 1월에는 양의 편차가 나타남. 우리나라 주변의 고기압성 편차는 확률예보에서도 유사한 것으로 나타나 고기압성 편차의 영향을 계속해서 받을 것으로 보이고 유라시아 대륙 양의 편차는 1월에는 유의성이 떨어져 대륙 고기압의 영향은 약해질 것으로 보임
- 50P 예측장 : 상층 순환장과 유사하게 11-12월에 우리나라는 고기압성 편차의 영향을 받을 것으로 보이고 1월에는 우리나라의 서쪽 저기압성 편차와 동쪽 고기압성 편차가 위치해 우리나라는 그 사이에 위치하는 것으로 나타남. SCM에서 대륙고기압은 강하지 않을 것으로 예측되었고 확률예보에서도 시베리아 지역에서 유의한 시그널은 나타나지 않음
- 850hPa 바람장 예측장 : 11-12월 우리나라에 위치한 고기압성 편차와 우리나라 남쪽의 저기압성 편차의 영향으로 동풍 편차 또는 남동풍 편차의 영향을 받아 대륙으로부터 불어 내려오는 북동계절 바람은 약할 것으로 예측됨. 1월에는 고기압성 편차의 가장자리에 위치해 남동풍 편차의 영향을 많이 받을 것으로 보임
- 2m 온도 예측장 : 북반구 대부분의 지역에서 양의 기온 편차를 예측함. 특히 우리나라 주변과 북서태평양 양의 기온 편차는 확률예보에서도 높은 확률로 유의하게 예측됨. 유라시아 대륙의 양의 기온 편차는 유의성이 조금 약하게 예측됨
- 강수 예측장 : 열대 서태평양에서는 11월과 12월에 강수가 억제되는 것으로, 1월에는 억제 약해지고 증가하는 것으로 예측함. 11월에 우리나라 남쪽에 저기압성 순환이 위치하고 동풍 편차의 영향을 받아 강수가 많지 않을 것으로 보이고 12월에는 남동풍 편차의 영향을 받고 강수가 많을 것으로 나타남. 1월은 남동풍 편차의 영향을 받고 강수가 많을 것으로 예측했으나 유의성이 떨어짐

- 4 -

[Fig. 5] 종합의견

Model	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
HadGEM2	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
GISS	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
IPSL	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
MIROC	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
MRI	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
NCC	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
APCC	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05
MME	0.13	-0.14	-0.12	0.05	0.05	0.05

○ 기온

- 11월은 모델 예측결과 우리나라는 고기압성 편차의 영향을 받고 대륙 고기압은 강하지 않아 대륙으로부터 내려오는 한기의 영향은 적어 기온은 평년보다 높을 것으로 예측
- 12월은 태평양 극의 영향은 적을 것으로 보고 모험결과를 따라 우리나라는 고기압성 편차의 영향을 받고 대륙고기압도 강하지 않아 기온은 평년보다 높을 것으로 예측
- 1월은 모델 예측결과 하층 고기압성 편차는 다소 약해지지만 상층 고기압성 편차는 유지되고 대륙 고기압이 강하지 않아 찬 공기 유입은 약할 것으로 보여 기온은 평년보다 높을 것으로 예측

○ 강수

- 11월은 모델결과와 equal chance를 예측했으나 열대 서태평양에 강수 억제 신호와 관측기반 예측인자에서 강수가 많을 가능성이 있고 기온과 강수의 양의 상관관계를 고려해 평년과 비슷하거나 조금 많을 것으로 예측
- 12월은 모델에서는 강수가 평년보다 많을 것으로 예측했으나 우리나라

- 5 -

주변의 고기압성 순환이 북쪽으로 약간 치우치고 남동풍편차가 강하지 않을 것으로 보여 평년과 비슷하거나 조금 많을 것으로 예측

- 1월은 열대 서태평양 대류활동 억제와 강하지 않고 우리나라는 고기압성 순환의 가장자리에 위치하면서 남동풍편차가 강해지는 것으로 나타나 모델 결과를 따라 평년보다 많을 것으로 예측

○ 기상청 예보회의

기온	예보일	11월	12월	1월
		+	+	+
강수	모델링	0	0+	-
	관측기반	0	0+	-
	예보일	0+	0+	0+
	모델링	0	0+	-
	관측기반	0	0+	-
	예보일	0	0	0-

- 기상청 역학모형에서는 11-1월 중립 ENSO를 예측했으며 Niño3.4 지수는 양의 편차로 약간 감소했다가 다시 회복하는 형태로 예측함
- 11월과 12월은 모델에서 유사한 패턴으로 예측되었고 기온은 평년보다 높을 것으로 예측함. 우리나라 주변으로 고기압성 편차가 나타나 기온이 높을 가능성을 보였으나 바미강 후 주변의 고기압성 편차의 영향으로 일시적으로 한기의 영향을 받을 가능성이 있어 변동성이 클 것으로 예측함. 대륙고기압이 확장할 가능성이 있으나 북서계절은 우리나라 북동쪽으로 지나갈 가능성이 있음. 1월 우리나라는 고기압성 편차의 영향을 받는 것은 동일하나 이전 달과는 기압장 차이가 있어 태평양 주변에 보였던 저기압성 편차가 1월에는 고기압성 편차로, 바미강 후 주변의 고기압성 편차에서 저기압성 편차가 나타남 것으로 예측했고 변동성은 적을 것으로 예측함. 관측기반 분석에서 태평양의 영향으로 11월 기온은 높은 경향, 12월과 1월은 낮은 경향 확으로 나타남. 서태평양 해수면온도가 높을 경

- 6 -

- 11월 기온은 낮은 경향, 12월은 높은 경향이 있었으나 태평양 해수면 온도 분석에서는 불확실성이 큰 것으로 나타남. 모델과 관측기반 결과를 종합해 11.12.1월 모두 기온은 평년과 비슷하거나 조금 높을 것으로 예측했으나 11월과 12월에는 기온의 변동성이 클 가능성이 높게 보였음
- 강수는 모델에서는 평년과 비슷하거나 많은 경향으로 예측했으나 관측기반 분석에서는 11월 강수는 예측인자에서 많은 경향으로 보였으나 불확실성이 있고 최근 12월 강수는 평년보다 적었던 경우가 매우 드물었음. 모델과 관측기반 결과를 바탕으로 11.12월엔 시베리아 고기압이 확장하며 강수 가능성은 있으나 평년보다 많지는 않을 것으로 보여 평년과 비슷할 것으로 예측했고, 한겨울 강수는 북쪽에서 한기가 내려와야 강수량이 증가하기 때문에 온도가 높을 것으로 예측한 1월에는 강수가 평년과 비슷하거나 적을 것으로 예측함
- 11월 이상기는 태평양 동계모형과 과거 발생 경향을 바탕으로 이상기온은 평년과 비슷하거나 적은 수준, 이상기온은 평년과 비슷하거나 조금 많은 수준으로 발생할 것으로 예측함

- 7 -

Figure A4. 3개월 전망 회의 참석 보고서 예시

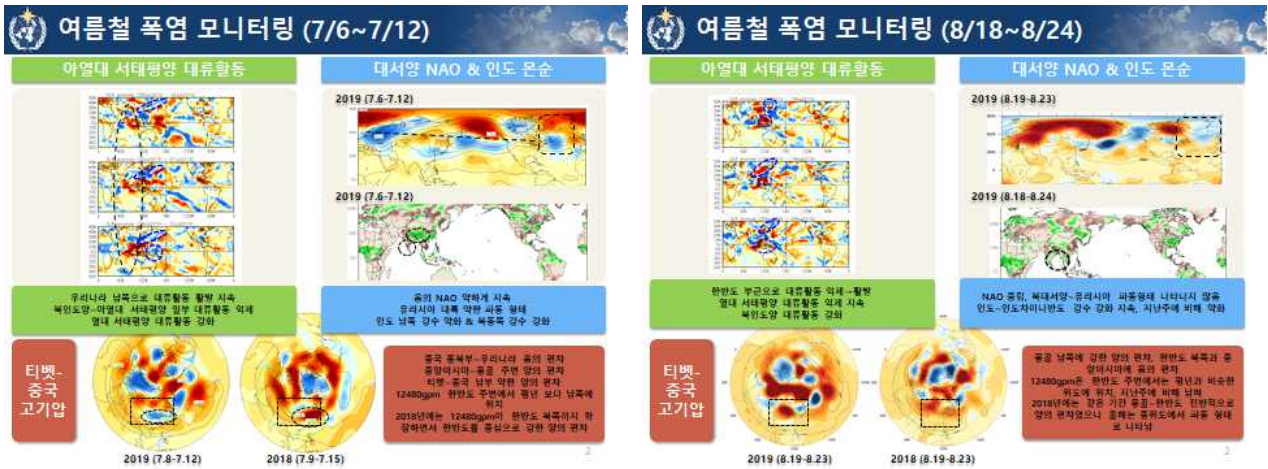


Figure A6. 여름철 폭염 발생 모니터링 자료 예시

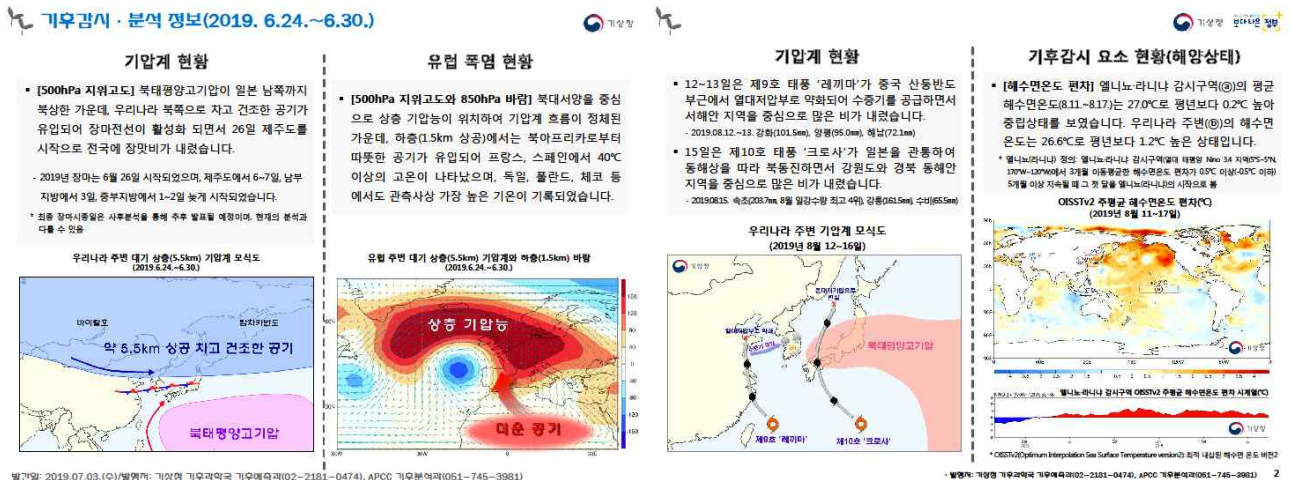


Figure A7. 여름철 주간 기후감시 분석정보 예시

장기예보 정확도 향상을 위한 2019년도 1분기 기상청 장기예보 현업 지원 실적

【2019. 4. 26.(금) / APEC기후센터 기후사업본부 기후분석과】

□ 목적

- APCC는 기상청 장기예보 생산 및 이상기후 전망에 필요한 기후분석 및 예측 자료 제공 등 기후예측분야 기상청 지원·협업 유지
 - ※ APCC 장기예보 전담 지원팀 구성('17.7.)하여 기상청 장기예보 지원 강화
- 기후예측분야 지원 실적을 기상청에 정기보고(분기별)하여 기상청 요구사항에 대한 점검 및 예보기술 지원 보장 등 장기예보 지원 강화

□ 기상청 지원 세부과제

- ① WMO 장기예보 선도센터(WMO LC-LRFMME) 운영
- ② 관측 기반 기후 분석 및 과거 사례 심층 분석
- ③ 계절 및 계절내 다중모델앙상블(MME) 및 기상청 현업모델 예측특성 분석
- ④ 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템 개발
- ⑤ 아태지역 이상기후 감시 기법 개발

□ 지원실적 요약

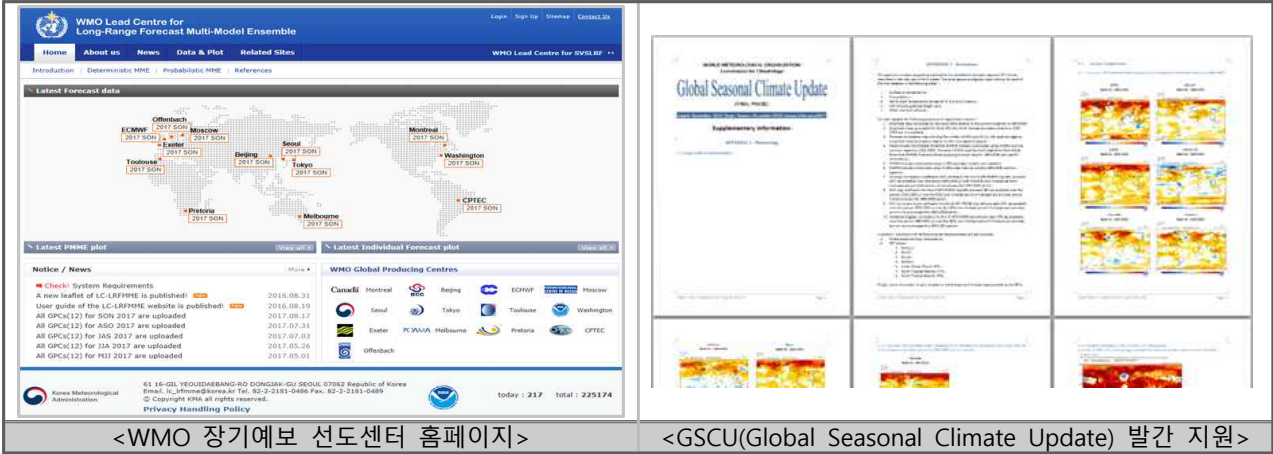
지원 부서	지원 분야	지원 실적
기상청 기후예측과	1개월 전망, 3개월 전망 WMO 장기예보 선도센터 운영	25회
기상청 이상기후팀	이상기후 전망	2회

□ 세부과제별 지원 실적

기상청 현업 종류	지원 내용	지원 실적	세부 과제
WMO LC 운영	WMO 장기예보 선도센터 운영보고서 작성 및 제출	1월9일, 2월7일, 3월11일 (총 3회)	①
WMO LC 운영	2019년 봄철예측을 위한 WMO GSCU 발간 지원	2월27일 (총 1회)	①
3개월 전망	WMO 장기예보 선도센터 계절 예측자료 생산 및 송부	1월14일, 2월18일, 3월18 일 (총 3회)	①
3개월 전망	최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월기후 분석토의 발표	1월30일, 2월27일 (총 2회)	②
3개월 전망	3개월 전망회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (APCC MME 분석표 제공 포함)	1월15일, 2월13일, 3월19 일 (총 3회)	③
1개월 전망	1개월 전망 화상회의 참석 및 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 브리핑	1월 2, 8, 22, 29일 2월 12, 20, 27일 3월 6, 13, 20, 27일 (총 11회)	③
1개월 전망	WMO 계절내 예측자료 콘텐츠 추가 (개별 GPC 확률예측 결과 테이블)	2월 12일부터 (총 1회)	③
1개월 전망	WMO 계절내 예측자료 콘텐츠 추가 (봄철기온 예측을 위한 해면기압 정보제공)	3월 19일부터 (총 1회)	③
이상기후 전망	봄철 가뭄 예측모델 가이드스 제공 - 예측인자 및 원인분석 자료 제공 - 봄철 가뭄 예측 모델 설명서	2월 8일 (총 1회)	⑤
이상기후 전망	2019 봄철 가뭄 예측 자료 제공 (SPI6 예측결과 및 예측인자 제공)	2월 19일 (총 1회)	⑤

붙임 대표 실적 (상세)

1 WMO 장기에보 선도센터 계절 및 계절내 예측 시스템 운영



- GPC 자료 전처리, MME 예측 수행, 검증 후 홈페이지 제공 (매달)
- GPC-Seoul 홈페이지를 통한 GPC-Seoul의 예측 자료 제공 (매달)
- WMO 장기에보 선도센터 운영 보고서 작성 및 개인정보 처리시스템 접속 기록 점검 보고 (매달)
- GFCS 구축을 위한 WMO GSCU 발간 지원 (매 분기)
- WMO 장기에보 선도센터 계절내 예측자료 수신 모니터링 및 MME 예측결과 생산 (매주)

2 최근 기후특성 이해를 위한 월기후 분석 토의 지원

4월 엘니뇨 반응

열대 서태평양 대류활동 억제 & 아열대 서태평양 고기압성 순환 & 북태평양 저기압성 순환

겨울철 CP 엘니뇨가 발달한 다음해 4월

1960-1970s, 1980-1990s, 2000s, 2010s, 2015-2019

2019년 4월 현황과 비교
아열대 서태평양 지역으로 고기압성 순환 발달 & 북태평양 저기압성 순환이 비슷하게 나타나나 베링해 지역으로 고기압성 순환이 강하게 나타나면서 전체적으로 전형적인 엘니뇨 대기반응보다 남쪽으로 치우친 형태

겨울철 엘니뇨가 다음해까지 지속 또는 중립인 해의 4월

4월 우리나라 기온 및 강수 특성 요약

평년과 비슷한 기온과 강수량을 나타낸 4월

기온	강수
<ul style="list-style-type: none"> 기온 변동성이 크게 나타남 → 4월 초-중순 북태평양 저기압의 가장자리에 들어 북풍의 영향으로 저온 현상 → 4월 중-하순 우리나라를 덮는 고기압의 영향으로 고온 현상 	<ul style="list-style-type: none"> 4월 초-중순 다소 정체된 대기 패턴을 보인 후 4월 중-하순 풀어 원활한 대기 흐름을 보임
<ul style="list-style-type: none"> 아열대 서태평양 지역으로 고기압성 순환이 나타나 지속되는 엘니뇨에 대한 대기 반응을 나타내기는 하지만 전형적인 패턴과는 차이가 있음 북태평양의 meridional dipole 대기 패턴 형성에는 열대 지역 대류 활동 + 베링해 지역의 온난화 현상이 기여했을 가능성이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 4월 9-10일, 23-24일 강수가 전체 강수에 기여 4월 초순 북풍기류 및 4월 하순 고기압성 순환의 영향으로 강수가 많을 조건이 형성되지 못함

- 최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월 기후분석 토의 발표 (매월, APCC 2회 기상청 1회)
- 전 지구 기후시스템의 특징을 포함한 체계적인 기후 분석 정보 제공

③ 3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 정보 제공

500hPa Geopotential Height Anomaly (Prediction:SCM)

Geopotential Height at 500 hPa for MAY 2019

Geopotential Height at 500 hPa for JUL 2019

Geopotential Height at 500 hPa for May-Jul 2019

<APCC MME 예측 결과 브리핑 예시>

APCC MME FORECAST TABLE										
201905		TEMP			PREC					
		05	06	07	05	06	07	05	06	07
Forecast	SCM ANCO(N/N)	0.91(0.18)	0.34(0.18)	0.24(0.15)	-2.95(4.40)	-29.53(5.71)	-1.41(6.51)			
	PMME(B/N/A)	17.23(8.0)	21.29(5.0)	22.29(4.9)	38.35(2.7)	47.39(1.4)	31.07(3.3)			
TCC	OBS vs SCM	0.13	0.18	0.12	-0.03	-0.05	0.14			
ROC(B/N/A)	OBS vs PMME	0.53(0.46/0.62)	0.49(0.53/0.75)	0.51(0.60/0.51)	0.67(0.49/0.47)	0.53(0.45/0.52)	0.56(0.51/0.52)			
HSS	OBS vs PMME	0.69*	0.68*	0.64*	0.13	0.11	0.08			
Trend	OBS[adj]	0.58(1.20*)	0.73(1.23*)	0.35(1.24*)	32.82(8.15)	-27.56(7.29*)	80.33(42.22)			
	SCM[adj]	1.10(1.18*)	0.94(0.83*)	0.67(0.62*)	-2.29(1.33)	0.93(1.64)	17.47(16.01*)			
Cor TvsP	OBS[adj]	0.04(0.15)	-0.01(0.22)	-0.58(0.45*)	0.04(0.15)	-0.08(0.22)	-0.58(0.45*)			
	SCM[adj]	0.28(0.32*)	0.21(0.24)	0.21(0.24)	0.28(0.32*)	0.21(0.24)	0.21(0.24)			
NINO3.4	OBS-SCM	-0.31*0.16	-0.05*0.03	-0.10*0.06	0.06(0.12)	-0.15*0.01	0.19(0.13)			
	TCC-ANO	0.91*0.36*	0.92*0.08	0.85*0.34*	0.91*0.36*	0.92*0.08	0.85*0.34*			
WPC	OBS-SCM				-0.16*0.17	0.34*0.13	0.27(0.23)			
	TCC-ANO				0.48*16.79*	0.35*15.61*	0.73*27.46*			
Total	Forecast									

Legend: NN, EC, COLD, WARM, WARNING, DRY, WET

<APCC MME 분석 테이블 제공>

- 기후예측과 3개월 전망 회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (매월)
- 3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 특성 및 분석 결과 테이블 제공 (매월)

④ 1개월 전망 지원을 위한 계절내 예측 자료 제공

예측결과

기상기온

F1 (4.15~4.21), F2 (4.22~4.28), F3 (4.29~5.5), F4 (5.6~5.12)

PMME, ECMWF, CMWF

<WMO 계절내 예측 결과 브리핑 예시>

Model	기온 이변주 예측 (3.25~5.5)				강수량 이변주 예측 (3.25~5.5)				
	1w	2w	F1	F2	1w	2w	F1	F2	
PMME	8/28/65	27/35/38	23/36/41	22/34/44	20/31/50	23/36/41	46/31/22	40/30/30	34/38/28
ECMWF	5/6/59	22/47/31	27/35/38	22/39/39	26/55/39	21/33/46	46/27/8	53/26/21	34/39/27
Washington	6/6/67	46/36/18	22/42/35	21/20/59	12/28/60		12/29/38	52/24/4	22/39/39
Tokyo									
Exeter	3/42/55	11/24/64	9/27/64	17/47/36	22/25/53	21/41/38	60/29/10	44/74/22	43/32/25
Seoul									
Melbourne	2/14/81	14/32/55	23/41/36	8/28/63	19/35/47	25/34/41	12/39/50	19/25/56	36/40/24
Beijing									
Montreal	29/38/33	41/37/22	32/34/33	40/35/25			62/17/7	31/40/29	35/39/26

<개별 GPC 확률예보 결과 테이블 제공>

- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 정보 송부 (매주 화요일)
- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 자료 콘텐츠 추가 (수시)
- 기후예측과 1개월 전망 회의 참석 및 WMO 계절내 예측 결과 브리핑 (매주 수요일 화상회의)

⑤ 봄철 가뭄 전망을 위한 가뭄지수 예측 정보 제공

3, 4, 5월 가뭄 메커니즘 모식도

Wave Propagation

Cold, W, Neg. PDO, Rossby wave Propagation, Cold, Lagged impact of ENSO in spring

* 연대 중태평양의 영향은 엘니뇨-동수해에 강하게 나타나나 가뭄해에는 약함

<한반도 봄철 가뭄 예측 가이드선스 지원 예시>

분석월 예측된 자 평균기간	예측월 (상관계수)	X1	X2	Y	회귀식
2월 (1~1월)	3	LOW	MA	예측	$Y = -0.198 + 2.448 * X1 - 0.427 * X2$
	(0.740)	0.507	0.380	0.882	
4	TP	AD1	예측	$Y = -0.086 + 0.749 * X1 - 0.700 * X2$	
	(0.742)	0.493	-0.040	-0.04	
5	IOe	AD1	예측	$Y = -0.292 + 1.283 * X1 - 0.993 * X2$	
	(0.688)	0.279	-0.040	-0.12	
3월 (1~2월)	4	TP	AD1	예측	$Y = -0.053 + 0.828 * X1 - 0.610 * X2$
	(0.744)	0.424	0.137	0.16	
5	IOe	AD1	예측	$Y = -0.314 + 1.648 * X1 - 0.913 * X2$	
	(0.762)	0.308	0.137	0.13	
6	NP	AD2	예측	$Y = -0.089 - 1.158 * X1 + 0.402 * X2$	
	(0.731)	0.504	-1.230	-1.32	
4월 (1~3월)	5	IOe	AD1	예측	$Y = -0.310 + 1.678 * X1 - 0.743 * X2$
	(0.549)	0.300	-0.195	0.213	
6	NP	AD2	예측	$Y = -0.054 + 1.348 * X1 - 0.748 * X2$	
	(0.747)	0.634	-1.967	-1.65	
5월 (2~4월)	6	NP	AD2	예측	$Y = -0.162 + 1.454 * X1 - 1.111 * X2$
	(0.665)				

<2019 봄철 가뭄 예측 자료 지원 예시 >

- 한반도 봄철 가뭄기작 분석 및 예측 모델 개발 발표(1,3월)
- 봄철 가뭄 예측 가이드선스 및 2019년 예측 결과 제공(2월)

장기예보 정확도 향상을 위한 2019년도 2분기 기상청 장기예보 현업 지원 실적

【2019. 7. 2.(화) / APEC기후센터 기후사업본부 기후분석과】

□ 목적

- APCC는 기상청 장기예보 생산 및 이상기후 전망에 필요한 기후분석 및 예측 자료 제공 등 기후예측분야 기상청 지원·협업 유지
 - ※ APCC 장기예보 전담 지원팀 구성('17.7.)하여 기상청 장기예보 지원 강화
- 기후예측분야 지원 실적을 기상청에 정기보고(분기별)하여 기상청 요구사항에 대한 점검 및 예보기술 지원 보강 등 장기예보 지원 강화

□ 기상청 지원 세부과제

- ① WMO 장기예보 선도센터(WMO LC-LRFMME) 운영
- ② 관측 기반 기후 분석 및 과거 사례 심층 분석
- ③ 계절 및 계절내 다중모델앙상블(MME) 및 기상청 현업모델 예측특성 분석
- ④ 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템 개발
- ⑤ 아태지역 이상기후 감시 기법 개발

□ 지원실적 요약

지원 부서	지원 분야	지원 실적
기상청 기후예측과	1개월 전망, 3개월 전망 WMO 장기예보 선도센터 운영	38회

□ 세부과제별 지원 실적

기상청 현업 종류	지원 내용	지원 실적	세부 과제
WMO LC 운영	WMO 장기예보 선도센터 운영보고서 작성 및 제출	4월3일, 5월7일, 6월4일 (총 3회)	①
WMO LC 운영	2019년 여름철예측을 위한 WMO GSCU 발간 지원	5월 28일 (총 1회)	①
3개월 전망	WMO 장기예보 선도센터 계절 예측자료 생산 및 송부	4월22일, 5월14일, 6월17일 (총 3회)	①
3개월 전망	최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월기후 분석토의 발표	4월25일, 5월24일, 6월26일 (총 3회)	②
3개월 전망	분석 기반 기후 예측 정보 제공 (ENSO 및 티벳 고기압 분석 결과)	4월4일, 4월23일, 5월9일, 5월13일 (총 4회)	②
3개월 전망	3개월 전망회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (APCC MME 분석표 제공 포함)	4월16일, 5월15일, 6월18일 (총 3회)	③
1개월 전망	1개월 전망 화상회의 참석 및 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 브리핑	4월3일, 4월10일, 4월17일, 4월24일, 5월8일, 5월15일, 5월22일, 6월4일, 6월12일, 6월19일, 6월26일 (총 11회)	③
1개월 전망	여름철 방재 기간 기후 감시·분석 정보 제공 (폭염, 이상기후, ENSO 모니터링 정보 제공)	5월28일, 6월4일, 6월11일, 6월18일, 6월25일 (총 5회)	②,⑤
1개월 전망	여름철 주간 기후감시·분석 정보 제공 (전지구 기압계 현황, 전지구 해수면 온도 분포 등 주간 현황)	5월28일, 6월4일, 6월11일, 6월18일, 6월25일 (총 5회)	②

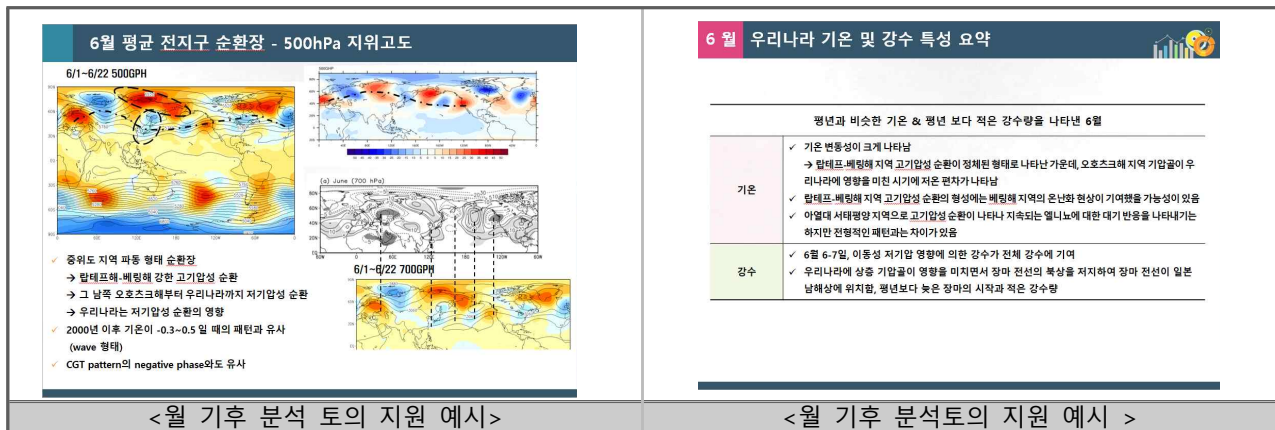
붙임 대표 실적 (상세)

1 WMO 장기에보 선도센터 계절 및 계절내 예측 시스템 운영



- GPC 자료 전처리, MME 예측 수행, 검증 후 홈페이지 제공 (매달)
- GPC-Seoul 홈페이지를 통한 GPC-Seoul의 예측 자료 제공 (매달)
- WMO 장기에보 선도센터 운영 보고서 작성 및 개인정보 처리시스템 접속 기록 점검 보고 (매달)
- GFCS 구축을 위한 WMO GSCU 발간 지원 (매 분기)
- WMO 장기에보 선도센터 계절내 예측자료 수신 모니터링 및 MME 예측결과 생산 (매주)

2 최근 기후특성 이해를 위한 월기후 분석 토의 지원



- 최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월 기후분석 토의 발표 (매월, APCC 3회)
- 전 지구 기후시스템의 특징을 포함한 체계적인 기후 분석 정보 제공

3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 정보 제공

<APCC MME 예측 결과 브리핑 예시>

APCC MME FORECAST TABLE									
		TEMP							
		06	07	08	09	07	08		
Forecast	SCM ANCH/USRP	0.37(0.17)	0.19(0.18)	0.20(0.16)	0.11(0.14)	0.13(0.14)	0.17(0.18)	0.27(0.28)	0.29(0.3)
	PMME(BNA)	2.10(0.49)	2.02(0.45)	2.02(0.46)	2.02(0.46)	2.02(0.46)	2.02(0.46)	2.02(0.46)	2.02(0.46)
TCC		0.20	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.14
ROC(BNA)	OBS vs SCM	0.49(0.54)(0.67)	0.46(0.61)(0.83)	0.62(0.54)(0.53)	0.52(0.51)(0.55)	0.65(0.41)(0.55)	0.55(0.53)(0.58)	0.55(0.53)(0.58)	0.55(0.53)(0.58)
HSS	OBS vs PMME	0.24	0.31	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
Trend	OBS(Δ)	0.73(1.23)	0.35(1.24)	0.04(0.56)	-27.56(77.29)	80.3(42.22)	80.3(42.22)	53.4(12.34)	53.4(12.34)
	SCM(Δ)	0.78(0.89)	0.78(0.79)	0.80(0.76)	0.03(1.42)	13.5(9.89)	9.9(6.46)	9.9(6.46)	9.9(6.46)
Cor YrP	OBS(Δ)	-0.08(0.22)	-0.38(0.45)	-0.26(0.31)	-0.08(0.22)	0.58(0.45)	0.26(0.31)	0.26(0.31)	0.26(0.31)
	SCM(Δ)	0.15(0.11)	0.32(0.36)	0.27(0.23)	0.15(0.11)	0.32(0.36)	0.27(0.23)	0.27(0.23)	0.27(0.23)
NINO3.4	C.OBS/SCM	-0.05(0.03)	-0.10(-0.07)	-0.38(-0.36)	-0.15(-0.11)	0.18(0.17)	0.08(-0.06)	0.08(-0.06)	0.08(-0.06)
	TCC(AND)	0.92(-0.84)	0.92(-0.79)	0.87(-0.68)	0.92(-0.84)	0.92(-0.79)	0.87(-0.68)	0.87(-0.68)	0.87(-0.68)
WPC	C.OBS/SCM				0.34(-0.23)	0.27(0.17)	0.12(-0.20)	0.12(-0.20)	0.12(-0.20)
	TCC(AND)				0.46(-16.57)	0.77(-26.84)	0.44(-19)	0.44(-19)	0.44(-19)
Total									
Forecast									

<APCC MME 분석 테이블 제공>

- 기후예측과 3개월 전망 회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (매월)
- 3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 특성 및 분석 결과 테이블 제공 (매월)

1개월 전망 지원을 위한 계절내 예측 자료 제공

<WMO 계절내 예측 결과 브리핑 예시>

기온 지반추 예측 (5.13~6.23)									
Model	1w	2w	3w	4w	5w	6w	7w	8w	9w
PMME	131276	182454	152158	133051	243245				
ECMWF	121749	152388	112384	112384	173051	153047			
Washington	114643	116223	82566	82566	82566	82566			
Tokyo	117689	116787	116787	116787	116787	116787			
Exeter	116787	116787	116787	116787	116787	116787			
Soul	116787	116787	116787	116787	116787	116787			
Melbome	116787	116787	116787	116787	116787	116787			
Beijing	116787	116787	116787	116787	116787	116787			
Moscow	116787	116787	116787	116787	116787	116787			

<개별 GPC 확률예보 결과 테이블 제공>

- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 정보 송부 (매주 화요일)
- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 자료 콘텐츠 추가 (수시)
- 기후예측과 1개월 전망 회의 참석 및 WMO 계절내 예측 결과 브리핑 (매주 수요일 화상회의)

여름철 방재 기간 기후 감시·분석 정보 제공

<여름철 폭염 모니터링 정보 제공 예시>

<여름철 주간 기압계 및 해수면 온도 모니터링 예시>

- 여름철 방재 기간 기후 이슈 사전 감시를 위한 폭염, 전지구 이상기후, ENSO 현황 등에 대한 모니터링 정보 제공 (매주 수요일 화상회의)
- 여름철 방재 기간 기후 감시·분석 정보 제공을 위한 전지구 기압계 현황 및 해수면 온도 분포 등 주간 기후 감시 요소 모니터링 결과 제공 (매주 수요일 전자우편, 기상청에서 기후정보포털에 게재)

장기예보 정확도 향상을 위한 2019년도 3분기 기상청 장기예보 현업 지원 실적

【2019. 10. 1.(화) / APEC기후센터 기후사업본부 기후분석과】

□ 목적

- APCC는 기상청 장기예보 생산 및 이상기후 전망에 필요한 기후분석 및 예측 자료 제공 등 기후예측분야 기상청 지원·협업 유지
 - ※ APCC 장기예보 전담 지원팀 구성('17.7.)하여 기상청 장기예보 지원 강화
- 기후예측분야 지원 실적을 기상청에 정기보고(분기별)하여 기상청 요구사항에 대한 점검 및 예보기술 지원 보강 등 장기예보 지원 강화

□ 기상청 지원 세부과제

- ① WMO 장기예보 선도센터(WMO LC-LRFMME) 운영
- ② 관측 기반 기후 분석 및 과거 사례 심층 분석
- ③ 계절 및 계절내 다중모델앙상블(MME) 및 기상청 현업모델 예측특성 분석
- ④ 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템 개발
- ⑤ 아태지역 이상기후 감시 기법 개발

□ 지원실적 요약

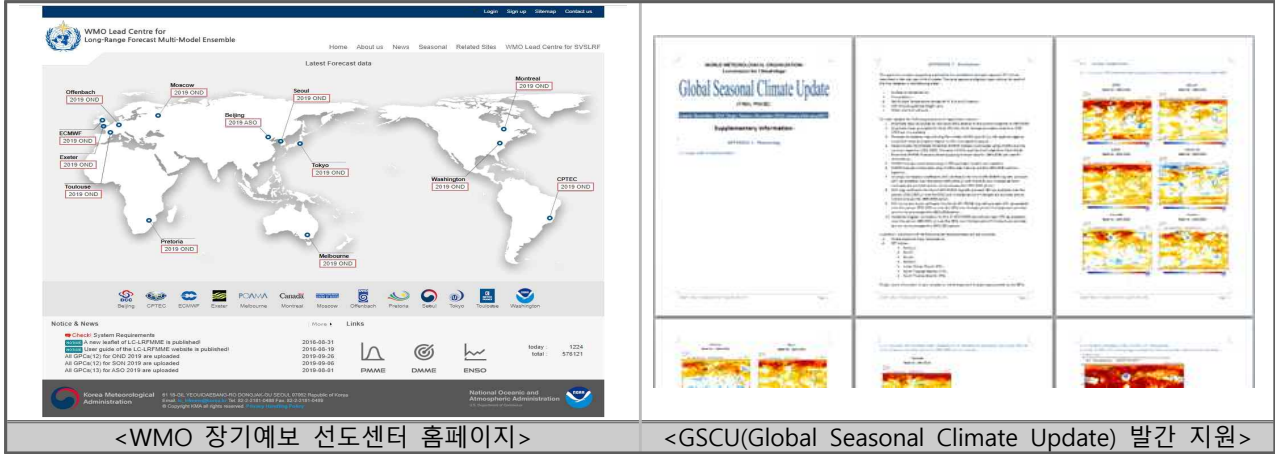
지원 부서	지원 분야	지원 실적
기상청 기후예측과	1개월 전망, 3개월 전망 WMO 장기예보 선도센터 운영	46회

□ 세부과제별 지원 실적

기상청 현업 종류	지원 내용	지원 실적	세부 과제
WMO LC 운영	WMO 장기예보 선도센터 운영보고서 작성 및 제출	7월4일, 8월8일, 9월9일 (총 3회)	①
WMO LC 운영	2019년 여름철예측을 위한 WMO GSCU 발간 지원	8월 26일 (총 1회)	①
3개월 전망	WMO 장기예보 선도센터 계절 예측자료 생산 및 송부	7월12일, 8월14일, 9월16일 (총 3회)	①
3개월 전망	최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월기후 분석토의 발표	7월24일 (총 1회)	②
3개월 전망	최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월기후 분석토의 분석 자료 제공 (9월 영향 태풍 기후학적 원인분석)	9월25일, 9월27일 (총 2회)	②
3개월 전망	3개월 전망회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (APCC MME 분석표 제공 포함)	7월16일, 8월19일, 9월17일 (총 3회)	③
1개월 전망	1개월 전망 화상회의 참석 및 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 브리핑	7월3일, 7월10일, 7월17일, 7월24일, 7월31일, 8월7일, 8월13일, 8월21일, 8월28일, 9월4일, 9월10일, 9월18일, 9월25일 (총 13회)	③
1개월 전망	여름철 방재 기간 기후 감시·분석 정보 제공 (폭염, 이상기후, ENSO 모니터링 정보 제공)	7월2일, 7월9일, 7월16일, 7월23일, 7월30일, 8월6일, 8월13일, 8월20일, 8월27일, 9월3일 (총 10회)	②,⑤
1개월 전망	여름철 주간 기후감시·분석 정보 제공 (전지구 기압계 현황, 전지구 해수면 온도 분포 등 주간 현황)	7월2일, 7월9일, 7월16일, 7월23일, 7월30일, 8월6일, 8월13일, 8월20일, 8월27일, 9월3일 (총 10회)	②

붙임 대표 실적 (상세)

1 WMO 장기에보 선도센터 계절 및 계절내 예측 시스템 운영



- GPC 자료 전처리, MME 예측 수행, 검증 후 홈페이지 제공 (매달)
- GPC-Seoul 홈페이지를 통한 GPC-Seoul의 예측 자료 제공 (매달)
- WMO 장기에보 선도센터 운영 보고서 작성 및 개인정보 처리시스템 접속 기록 점검 보고 (매달)
- GFCS 구축을 위한 WMO GSCU 발간 지원 (매 분기)
- WMO 장기에보 선도센터 계절내 예측자료 수신 모니터링 및 MME 예측결과 생산 (매주)

2 최근 기후특성 이해를 위한 월기후 분석 토의 지원

북태평양고기압 발달 약화

- 장마전선의 발달은 북서태평양 아열대 고기압의 발달 또는 북태평양 고기압의 동아시아 확장과 밀접 연관
- 우리나라 기압을 위치, 북쪽의 차가운 공기 확장
- 열대-아열대 서태평양 대류활동 약화
- 북태평양고기압 한반도, 북으로 세력 확장 약화에 기여
- 북태평양 지역 낮은 SST: 대기와의 상호작용
- 북태평양 고기압 분해 약화에 기여, 중위도 기압계에도 영향
- 7월 강수 적었을 때와 유사한 패턴

7월 우리나라 기온 및 강수 특성 요약

평년과 비슷한 기온 & 평년보다 적은 강수량을 보인 7월

기온	강수
<ul style="list-style-type: none"> 평균기온 23.8 °C 평년과 비슷한 기온 (-0.1 °C 7/22일 기준) 지역별 기온 편차 큼 → 더운 중부지방, 덥지 않은 남부지방 상동 기압골의 영향, 북태평양 고기압 약화, 서태평양 대류활동 약화, 북극지역 고기압성 편차와 음의 북극진동 영향으로 기온 높지 않았음 한여름(7월) 기온이 매우 높았던 작년과는 반대 패턴을 보임 	<ul style="list-style-type: none"> 총강수량 150.3 mm (16.5피센타일 7/22일 기준) 장마전선 늦은 북상: 상동 기압골, 북태평양 해수면온도 영향, 서태평양 대류활동 약화, 북태평양 고기압 약화 → 강수가 많을 수 있는 조건이 형성되지 못함 지역별로 강수량 차이 큼 → 중부지방 강수 매우 적음 19~21일 장마전선 & 태풍 다니스 영향 → 주로 남부, 제주 많은 강수

- 최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월 기후분석 토의 발표 (매월, APCC 1회)
- 전 지구 기후시스템의 특징을 포함한 체계적인 기후 분석 정보 제공

③ 3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 정보 제공

500hPa Geopotential Height Anomaly (Prediction:SCM)
Geopotential Height at 500 hPa for SEP 2019
Geopotential Height at 500 hPa for OCT 2019
Geopotential Height at 500 hPa for NOV 2019

<APCC MME 예측 결과 브리핑 예시>

Summary
APCC FORECAST TABLE

<APCC MME 분석 테이블 제공>

- 기후예측과 3개월 전망 회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (매월)
- 3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 특성 및 분석 결과 테이블 제공 (매월)

④ 1개월 전망 지원을 위한 계절내 예측 자료 제공

예측결과
PMME
F1 (10.7-10.13) F2 (10.14-10.20) F3 (10.21-10.27) F4 (10.28-11.3)

<WMO 계절내 예측 결과 브리핑 예시>

PMME 및 개별모델 확률예측 결과

<개별 GPC 확률예보 결과 테이블 제공>

- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 정보 송부 (매주 화요일)
- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 자료 콘텐츠 추가 (수시)
- 기후예측과 1개월 전망 회의 참석 및 WMO 계절내 예측 결과 브리핑 (매주 수요일 화상회의)

⑤ 여름철 방재 기간 기후 감시·분석 정보 제공

여름철 폭염 모니터링 (8/24~8/30)
여름철 서태평양 대기활동
대서양 NAO 순인도 온순

<여름철 폭염 모니터링 정보 제공 예시>

기압계 현황
기후감시 요소 현황 (해양상태)

<여름철 주간 기압계 및 해수면 온도 모니터링 예시>

- 여름철 방재 기간 기후 이슈 사전 감시를 위한 폭염, 전지구 이상기후, ENSO 현황 등에 대한 모니터링 정보 제공 (매주 수요일 화상회의)
- 여름철 방재 기간 기후 감시·분석 정보 제공을 위한 전지구 기압계 현황 및 해수면 온도 분포 등 주간 기후 감시 요소 모니터링 결과 제공 (매주 수요일 전자우편, 기상청에서 기후정보포털에 게재)

장기예보 정확도 향상을 위한 2019년도 4분기 기상청 장기예보 현업 지원 실적

【2019. 12. 31.(화) / APEC기후센터 기후사업본부 기후분석과】

□ 목적

- APCC는 기상청 장기예보 생산 및 이상기후 전망에 필요한 기후분석 및 예측 자료 제공 등 기후예측분야 기상청 지원·협업 유지
 - ※ APCC 장기예보 전담 지원팀 구성('17.7.)하여 기상청 장기예보 지원 강화
- 기후예측분야 지원 실적을 기상청에 정기보고(분기별)하여 기상청 요구사항에 대한 점검 및 예보기술 지원 보강 등 장기예보 지원 강화

□ 기상청 지원 세부과제

- ① WMO 장기예보 선도센터(WMO LC-LRFMME) 운영
- ② 관측 기반 기후 분석 및 과거 사례 심층 분석
- ③ 계절 및 계절내 다중모델앙상블(MME) 및 기상청 현업모델 예측특성 분석
- ④ 상세화 기법을 응용한 한반도 계절 예측 전문가 시스템 개발
- ⑤ 아태지역 이상기후 감시 기법 개발

□ 지원실적 요약

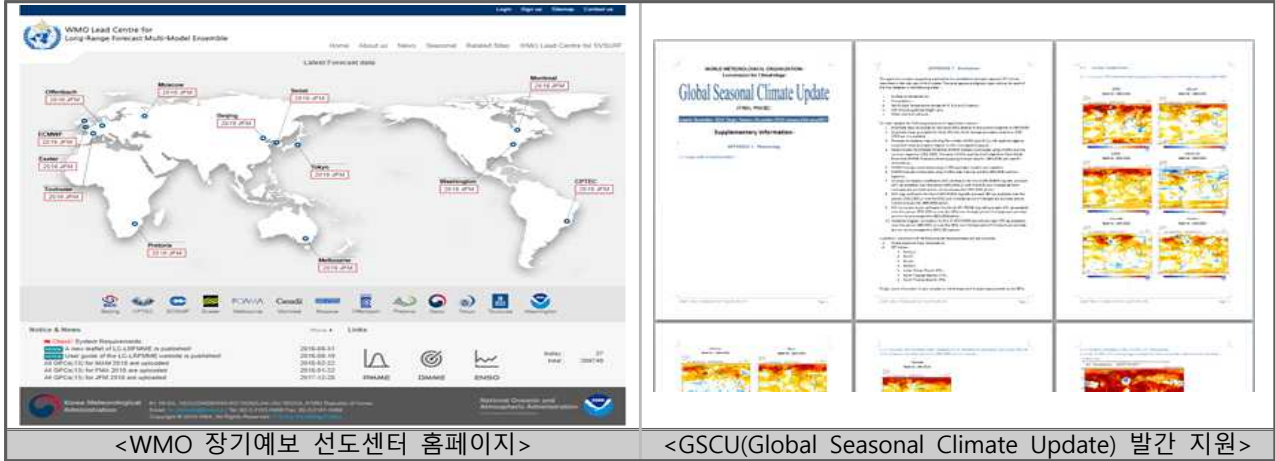
지원 부서	지원 분야	지원 실적
기상청 기후예측과	1개월 전망, 3개월 전망 WMO 장기예보 선도센터 운영	26회

□ 세부과제별 지원 실적

기상청 현업 종류	지원 내용	지원 실적	세부 과제
WMO LC 운영	WMO 장기예보 선도센터 운영보고서 작성 및 제출	10월2일, 11월6일, 12월3일 (총 3회)	①
WMO LC 운영	2019/2020년 겨울철예측을 위한 WMO GSCU 발간 지원	11월 25일 (총 1회)	①
3개월 전망	WMO 장기예보 선도센터 계절 예측자료 생산 및 송부	10월16일, 11월14일, 12월16일 (총 3회)	①
3개월 전망	최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월기후 분석토의 발표	10월29일, 12월5일 (총 2회)	②
3개월 전망	3개월 전망회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (APCC MME 분석표 제공 포함)	10월15일, 11월18일, 12월17일 (총 3회)	③
1개월 전망	1개월 전망 화상회의 참석 및 WMO 장기예보 선도센터 계절내 예측결과 브리핑	10월1일, 10월8일, 10월16일, 10월23일, 10월30일, 11월6일, 11월13일, 11월20일, 11월27일, 12월11일, 12월18일, 12월24일, 12월31일 (총 13회)	③
1개월 전망	WMO 계절내 예측자료 콘텐츠 추가 (개별 GPC hindcast 검증결과 테이블)	12월 18일부터 (총 1회)	③

붙임 대표 실적 (상세)

1 WMO 장기에보 선도센터 계절 및 계절내 예측 시스템 운영



<WMO 장기에보 선도센터 홈페이지>

<GSCU(Global Seasonal Climate Update) 발간 지원>

- GPC 자료 전처리, MME 예측 수행, 검증 후 홈페이지 제공 (매달)
- GPC-Seoul 홈페이지를 통한 GPC-Seoul의 예측 자료 제공 (매달)
- WMO 장기에보 선도센터 운영 보고서 작성 및 개인정보 처리시스템 접속 기록 점검 보고 (매달)
- GFCS 구축을 위한 WMO GSCU 발간 지원 (매 분기)
- WMO 장기에보 선도센터 계절내 예측자료 수신 모니터링 및 MME 예측결과 생산 (매주)

2 최근 기후특성 이해를 위한 월기후 분석 토의 지원

11월 평균 전지구 순환장 - 500hPa 지위고도

- ▶ 티베트-중국 남부-북서태평양 고기압성 편차, 우리나라 북쪽 비이달로 주변 저기압성 편차
- ▶ 우랄산맥 서쪽, 북동태평양, 그린란드 고기압성 편차
- ▶ 기온이 높았던 월초반 기간(리크기온 계속 높았음) → 비이달로 남동쪽 고기압성 편차, 우리나라 남쪽 저기압성 편차
- ▶ 기온변동이 컸던 기간 → 타이달 호 서쪽-북태평양 저기압성 편차, 우리나라 남쪽 고기압성 편차, 태평양고기압 강하고 동쪽으로 확장, 북태평양 저기압 강해짐 시기
- ▶ 기온 높았던 후반기간 → 우리나라-캄차카반도 남쪽 고기압성 편차
- ▶ 기압계 변동이 컸으며 우리나라 남쪽의 고기압성 편차와 북쪽의 저기압성 편차의 영향에 따라 기온변동이 있었음
- ▶ 11월 기온이 높았던 순환장과 유사한 부분

11월 우리나라 기온 및 강수 특성 요약

기온 변동이 컸으나 평년보다 높은 기온, 많은 강수량을 보인 11월

기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 전국 평균기온 8.8°C → 평년보다 1.2°C 높음 ✓ 기압계의 흐름이 원활한 가운데 기온변동이 컸고, 우리나라 남쪽 북서태평양의 고기압 영향을 받아 전체적으로는 기온이 평년보다 높았음 ✓ 남쪽 고기압의 영향이 강했던 시기에는 고온 현상, 북쪽 시스템의 영향을 받아 찬 공기가 남하한 시기에는 저온 현상이 나타남 ✓ 우리나라 남쪽의 고기압은 북서태평양 지역의 높은 해수면온도와 관련
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 전국 평균 강수량 58.2mm → 평년보다 다소 많은 강수량 60.4퍼센타일 ✓ 중태평양 높은 해수면온도와 Indian Ocean Dipole pattern과 관련된 대류 활동으로 인한 대기순환 장의 영향으로 강수량이 많을 수 있는 환경 형성

<월 기후 분석 토의 지원 예시>

<월 기후 분석토의 지원 예시 >

- 최근 기후특성 이해 및 분석 역량 강화를 위한 월 기후분석 토의 발표 (매월, APCC 2회)
- 전 지구 기후시스템의 특징을 포함한 체계적인 기후 분석 정보 제공

3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 정보 제공

<APCC MME 예측 결과 브리핑 예시>

APCC FORECAST TABLE							REFERENCE
2019년 10월		TEMP			PREC		
		11	12	1	11	12	
OBS	MEAN	7.8	1.5	-1.0	17.2	22.0	Average value from 1981 to 2019
	RANGE(95%ile)	27.8(2.2)	21.0(2.1)	11.8(4.0)	22.1(2.0)	17.6(2.8)	Normal range
Forecast	SCM ANOM(Nov)	0.8(0.2)	1.8(0.2)	1.7(0.4)	0.1(0.3)	-1.1(0.2)	SCM Sample Composite Mean (Nov)
	RANGE(95%ile)	19.0(0.5)	19.0(0.5)	19.0(0.5)	19.0(0.5)	19.0(0.5)	95% New Normal Range(95%ile)1981-2019
TCC	OBS(50hPa)	0.42*	0.15	0.12	0.42*	0.33*	
	OBS(PMME)	0.35*	0.07*	0.07*	0.07*	0.07*	ICC Temporal Correlation Coefficient(1981-2019)
Trend	OBS(50hPa)	0.64(0.19)(0.04)	0.12(0.19)(0.01)	1.67(0.19)(0.04)	-1.8(0.12)	0.97(1.47)	Linear Trend 1950 & 1719(1-2019)(log-log scale) Linear Trend 1950 & P 1719(1-2019)(log-log scale) Linear Trend 1950(1719-2019)
	SCM(50hPa)	0.9(0.1)	0.1(0.0)	0.4(0.0)	1.3(0.4)	0.2(0.1)	Composite 1950 on 1-1981-2019 log-log(1950-1981-2019)
Corr(F)	OBS(50hPa)	0.57(0.50)*	0.30(0.23)	0.47(0.40)	0.57(0.50)*	0.47(0.40)	
	SCM(50hPa)	0.3(0.2)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	
NINO3.4	COS(50hPa)	0.10(0.26)	0.11(0.19)*	0.06(0.04)	0.37(0.52)	0.50(0.50)*	NINO3.4 index(1952-2019) 5.0-5.0(SST) Niño-3.4 Composite area
	TCC(50hPa)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	COS(50hPa) ICC between OBS(50hPa) and Niño-3.4
WFC	COS(50hPa)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	ICC(50hPa) ICC between OBS(50hPa) and Niño-3.4
	TCC(50hPa)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)	ICC(50hPa) ICC between OBS(50hPa) and Niño-3.4

<APCC MME 분석 테이블 제공>

- 기후예측과 3개월 전망 회의 참석 및 APCC MME 결과 브리핑 (매월)
- 3개월 전망 지원을 위한 APCC MME 예측 특성 및 분석 결과 테이블 제공 (매월)

1개월 전망 지원을 위한 계절내 예측 자료 제공

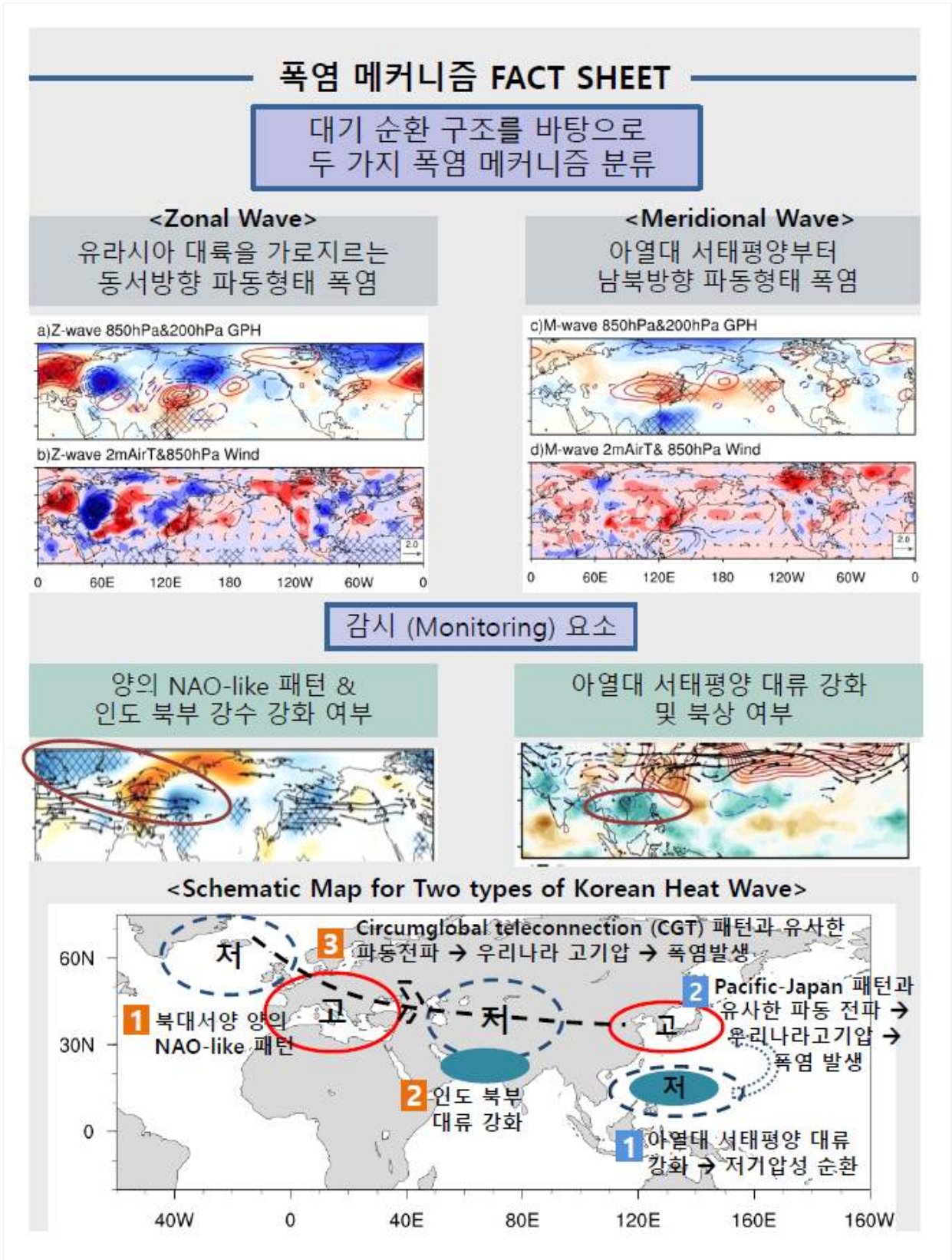
<WMO 계절내 예측 결과 브리핑 예시>

기온 검증결과 (Hindcast)		강수량 검증결과 (Hindcast)		
Model	12.23-12.29	1.30-1.5	12.23-12.29	1.30-1.5
ECMWF	0.8	0.8	0.8	0.8
WMO	0.8	0.8	0.8	0.8
Tokyo	0.8	0.8	0.8	0.8
ECMWF	0.8	0.8	0.8	0.8
WMO	0.8	0.8	0.8	0.8
Moscow	0.8	0.8	0.8	0.8

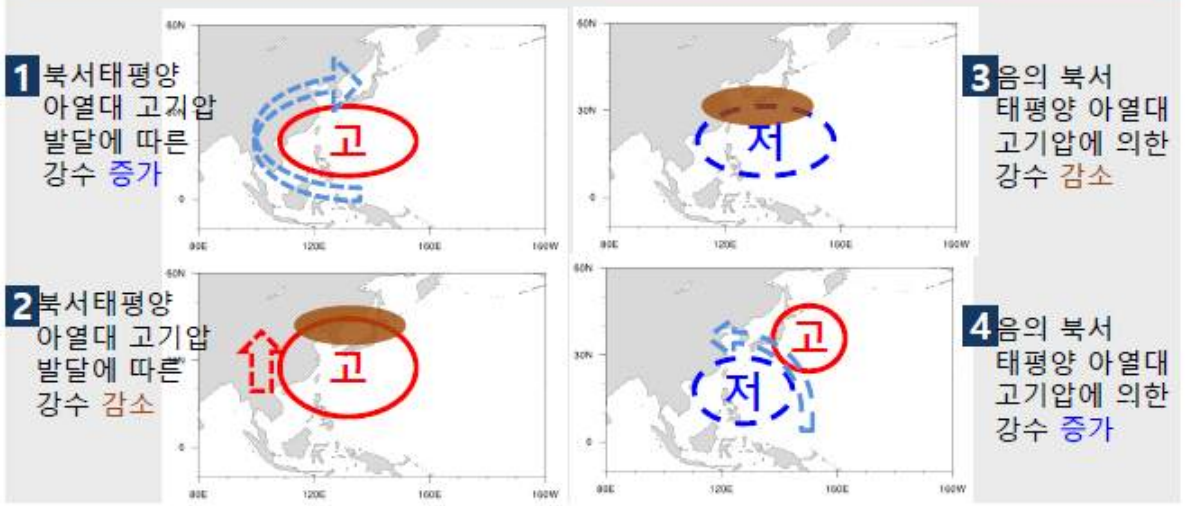
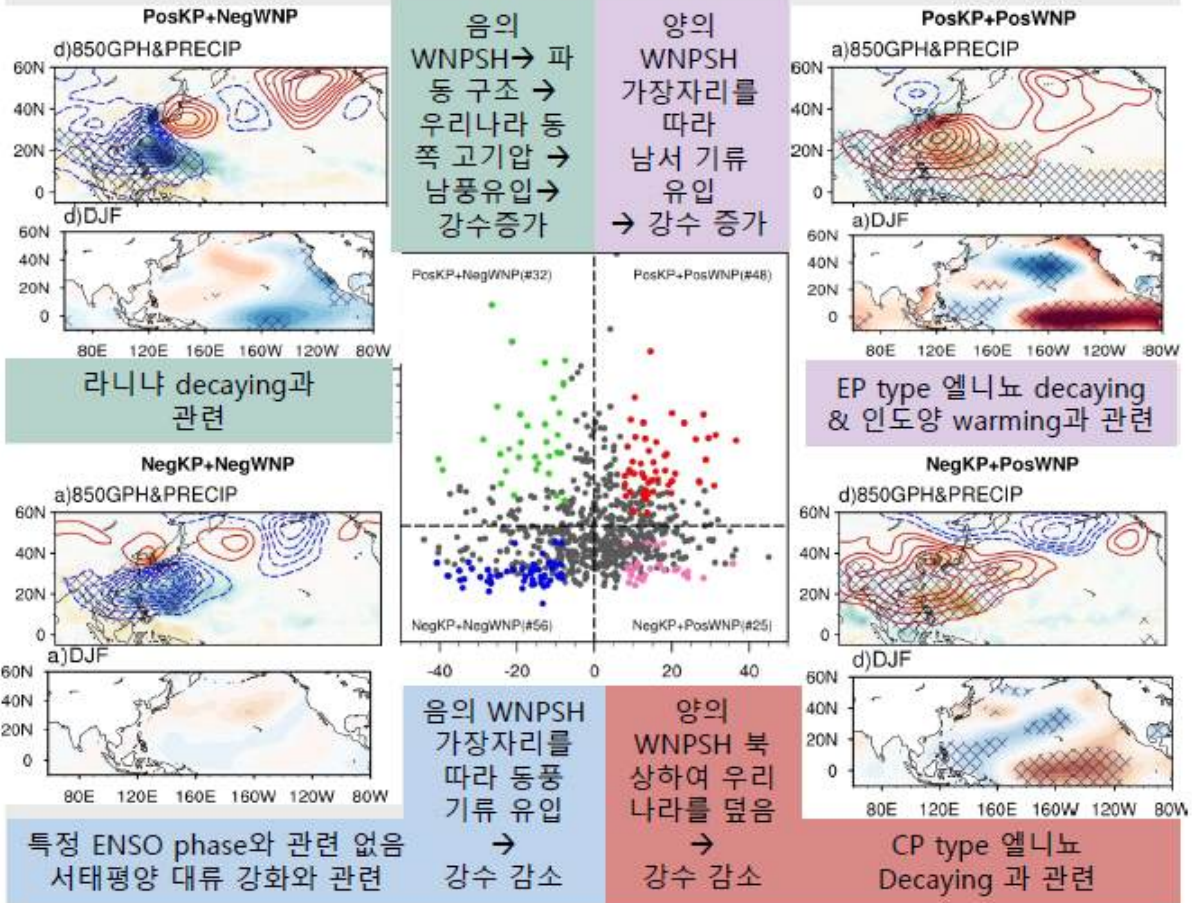
<개별 GPC hindcast 검증결과 테이블 제공>

- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 정보 송부 (매주 화요일)
- 기후예측과 1개월 전망 지원을 위한 WMO 계절내 예측 자료 콘텐츠 추가 (수시)
- 기후예측과 1개월 전망 회의 참석 및 WMO 계절내 예측 결과 브리핑 (매주 수요일 화상회의)

부록 B. 현업 활용을 위한 관측 기반 기후 분석 및 기후 예측 모델 특성 분석 Fact Sheet



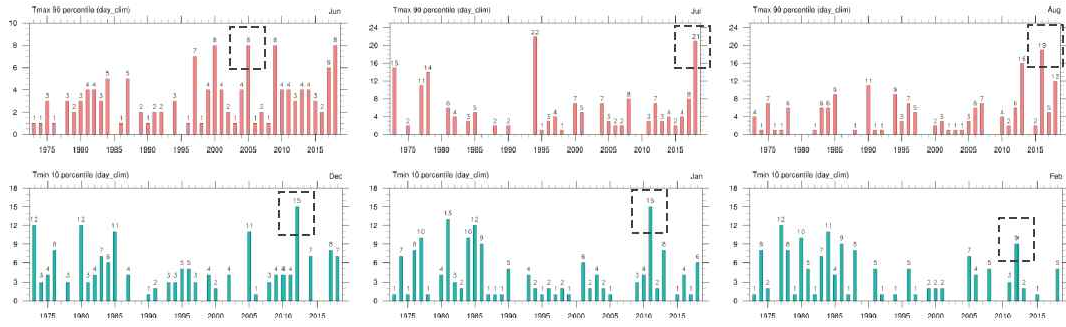
북서태평양 아열대 고기압과 우리나라 여름철 강수 관련성 FACT SHEET



:: 여름철 & 겨울철 월별 극한기온 사례 ::

1

- 극한기온 사례 선정 : 여름철 6,7,8월에서 일 최고기온이 90퍼센타일 값을 초과하는 날 수가 가장 많은 해, 겨울철 12,1,2월에서 일 최저기온이 10퍼센타일 값 미만인 날 수가 가장 많은 해
- 초과/미만인 날 수가 가장 많은 해가 여러 개인 경우는 일 평균기온의 90/10퍼센타일을 기준으로 가장 많은 해를 선정
- 최근 사례를 중심으로 보기 위해 2000년 이후의 사례를 선정

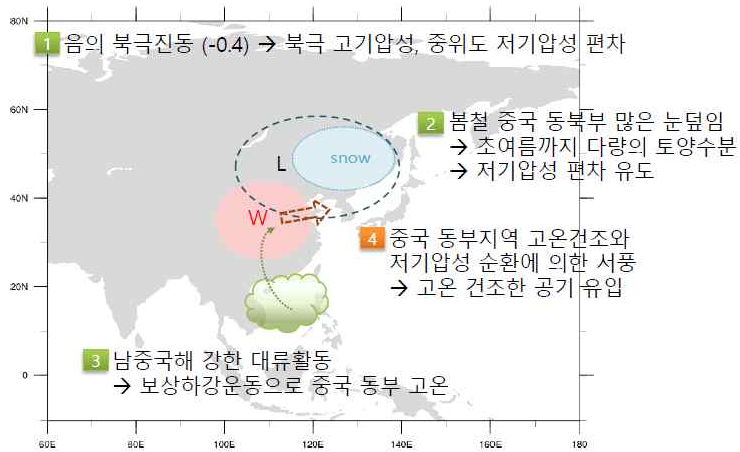


	월 (기온 평균값)	선정된 사례 해	평균기온 (순위)	최고/최저기온 (순위)
여름철	6월 (21.2°C)	2005년	22.4°C (2위)	27.8°C (4위)
	7월 (24.5°C)	2018년	26.8°C (2위)	31.6°C (2위)
	8월 (25.1°C)	2016년	26.7°C (5위)	32.0°C (3위)
겨울철	12월 (1.5°C)	2012년	-1.7°C (2위)	-6.0°C (3위)
	1월 (-1.0°C)	2011년	-4.8°C (3위)	-9.8°C (2위)
	2월 (1.1°C)	2012년	-0.8°C (7위)	-5.7°C (7위)

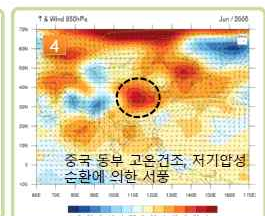
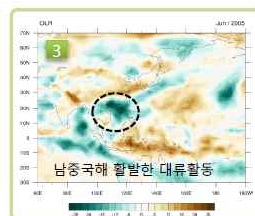
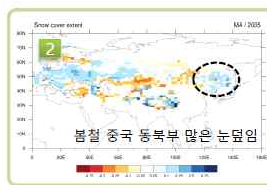
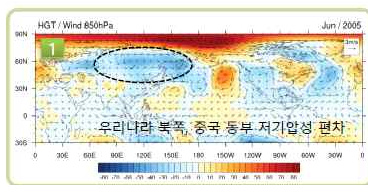
* 순위는 1973-2018년 기준
여름철은 기온 높은 순 순
겨울철은 기온 낮은 순

:: 여름철 사례 :: 2005년 6월 ::

2

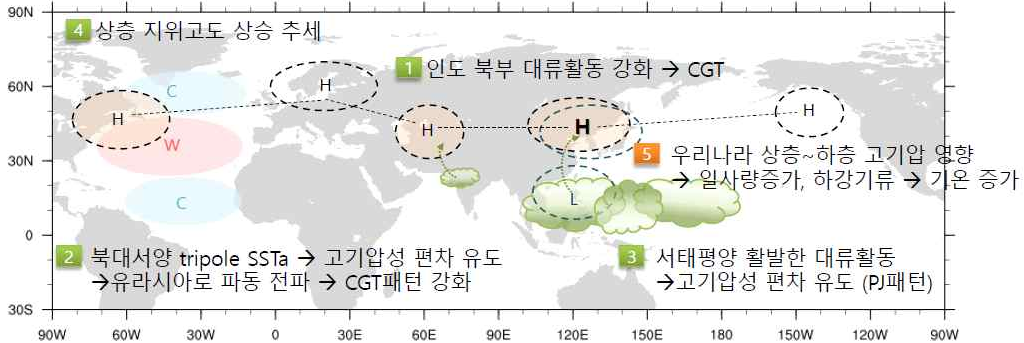


- 평균기온 22.4°C (AN +1.2) / 평균 최고기온 27.8°C (+1.3) / 평균 최저기온 18.0°C (+1.3)
- 북극에 강한 고기압성 편차, 중위도 유라시아에 저기압성 편차 위치한 음의 북극진동
- 봄철 중국 동북부 많은 눈덮임으로 초여름까지 다량의 토양수분이 유지되면서 이 지역 저기압성 편차 유도에 영향
- 남중국해 강한 대류활동에 의한 보상하강운동으로 중국 동부지역 고온에 영향
- 중국 동부지역 고온 건조한 공기가 저기압성 순환에 의한 서풍으로 우리나라로 유입되면서 기온 상승

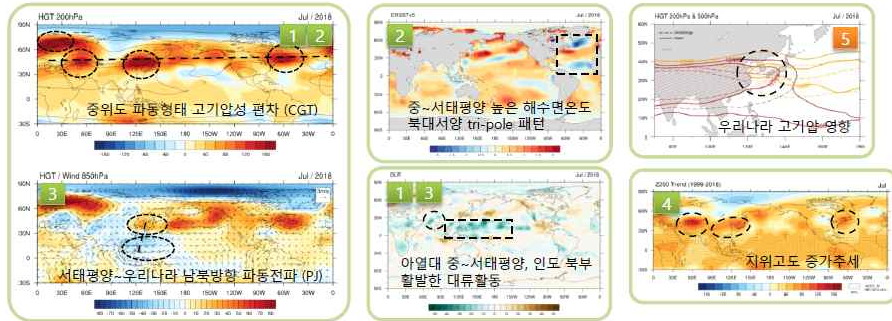


:: 여름철 사례 :: 2018년 7월 ::

3

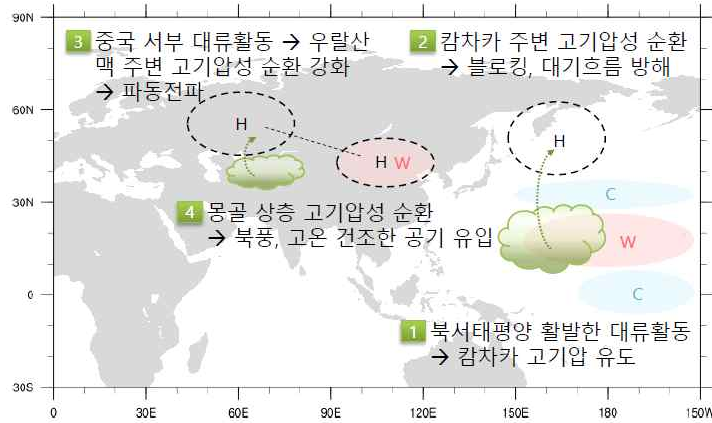


- 평균기온 26.8°C (AN +2.3) / 평균 최고기온 31.6°C (+2.8) / 평균 최저기온 22.9°C (+1.8)
- 인도 북부 대류활동 강화와 관련된 상층 CGT 패턴 (북아메리카, 북유럽, 우랄산맥 남쪽, 동북아시아에 강한 고기압성 편차)
- 북대서양 tripole 패턴 해수면온도가 이전 겨울부터 지속되면서 대기와의 상호작용을 통해 북대서양에 고기압성 편차 유도, 유라시아로 파동이 전파되며 CGT 패턴 강화에 영향
- 최근 상층 지위고도 상승 추세의 영향 (강한 증가 추세 지역이 CGT 패턴의 고기압성 편차 지역과 유사)
- 아열대 중태평양~서태평양에서 활발한 대류활동으로 인해 우리나라 주변에 고기압성 편차 유도 (PJ 패턴)
- 우리나라는 상층~하층에 위치한 고기압의 영향으로 일사량 증가와 하강기류에 의한 단열승온으로 높은 기온

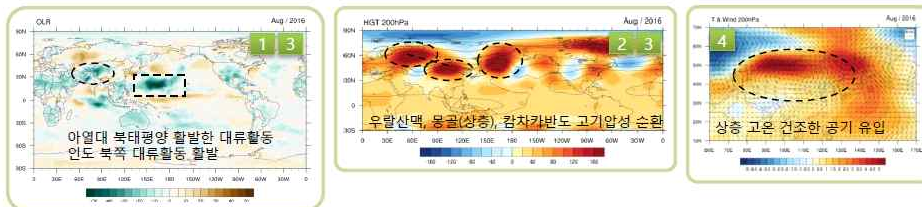


:: 여름철 사례 :: 2016년 8월 ::

4

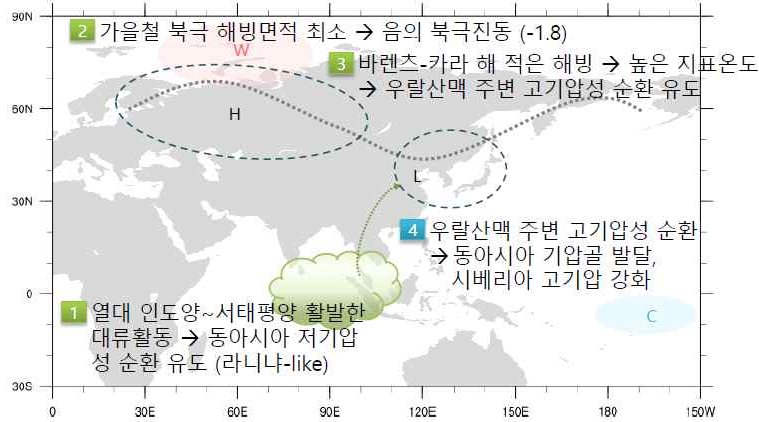


- 평균기온 26.7°C (AN +1.6) / 평균 최고기온 32.0°C (+2.2) / 평균 최저기온 22.5°C (+1.0)
- 아열대 북태평양 활발한 대류활동(해수면온도와 관련)에 의해 캄차카반도 주변 고기압성 순환 유도
- 중국 서부지역(인도 북쪽) 활발한 대류활동의 영향으로 우랄산맥 주변에 고기압성 순환 유도, 동아시아 쪽으로 파동 전파
- 캄차카반도 주변 고기압성 순환이 블로킹으로 작용해 원활한 대기흐름을 방해하고, 몽골 상층에 고온의 고기압성 편차가 지속되면서 북풍에 의해 고온 건조한 공기가 우리나라로 지속적으로 유입되면서 기온 높음

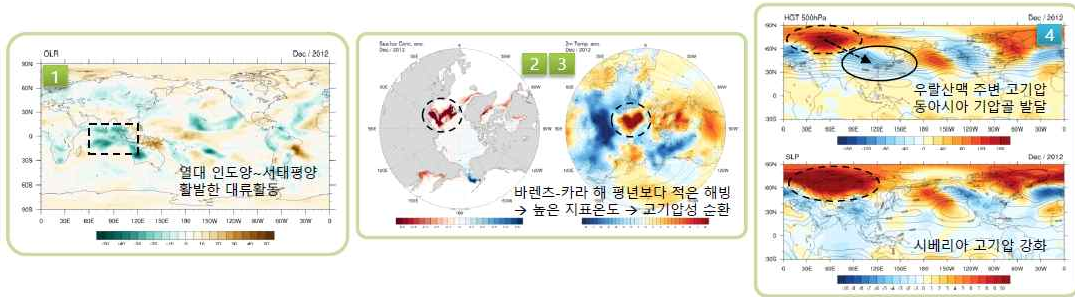


:: 겨울철 사례 :: 2012년 12월 ::

5

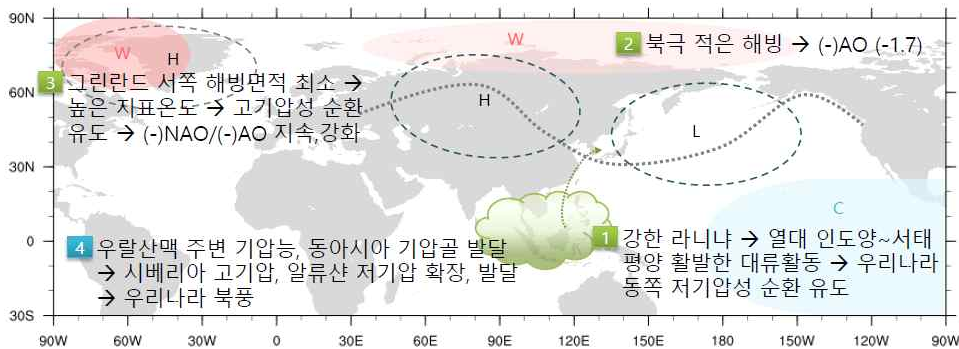


- 평균기온 -1.7°C (BN -3.2) / 평균 최고기온 3.0°C (-4.0) / 평균 최저기온 -6.0°C (-2.8)
- 동인도양~서태평양 활발한 대류활동에 의한 대기반응으로 우리나라 주변 저기압성 편차 유도 (라니냐 반응과 유사)
- 가을철 북극 해빙면적 최소, 겨울철 바렌츠-카라 해 적은 해빙의 영향으로 음의 북극진동과 우랄산맥 주변에 고기압성 순환 유도, 시베리아 고기압 강화와 로스비파 전파로 인한 동아시아 기압골 발달, 북풍의 영향으로 우리나라 기온 하강

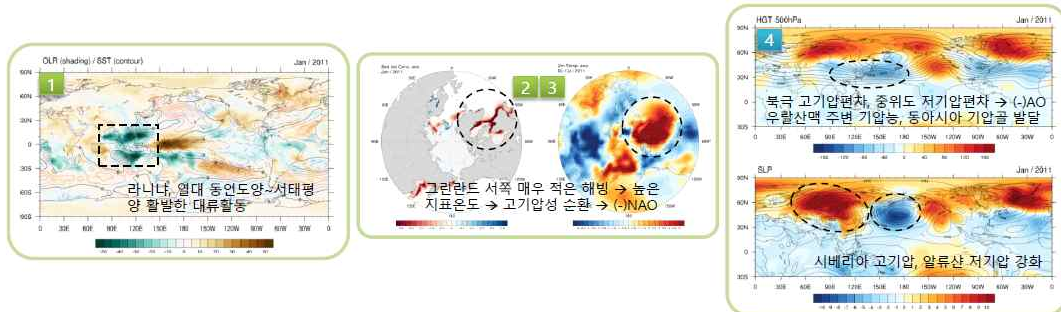


:: 겨울철 사례 :: 2011년 1월 ::

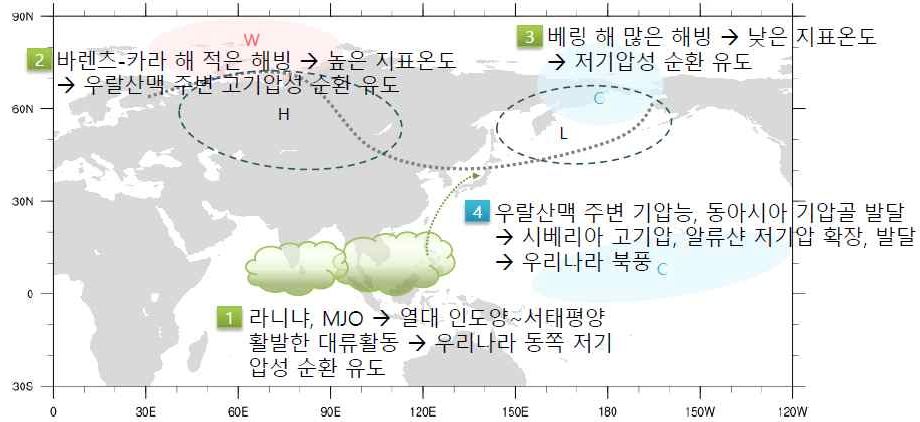
6



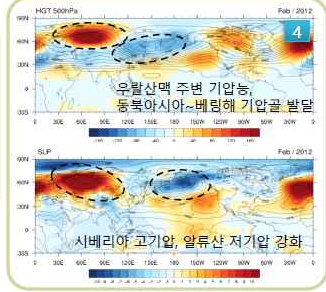
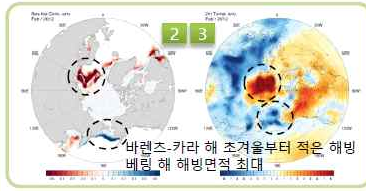
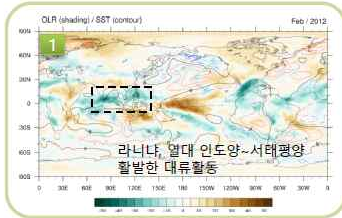
- 평균기온 -4.8°C (BN -3.8) / 평균 최고기온 0.5°C (편차 -3.8) / 평균 최저기온 -9.8°C (편차 -4.2)
- 라니냐와 관련된 동인도양~서태평양에서 활발한 대류활동의 영향으로 우리나라 동쪽 저기압성 순환 유도
- 그린란드 서쪽 해빙 매우 적은 상태가 초겨울부터 지속되면서 이 지역 높은 지표온도와 고기압성 순환 유도, 음의 북대서양진동과 음의 북극진동 지속 강화에 영향
- 우랄산맥 주변 기압능과 동아시아 기압골 발달로 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 확장, 발달하면서 북풍 강화로 대륙의 찬 공기 남하해 우리나라 기온 하강



:: 겨울철 사례 :: 2012년 2월 ::



- 평균기온 -0.8°C (BN -1.9) / 평균 최고기온 4.7°C (편차 -2.1) / 평균 최저기온 -5.7°C (편차 -1.9)
- 라니냐와 관련된 열대 인도양~서태평양 활발한 대류활동의 영향으로 우리나라 동쪽 저기압성 순환 유도
- 초겨울부터 바렌츠-카라 해 적은 해빙의 영향으로 우랄산맥 주변에 고기압성 순환 유도, 시베리아 고기압 강화와 로스비파 전파로 인한 동아시아 기압골 발달
- 겨울철 베링 해 많은 해빙의 영향으로 베링 해 주변에 저기압성 순환 유도, 동아시아~북태평양까지 넓은 지역에 기압골 위치



:: 극한기온 사례 관련 영향인자 요약 (여름철) ::

사례	사례 관련인자	예보활용	우리나라 기온 경향 (관련인자 1std 이상인 경우)	참고 우리나라 기온과 관련인자의 상관계수 (1979-2018년)
2005년 6월	중국 동부 하층 온도 T850(100-125E, 25-45N)	중국 동부 하층 고온, 서풍 동반 시 영향가능 선형인자로서 활용은 어려움		6월지수:6월기온 = 0.56*
	중국 동북부 봉철(3월) 눈덮임 snow cover(120-135E, 40-55N)	3월 눈덮임이 많은 경우 6월 기온은 높은 경향 늦봄 토양수분과 함께 고려되어야 함	AN3, NN2, BN1	3월지수:6월기온 = 0.57*
	중국 동북부 봉철(5월) 토양수분 soil water(120-135E, 40-55N)	토양수분이 많은 경우 증발냉각과 강수과정을 통해 동쪽으로 대기 파동을 유도해 6월 우리나라 상층에 고기압성 편차 형성, 기온 상승 가능 그러나 6월 토양수분과 6월 기온의 상관관계는 반대로 나타나므로 지속적인 감시 필요	AN4, NN2, BN1 (6월지수 높을 때 AN2, NN3, BN2)	5월지수:6월기온 = 0.22 6월지수:6월기온 = -0.1
2018년 7월	아열대 서태평양 대류활동 OLR(100-150E, 0-25N)	아열대 서태평양(특히 남중국 해~필리핀 동쪽 지역) 대류활동 강하면 보상 하강운동으로 우리나라와 일본 주변에 고기압성 편차 유도 지속적으로 하강운동 나타나는지 감시	AN7, NN0, BN1	7월지수:7월기온 = -0.50* 6월지수:7월기온 = -0.46*
	인도 여름몬순 (인도 주변지역 대류활동) OLR(60-100E, 10-30N)	인도(북서부) 지역에서 대류활동 강한 경우 원격상관을 통해 상층에 CGT패턴 유도, 파동형태로 전파되면서 우리나라에 고기압성 편차 인도(북서부) 주변 지역 대류활동 모니터링을 통해 CGT발생 가능성 감시	AN4, NN1, BN0	7월지수:7월기온 = -0.39* 6월지수:7월기온 = -0.25
	북대서양 해수면온도 tripole 패턴 SST((55-20W,50-60N)-([70-35W,35-45N]+[50-15W,13-23N])/2)	대기와의 상호작용을 통해 (+)NAO 유도 및 강화, 북대서양 고기압성 편차는 파동전파로 유라시아에 고기압성 편차 유도 및 강화, CGT패턴 강화 과거 tripole패턴이 강했던 경우 (1994, 2013년) CGT와 유사한 상층 파동전파 패턴이 나타났고 우리나라 기온 평년보다 매우 높았음 북대서양 해수면온도 tripole 패턴이 우리나라에 영향을 준 경우 그 이전부터 형태가 유사하게 이어져온 경향이 있어 봄철부터 전체적인 해수면온도 패턴에 대한 지속적인 감시 필요	AN4, NN0, BN1	7월지수:7월기온 = 0.41* 6월지수:7월기온 = 0.16
	200hPa 지위고도 증가추세	7월 200hPa 지위고도에서 북극을 제외한 북반구 대부분 지역에 선형 증가 추세 나타남. 최근 기간에 증가 추세가 강하며 CGT패턴의 양의 편차 지역에서 추세 강한 경향		
2016년 8월	중태평양 대류활동 OLR(140-190E, 10-30N)	아열대 중태평양에서 대류활동이 강하면 보상하강 운동으로 캄차카반도 주변 지역에 고기압성 편차 유도 북태평양 해수면온도 패턴과 함께 아열대~중위도 지역 대류활동 모니터링을 통해 감시	AN1, NN2, BN2	8월지수:8월기온 = -0.1 7월지수:8월기온 = -0.2 7월지수:7월기온 = -0.35* 6월지수:7월기온 = -0.18
	북태평양 해수면온도 패턴 SST((170-240E,15-25N)-([140-240E,25-35N]+[190-240E,55-5N])/2)	아열대 중태평양에 높은 해수면온도와 이를 둘러싼 낮은 해수면온도 패턴은 아열대 중태평양 지역에 국한된 대류활동 유도 가능 특정지역을 영역 평균해 지수화하기는 어려워 전체적인 해수면온도 패턴에서 띠 형태의 패턴이 나타나는 경우 지속적인 모니터링을 통해 대류활동 발생 위치 감시 필요	AN3, NN2, BN2	8월지수:8월기온 = 0.17 7월지수:8월기온 = 0.21
	캄차카반도 고기압 Z500(150-175E, 40-60N)	캄차카반도 주변에서 고기압이 블로킹으로 작용하면 대기의 원활한 흐름을 방해 캄차카반도 주변 고기압 발생만으로는 우리나라 기온과 상관관계를 찾기 어려우며 우리나라 서쪽 순환장 상황에 따라 다르게 영향을 미칠 수 있음	AN3, NN3, BN1 (기온증가추세)	8월지수:8월기온 = 0.12 7월지수:8월기온 = 0.33*

:: 극한기온 사례 관련 영향인자 요약 (겨울철) ::

사례	사례 관련인자	예보활용	우리나라 기온 경향 (관련인자 1std 이상인 경우)	참고 우리나라 기온과 관련인자의 상관계수 (1979-2018년)
2012년 12월	우랄산맥 주변 지역 기압능 Z500(40-90E,55-80N)	우랄산맥 주변 지역에 고기압성 편차가 강하게 발달한 경우, 동아시아 기압골이 강화되고 대륙고기압이 강화되면서 동아시아는 극 쪽의 찬 공기 이류로 기온 하락 가능	AN1, NN1, BN5	12월지수:12월기온 = -0.49* 11월지수:12월기온 = 0.04
		1월은 12월이나 2월에 비해 우리나라 기온과의 상관성이 떨어짐 유의성은 떨어지지만 1월에 기압능이 강했던 경우 2월 기온이 낮은 상관성이 있음	AN1, NN3, BN4	1월지수:1월기온 = -0.29 12월지수:1월기온 = -0.27
		우랄산맥 주변 강한 고기압성 편차는 바렌츠-카라 해 주변 높은 대기 온도와 관련 있고 이는 이 지역 해빙이 적은 것과 관련 있음. 북극 해빙과 지표 온도 감시 필요	AN1, NN1, BN5	2월지수:2월기온 = -0.42* 1월지수:2월기온 = -0.3
2011년 1월	열대 서태평양과 인도양 대류활동 1)12월 OLR(70-120E, 15S-15N) 2)1월 OLR(80-100E, 5-15N) 3)1월 OLR(110-140E, 0-20N) 4)2월 OLR(65-105E, 5S-15N) 5)2월 OLR(105-140E, 0-15N)	열대 인도양과 서태평양에서 대류활동이 활발하면 Gill-type 반응과 로스비 파 전파를 통해 우리나라 동쪽에 저기압성 편차 유도 서태평양-인도양 대류활동이 활발했던 유사 사례에서 우리나라 기온이 낮은 경향이 나타났으며(상관계수는 낮았음), 유사 사례는 라니냐 또는 라니냐는 아니지만 열대 동태평양 해수면온도가 낮은 경향 열대 대류활동이 인도양에서도 활발한 경우 이에 대한 반응도 서쪽으로 이동하면서, 서태평양에서 대류활동이 활발한 경우보다 유도되는 저기압 또한 서쪽에서 나타나 우리나라에 미치는 영향 증가 라니냐 발생 가능성 (열대 동태평양 해수면온도), 열대 대류활동과 MJO 발생 감시	1)AN2, NN2, BN5	1)12월지수:12월기온 = 0.23
			2)AN2, NN0, BN4 3)AN3, NN2, BN2	2)1월지수:1월기온 = 0.14 3)1월지수:1월기온 = 0.35*
2012년 2월	북극 해빙 바렌츠-카라 해 해빙 베링 해 해빙 배핀 만-라브라도 해 해빙	가을철 해빙 면적이 적으면 겨울철까지 이어져 영향을 줄 수 있으나 어느 해에 해빙이 많고 적은지에 따라 순환장에 미치는 영향이 매우 달라짐 선정된 극한기온 사례에서는 바렌츠-카라 해 해빙 적었던 경우, 배핀 만 해빙 적었던 경우, 베링 해 해빙 많았던 경우였는데 우리나라 기온이 모두 낮았음 최근 해빙 감소 추세가 매우 강해졌고 우리나라 기온과의 상관성이 나타나지 않아 예측에 활용하기에 어려움이 있음	4)AN0, NN4, BN4 5)AN1, NN3, BN3	4)2월지수:2월기온 = 0.20 5)2월지수:2월기온 = 0.23

- ❖ AN:평년보다 높음, NN:평년과 비슷, BN:평년보다 낮음
- ❖ 겨울철 사례는 영향을 준 인자가 비슷해 월별로 구분하지 않았음

계절내 규모에서 ENSO와 AO의 위상이 한반도 겨울철 기온에 미치는 영향



Characteristic features of each composite case on Reanalysis data

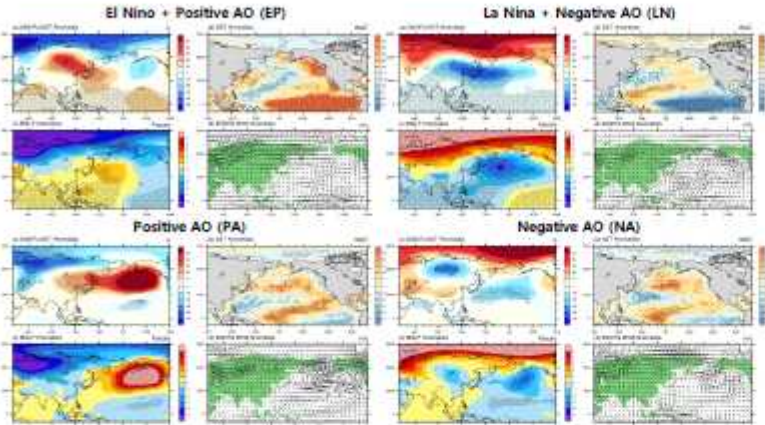


Figure 2. Composite maps of a) geopotential height anomalies at 500hPa, b) sea surface temperature anomalies, c) mean sea level pressure anomalies, and d) wind anomalies at 850hPa for each cases. The dotted area denotes 95% of confidence level.

- EP :** 두 기후인자에 의해 한반도 상공에 나타나는 양의 지위고도 편차가 중첩되며 보다 강한 양의 지위고도 편차가 나타남. 하층 북서태평양을 중심으로 고기압 편차가 나타나며 우리나라는 그 가장자리에 위치하여 남풍풍의 영향을 받아 대체적으로 온난한 경향
- LN :** 바이칼호에서 북서태평양까지 음의 지위고도 편차가 중첩되며 강하게 나타나고, 하층에서는 북서태평양을 중심으로 강한 저기압성 편차가 나타나 우리나라는 북서풍의 영향에 놓이며 한랭한 경향이 강하게 나타남.
- PA :** 양의 지위고도 편차가 중첩되어 바이칼호 남동쪽부터 북서태평양 전체에 넓고 강하게 나타나 이로 인해 알래스카만을 중심으로 고기압성 편차가 발달하고 우리나라는 그 가장자리에 들어 강해진 알지만 남풍 혹은 남동풍의 영향을 받아 온난한 경향
- NA :** 바이칼호 북서쪽과 북서태평양에 음의 지위고도 편차, 하층 순환장에서도 두 저기압성 편차의 사이에 위치하며 뚜렷한 주풍이 나타나지 않을, 평년 비습 수준의 평균기온이 나타나지만 표준오차가 크며, AO가 강하다고 해서 기온이 낮은 것은 아님. NA 사례를 상위와 하위 quartile로 나누어 대기순환장을 살펴보면 하위 quartile인 경우 바렌츠해에 중심을 둔 대륙고기압의 영향으로 한기가 내려오면서 한반도에 한파를 유발하고, 상위 quartile (온난)인 경우 바이칼호를 중심으로 저기압이 발달하고 한반도 서쪽으로는 약한 고기압이 위치하여 남풍 영향으로 온난한 기온이 나타남.

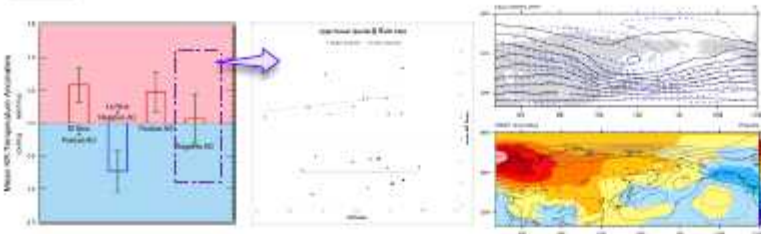


Figure 3. (Left) Mean temperature anomalies from ASOS data with standard errors for each cases. (Middle) Negative AO index with mean temperature anomalies from ASOS. (Right-top) Composite map of mean geopotential height at 500hPa. Black solid lines denote lower quartile (cold events) of Negative AO case and blue dash lines denotes upper quartile (warm events) of Negative AO case. (Right-bottom) Composite map of mean sea level pressure anomalies. (shading: Lower quartile (cold events) of Negative AO, contour: upper quartile (warm events) of Negative AO case)

Case selection

계절 내 규모에서 관측자료(1983-2018)를 활용하여 El Nino-Southern Oscillation (ENSO)와 Arctic Oscillation (AO)의 위상에 따라 사례를 구분하고 위상에 따른 대기순환장 패턴이 4주 전부터 유의하게 지속되는 경우를 선정하였음.

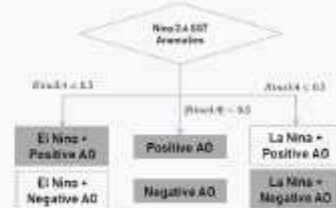


Figure 1. A schematic diagram for taking the role of AO and ENSO into consideration.

References

Song and Wu (2018). Comparison of Intraseasonal East Asian Winter Cold Temperature Anomalies in Positive and Negative Phases of the Arctic Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 8519-8537. <https://doi.org/10.1029/2018JD028343>
 Cheung, H., Zhou, W., Mok, H.Y., and Wu, M.C. (2012). Relationship between Ural-Siberian Blocking and the East Asian Winter Monsoon in Relation of the Arctic Oscillation and the El Nino-Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 25, 4242-4257. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00025.1>

ECMWF S2S Model

Table 1. Configuration of ECMWF seasonal-to-subseasonal prediction.

ECMWF	
Resolution	T639/319 L91
Hindcast	on the fly
Hindcast Length	1999-2010
Hindcast Frequency	2/week
Hindcast Ens. Size	11
Hindcast Version	V2018

Prediction skill of ECMWF S2S

ECMWF S2S Hindcast와 재분석 자료를 비교했을 때, AO 지수 예측에 대해서는 약 2주전 까지, Nino3.4지역 해수면온도 편차에 대해서는 약 4주 전 예측에서까지 상관계수 0.5이상의 높은 상관성을 나타냄, AO와 ENSO에 의한 상승 지위고도 패턴은 약 3주 전 예측에서까지 비유과 유사하게 묘사하였고, 우리나라 평균 기온은 Negative AO 사례를 제외하고는 4주 전 예측에서 부터 우리나라 평균 기온의 경향성을 잘 예측함.

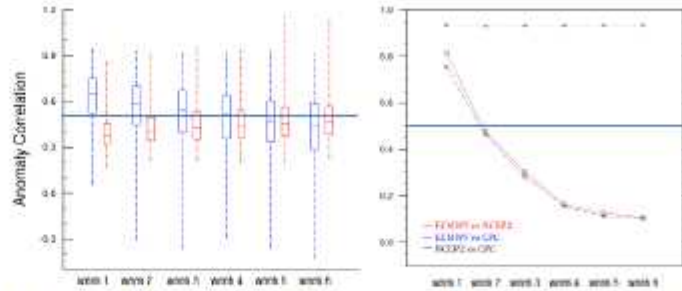


Figure 4. (Left) Skill of ECMWF at forecasting the SST anomalies over Nino3.4 region as a function of lead time during winter. The blue (red) line indicates PCC (RMSE). (Right) Skill of ECMWF at forecasting the AO index as a function of lead time during winter. The blue (red) line indicates TCC between ECMWF Hindcast and CPC AO Index (persistence forecast of observation of AO index). The black line refers to TCC between CPC AO Index and persistence forecast of observation of AO index.

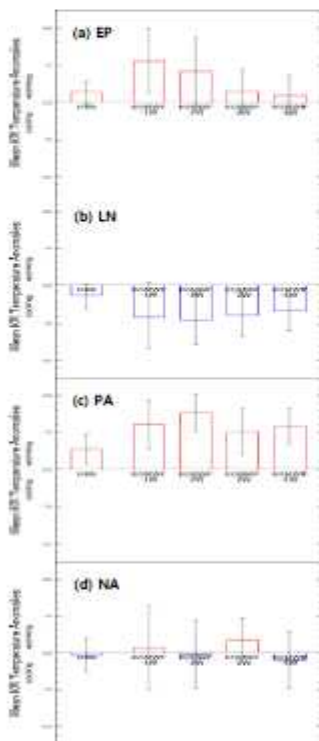


Figure 6. Mean 2m temperature anomalies from ECMWF Hindcast and ASOS data with standard errors.

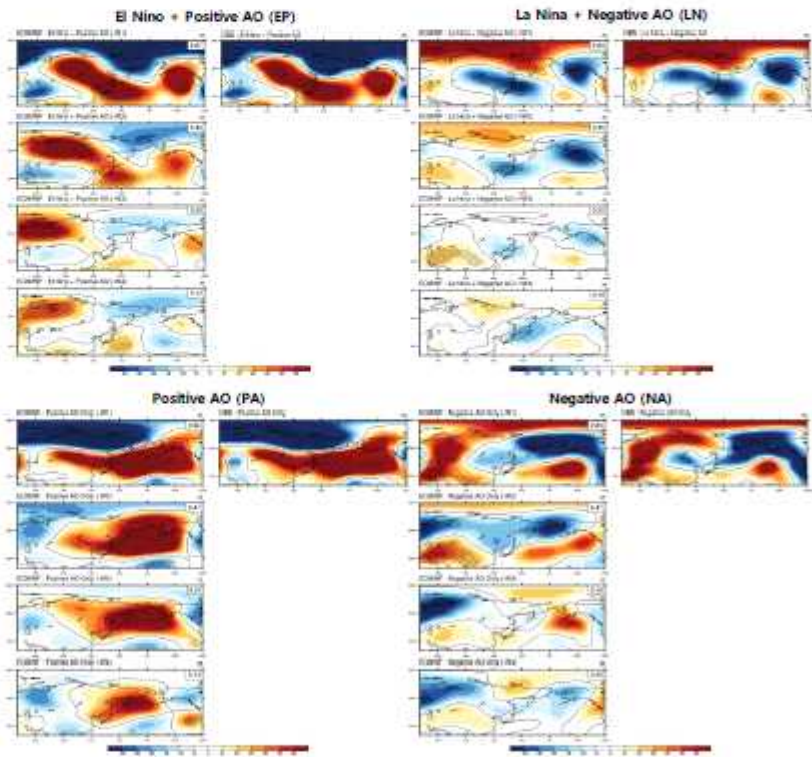


Figure 5. Skill of ECMWF at forecasting the geopotential height anomaly pattern at 500hPa over 20-90°N, 40°E-120°W. Numbers on the top right of the panels indicate the pattern correlations and the dotted area denotes 95% of confidence level.

- ✓ ECMWF S2S Hindcast에서 약 3주 전 예측까지 AO와 ENSO에 의한 대기순환장 패턴이 잘 나타나며 한반도 겨울철 기온이 잘 묘사됨.
- ✓ 계절 내 예측에서 AO와 ENSO를 함께 고려하는 경우가 AO를 단독으로 고려하는 경우 보다 높은 예측성을 나타냄.
- ✓ Negative AO일 때 한반도 계절 내 겨울철 기온 예측은 불확실성이 비교적 큼.

부록 C. WMO 장기에보 선도센터 계절예측에 사용된 검증 기법

1. 결정론적 예측의 검증

가. Anomaly Corelation Coefficient (ACC)

아노말리 상관계수 분석은 예측 변수별 3개월 예측을 월별 및 3개월 평균에 대해 각각 계산하여 표출된다. ACC 분석은 예측과 관측의 패턴 상관분석으로서 계산방법은 아래 Eq. 1과 같다.

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^N w_i (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N w_i (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^N w_i (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

여기서 F는 예측값, O는 관측값을 의미하며 \bar{F} 와 \bar{O} 는 각각 예측값과 관측 값에 대한 시간평균을 나타낸다. ACC는 예측장과 관측장 사이의 패턴이 얼마나 유사한지 측정하는 척도로 -1~+1 사이의 값을 갖으며, 만약 ACC가 +1이라면 예측 결과가 정확함을 의미한다.

나. Root Mean Square Error (RMSE)

평균제곱근오차(RMSE)는 예측장과 관측장 사이의 오차를 나타내는 척도로, 아래 Eq. 2와 같이 예측값이 관측 값으로부터 갖는 오차를 곱하여 평균한 평균제곱오차를 제곱근으로 표현하며 예보의 정확성을 살펴보는 척도로 사용된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i (F_i - O_i)^2} \quad (2)$$

이 식에서 F는 예측값, O는 관측 값, w_i 는 위도별 가중치, W는 w 의 합을 나타내며 i 는 각 격자점을 의미한다. 만약 예측 결과가 정확할 경우 RMSE는 0이다.

다. Mean Square Skill Score (MSSS)

Mean Square Skill Score는 예측장과 관측장 사이의 변동성 오차, 예측장 자체의 오차, 예측장과 관측장 사이의 계통적 오차를 나타내는 척도이다. 예측값이 실제 관측 값으로부터 갖는 오차 특성을 종합적으로 파악할 수 있는 지표로 MSSS의 각 격자 값으로 정확도의 분포를 파악하거나 영역 평균의 시계열을 통해 정확도의 추이를 이해할 수 있고 $-\infty$ 부터 +1까지의 값을 가질 수 있다. MSSS의 값이 1에 가까울수록 예측성이 뛰어난을 의미한다.

MSSS의 계산은 다음과 같은 절차를 통해 구해진다. x_{ij} 와 f_{ij} 는 격자 j의 관측 값과 결정론적

예측값에 대한 i번째의 시계열을 뜻한다. 격자점 j에 대한 over bar는 각 격자점에 대해서 총 예보기간(n개의 시계열)에 대한 시간평균을 의미한다. x_{ij} 와 f_{ij} 의 분산은 각각 아래 Eq. 3, 4와 같이 계산되고

$$S_{xj}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (3)$$

$$S_{fj}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{f}_j)^2 \quad (4)$$

격자점 j에 대한 MSEj와 MSEcj는 각각 아래와 같이 계산된다.

$$MSE_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - x_{ij})^2, \quad MSE_{cj} = \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 S_{xj}^2 \quad (5)$$

MSEj는 각 격자에 대한 시계열 예보 자료와 관측 값의 차이를 제공하여 평균한 것이며 MSEcj는 기후값을 예측값으로 사용할 경우 기후값 예측에 대한 mean square error를 의미한다. MSSSj는 MSEj와 MSEcj를 이용하여 아래와 같은 식으로 계산된다.

$$MSSS_j = 1 - \frac{MSE_j}{MSE_{cj}} \quad (6)$$

MSSSj는 각 격자에 대한 검증 값을 의미하므로 그 분포를 통해 모형의 지역별 예측 정확도 특성을 파악 할 수 있다.

또한 MSSS는 위상오차(Anomaly Correlation), 진폭 오차(Amplitude Error) 및 바이어스 오차(Bias Error)를 포함하는 개념이며 이는 각각 아래의 식의 첫 3개항에 해당된다.

$$MSSS = \frac{\left\{ 2 \frac{S_{fj}}{S_{xj}} r_{fxj} - \left(\frac{S_{fj}}{S_{xj}} \right)^2 - \left(\frac{[\bar{f}_j - \bar{x}_j]}{S_{xj}} \right)^2 + \frac{2n-1}{(n-1)^2} \right\}}{\left\{ 1 + \frac{2n-1}{(n-1)^2} \right\}} \quad (7)$$

$$r_{fxj} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{f}_j)(x_{ij} - \bar{x}_j)}{S_{fj} S_{xj}} \quad (8)$$

위상오차는 분포 패턴의 상관도를 나타내며 진폭오차는 관측분산에 대한 예측분산의 비율로 표시하며 바이어스 오차는 예측값과 관측 값의 시간 평균의 차이를 나타낸다.

라. Gerrity Skill Score (GSS)

Gerrity Skill Score는 3분위 예보와 같은 카테고리 예보에서의 예측성 정도를 나타낸다. 3분위 예보의 판정분할표(contingency table)는 Table C1과 같고 여기에 나타난 각 분위별 예보와 관측의 일치 사례수를 고려하여 GSS를 계산한다.

Table C1. 3x3 contingency table.

		Forecast			
		Below	Near	Above	Total
Observation	Below	n11	n21	n31	n • 1
	Near	n12	n22	n32	n • 2
	Above	n13	n23	n33	n • 3
	Total	n1•	n2 •	n3 •	N

우선 각 카테고리에 대한 예보와 관측을 f_i 와 x_i 라 두고 n_{ij} 는 예보 I와 관측 j 카테고리에 해당되는 수를 의미한다. 각 카테고리별 빈도수의 확률을

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{N} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있으며 예보와 관측의 각 카테고리에 대한 확률 분포는 각각

$$p(f_i) = \sum_{j=1}^3 p_{ij} = \hat{p}_i ; i = 1, \dots, 3 \quad (10)$$

$$p(x_i) = \sum_{j=1}^3 p_{ji} = \hat{p}_i ; i = 1, \dots, 3 \quad (11)$$

이다. 여기서 GSS의 계산은 다음과 같다.

$$GSS = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P_{ij} S_{ij} \quad (12)$$

$$S_{ii} = \frac{1}{2} \left(\sum_{r=1}^{i-1} a_r^{-1} + \sum_{r=1}^2 a_r \right)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\sum_{r=1}^{i-1} a_r^{-1} - (j-1) + \sum_{r=j}^2 a_r \right] \quad (1 \leq i < 3, i < j \leq 3)$$

$$a_i = \left(1 - \sum_{r=1}^i p_r \right) / \left(\sum_{r=1}^i p_r \right)$$

2. 확률론적 예측의 검증

가. ROC Curve 및 Score

ROC는 Hit rate (HR)와 False alarm rate (FAR) 사이의 분포를 각 확률구간별로 계산하여 한 그래프에 곡선으로 나타낸 것으로 예보 오차에 민감하지 않기 때문에 신뢰도와는 무관하다.

Table C2. 2x2 contingency table.

$HR = H/(H+M)$ $FAR = F/(F+R)$		Observed	
		Yes	No
Forecast	Yes	Hit (H)	False (F)
	No	Missing (M)	correct Rejection (R)

Table B2는 적중률(Hit Rate)과 비적중률(False alarm rate)에 대한 분할 표 (Contingency table)이다. ROC는 0~1의 값을 가지고, 완벽한 예보 일 때 HR=1, FAR=0, M(missing)=0, F(false)=0 값을 가진다. ROC 곡선은 HR과 FAR 사이의 분포도로 각 확률 구간별로 두 값을 계산하여 한 그래프에 곡선으로 나타낸다. HR=1이고 FAR=0일 때가 완벽한 예보이므로 ROC 곡선이 좌측 상단으로 가까이 위치할수록 예보의 수행 능력이 좋다고 할 수 있다. 대각선은 skill 유무의 경계선으로 대각선 아래쪽으로 ROC 곡선이 위치하면 FAR가 HR보다 커지므로 예보 수행 능력이 떨어짐을 의미하고 곡선이 대각선상에 위치하면 각 예보 확률별로 HR와 FAR가 동일하므로 예보 능력이 없다고 판단한다. ROC는 곡선 아래의 면적을 구하여 예측성의 정도로 사용하며 이를 ROC score라고 하고, 완벽한 예보일 경우 ROC score는 1이고, 예보의 기술이 없을 경우의 ROC score는 0.5이다.

나. Reliability Diagram

Reliability Diagram은 예보의 신뢰도를 측정하는 척도로 각각의 카테고리 분류된 예보확률과 실제로 이벤트가 발생한 빈도를 측정하여 신뢰성을 측정한다. 다시 말해 주어진 예보 확률이 실제로 얼마나 자주 일어나는 가를 알아보는 것이다. 확률 예보를 하기 위해서는 예보 시스템의 신뢰도가 보장되어야 한다. 하지만 신뢰도가 좋다고 해서 반드시 예보의 정확도가 좋아지는 것은 아니다. 완벽한 예보일 때 신뢰도는 0의 값을 갖는다. 신뢰도 그림(Reliability Diagram)의 가로축은 예보 확률 카테고리(0.0~1.0)이며, 세로축은 각 카테고리별 실제 관측된 이벤트의 확률이다. 막대그래프는 예보 확률 카테고리 내에서 집계된 전체 예보 확률 수에 대한 각각의 예보 확률 카테고리에서 집계된 확률 수의 비이다. 대각선에 가까울수록 완벽한 예측성에 가깝고, 대각선보다 위쪽에 나타나는 경우에는 과대예측 한 것이고 대각선보다 아래쪽에 나타나는 경우에는 과소예측 한 것이다.

다. Brier Score(BS)와 Brier Skill Score(BSS)

Brier score는 확률 예보의 정확도의 척도로 가장 널리 사용되는 지수이다. BS는 아래의 식과 같이 확률 오차를 제공하여 평균한 수치로 1) 신뢰도(Reliability), 2) 판별력(Resolution), 3) 불확실성(uncertainty)의 3가지 향으로 이루어진다. BS의 범위는 0에서 1이다. 만약 예보가 완벽하다면 0의 값을 가지며, 예보의 정확성이 낮을수록 큰 값을 갖는다. 신뢰도는 값이 작을수록 좋고 판별력은 값이 클수록 좋다. 불확실성은 항상 양의 값을 가지며 이 향의 영향을 완전히 제거한다는 것은 거의 불가능하다.

$$Brier\ Score(BS) = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^I N_i (y_i - \bar{o}_i)^2 - \frac{1}{n} \sum_{k=i}^I N_i (\bar{o}_i - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o}) \quad (13)$$

위 식에서 i 는 확률예측카테고리(0.0~1.0=0~100%), n 은 전체 이벤트 수, N_i 는 각 예측 확률 카테고리별 예보 수, y_i 는 각 예측 확률 카테고리, \bar{o}_i 는 각 예측 확률 카테고리별 실제 관측된 이벤트의 빈도, \bar{o} 는 전체 확률 카테고리에서 관측된 이벤트의 빈도를 나타낸다.

Brier Skill Score는 아래와 같이 구할 수 있으며

$$Brier\ Skill\ Score(BSS) = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (14)$$

여기서 BS_{ref} 는 예측변수의 기후학적 확률을 의미하고 이는 Resolution과 Reliability의 차이에 대한 Uncertainty의 비로 다시 나타낼 수 있다. 예보한 이벤트가 실제로 일어날 것인가에 대해서 예측의 기후학적 확률의 상대적인 능력을 알 수 있다. BSS 값은 $-\infty$ 에서 1까지의 범위를 가질 수 있으며 0이면 예보 능력이 없음을 의미한다.

부록 D. 개인정보처리시스템 접근권한 관리 기준

1. 접근권한 관리 기준 수립 목적

- 가. WMO 장기예보 선도센터이용 회원가입자의 개인정보 분실·도난·유출·위조·변조 또는 훼손을 방지하기 위해 접근권한 관리 기준을 마련하여 시스템 관리체계 강화
- 나. 접근권한은 개인정보처리시스템에 접근하여 개인정보를 열람, 기록, 정정, 삭제, 저장(다운로드), 출력 등을 수행할 수 있는 권한을 말함

2. 접근권한 관리체계 및 주요 역할

구 분	책임 및 주요 역할	비 고
접근권한 관리책임자	「WMO 장기예보 선도센터」의 접근권한 관리·운영 업무의 총괄 개인정보처리시스템 접근권한 부여·변경·말소 여부의 심사 및 승인 처리 개인정보처리시스템 접근권한 관리 기록의 점검 결과 확인 개인정보처리시스템 접근권한 운영담당자 지정·운영 * APEC기후센터의「WMO 장기예보 선도센터」접근권한 관리·운영 책임자·담당자 지정(변경) 시 기상청 기후예측과에 문서로 보고(월 운영현황 보고로 같음)	기후분석과 과장
접근권한 관리담당자	시스템 사용자 본인확인 및 접근권한 요청 건 타당성 검토 개인정보처리시스템 접근권한 부여·변경·말소 내 수기로 기록 개인정보처리시스템 접근권한 관리 기록은 최소 3년간 보관·관리 개인정보처리시스템 접근권한 관리 기준 이행 여부를 반기별 1회 이상 점검 실시 후 그 결과를 기상청 기후예측과에 보고 * 6월, 12월 점검보고 시 [별표2] 추가하여 보고	담당자/ 기후분석과

3. 접근권한 부여·말소 기준

- 가. 업무수행 목적에 따라 업무담당자별 차등 접근권한 부여(변경)

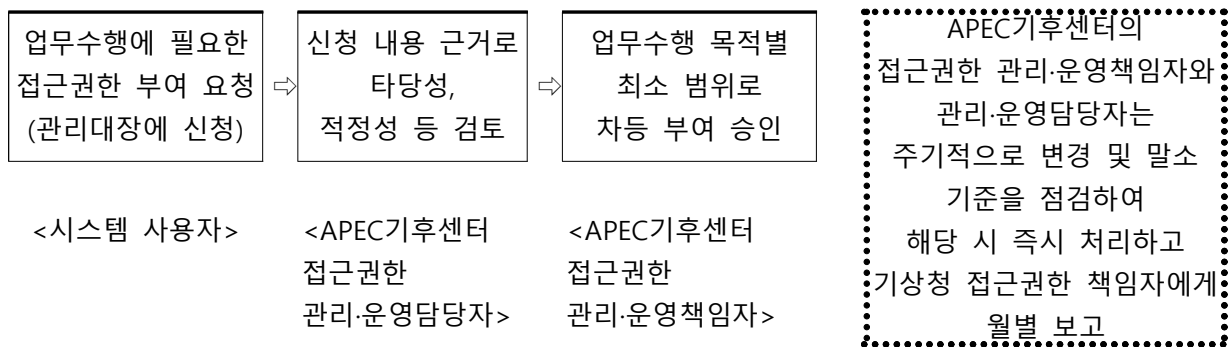
수행업무	접근권한 부여(변경) 범위	비고
관리 및 운영 총괄	열람, 등록, 정정, 삭제, 저장(다운로드) 등 전체 권한	기후분석과장
시스템 관리	열람, 등록, 정정, 삭제	기후분석과 1인
시스템 운영 및 개발	열람, 등록, 정정, 삭제	예측운영과 1인
시스템 유지관리	열람	유지관리업체1인

나. 접근권한 관리·운영책임자는 다음 사항에 대해서 말소 처리

- 전보 또는 퇴직 등 인사이동으로 변동 시 즉시 말소
- 시스템 유지보수관리 등 임시 부여한 접근권한은 업무 수행 목적 달성 즉시 말소

4. 접근권한 부여·변경·말소 절차 및 방법

가. 개인정보처리시스템 접근권한 요청·부여 절차



나. 접근권한 변경 및 말소

- 인사이동에 따른 담당자 변경(사무분장 변경, 전보, 퇴직 등) 시 즉시 시스템에서 접근권한 해지 처리하고 그 내역은 접근권한 책임자가 확인
- 시스템 개선 또는 유지보수 등을 위해 임시 부여한 접근권한은 목적 상실 즉시 해지

다. 접근권한 부여·변경·말소 역은 반기별 접근권한 관리책임자에게 보고(월

운영현황 보고로 같음)

5. 그 외 접근권한 주요 사항

- 가. 그 외 「WMO 장기예보 선도센터(www.wmolc.org)」 홈페이지 접근권한 관리와 관련한 모든 사항은 「WMO 장기예보 선도센터」의 개인정보처리시스템 접근권한 관리 기준(기상청 기후예측과)을 따른다.
- 나. 접근권한의 안전성 확보 조치는 개인정보 보호 관련 규정에 따라 준수

부록 E. WMO 장기예보 선도센터 만족도 조사 설문 문항 및 결과

□ 배경 및 목적

- 목 적 : WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자 의견 및 요구사항을 수렴하여 객관적 서비스 수준 진단과 개선으로 실용적·효율적 서비스를 제공하기 위함.
- 기 간 : 2019. 9. 1~11. 30 (총 3개월)
- 대 상 : WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자 (비회원 포함)
- 방 법 : WMO 장기예보 선도센터 홈페이지의 팝업창을 통한 전자 설문
- 향 목 : 홈페이지 서비스 종합만족도 (9문항) <상세내용 : 붙임 참조>
- 평 가 : '종합만족도' 항목을 7점 척도로 측정 후 100점 기준으로 환산

□ 설문 문항

Thank you for using our WMO LC-LRFMME website.

The LC-LRFMME is jointly organized and operated by the Korea Meteorological Administration (KMA) and NOAA/NCEP. It provides high-quality climate prediction products and develops advanced climate prediction technology, which is contributing to the reduction of the adverse impacts of abnormal climate.

(팝업용) As a part of our ongoing efforts to provide better services, we are conducting a simple survey on our website. In this regard, we would appreciate it if you can take a few moments to fill in the survey form below.

(이메일 발신용) As a part of our ongoing efforts to provide better services, we are conducting a simple survey on our website. In this regard, we would appreciate it if you would take a few moments to visit our website (www.wmolc.org) and fill in the survey form.

Q1. Are you a member of our WMO LC-LRFMME website?

- 1) Yes 2) No

Q2. Which organisation do you belong to/which organisation are you involved in?

(select all that apply)

- 1) WMO Global Producing Centres (GPCs) for Long Range Forecasts (LRF)
- 2) National Hydrological and Meteorological Services (NHMS)
- 3) WMO Regional Climate Centre (RCC)
- 4) Regional Climate Outlook Forum (RCOF)
- 5) Other associated organisation (please provide details) _____

Q3. How often do you visit our website?

- 1) more than 12 times a year (at least once a month)
- 2) 4~12 times (at least once a season)
- 3) 1~3 times (at least once a year)
- 4) once in a while

Q4. What is your major purpose of using the forecast information from the WMO LC-LRFMME?

- 1) use as essential information for operational long range forecast
- 2) use as reference information for operational long range forecast
- 3) use for research data for long range forecast
- 4) others (please describe) _____

Q5. Which data do you prefer from WMO LC-LRFMME? (select all that apply for each item)

- 1) data type
 - forecast hindcast verification
- 2) data form
 - digital data graphic climate indices
- 3) data format
 - GRIB1 GRIB2 NetCDF
- 4) prediction model
 - individual forecast DMME PMME
- 5) prediction period
 - 1-month prediction 3-month prediction 6-month prediction
- 6) variable
 - 2m temperature precipitation 500hPa GPH
 - 850hPa temperature mean sea level pressure sea surface temperature

Q6. Overall, how satisfied have you been with the WMO LC-LRFMME website? Please rate it.

7	6	5	4	3	2	1
very satisfactory			neutral			very unsatisfactory

Q7. Which item(s) do you think need to be improved in WMO LC-LRFMME? (select all that apply)

- 1) increase in temporal resolution
[Example: subseasonal prediction (2 weeks to 2 months, weekly), etc.]
- 2) increase in spatial resolution [Example: $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ} \rightarrow 1^{\circ} \times 1^{\circ}$]
- 3) improvement of service speed [Example: data downloading, plotting, etc.]
- 4) update of user guide
- 5) others (please provide details) _____

Q8. Which variable(s) would you like to be added to WMO LC-LRFMME? (select all that apply)

※ current available variables : 2m temp., precipitation, 500hPa GPH, 850hPa temp., mean sea level pressure, sea surface temperature

- 1) 200hPa GPH

- 2) 850hPa GPH
- 3) 500hPa temperature
- 4) 850hPa wind
- 5) 200hPa wind
- 6) other (please provide details) _____

Q9. (optional) Do you have any suggestions for improvements of the WMO LC-LRFMME homepage or any other comments? If you have any ideas, please describe in detail.

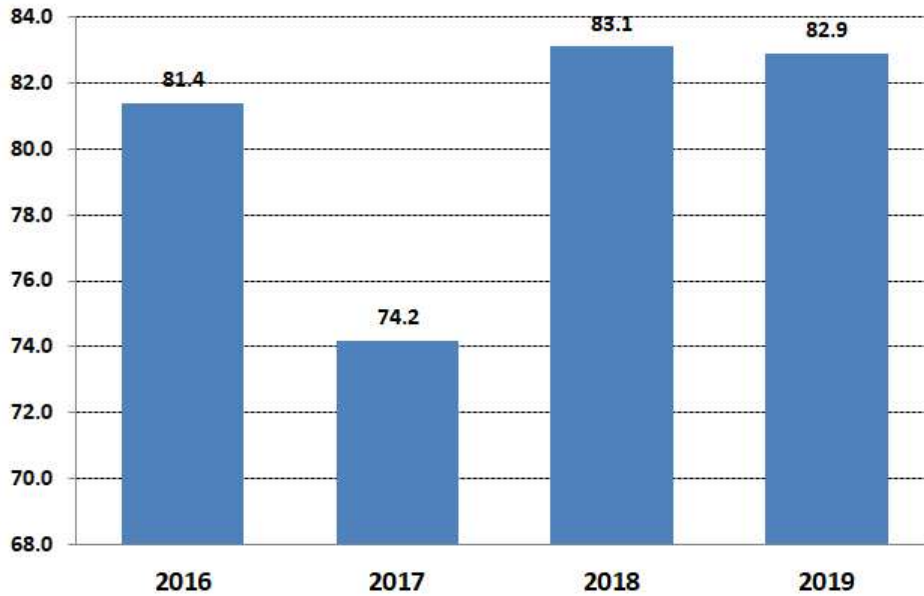
<Thank you for participating in the survey. Please let us know if you have any additional questions or comments.
lc_lrfmme@korea.kr>

□ 조사 총평

○ 총 만족도

- 5.80점 (7점 만점)

- 100점 만점으로 환산하면 82.9점으로 2018년 (83.1점)과 동일한 만족도를 보임.



□ 세부 결과

○ 만족도 조사 참여자의 회원가입 여부

- WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자 142명이 설문에 참여하였으며, 2018년 만족도 참여 사용자 (146명)와 거의 유사함.

- 설문 참여자 142명 중 96명 (67.6%)은 홈페이지 가입자이며, 46명 (32.4%)은 미가입자로 나타남. 2018년에 비해 홈페이지 가입자의 설문 참가 비율 (56%)이 약 10% 가량 증가함.

※ 2018, 2019년 서비스 만족도 조사는 회원/비회원 모두를 대상으로 실시하여 이전 년도와의 절대적인 비교는 어려움

표 75. 2016~2018년 만족도 조사 참여자 비교

	총 회원 수	참여자 수	참여율 (%)	홈페이지 회원 가입 여부
2016년(A)	314	70	22.3%	<p>A 3D pie chart showing the results of a survey on homepage membership. The chart is divided into two segments: a large blue segment representing 'Yes' at 67.6%, and a smaller red segment representing 'No' at 34.4%. A legend at the bottom right identifies the blue color with 'Yes' and the red color with 'No'.</p>
2017년(B)	362	53	14.6%	
2018년(C)	388	146	-	
2018년(D)	407	142	-	
편차(D-C)	-	▽4	-	

○ 소속 (중복선택 가능)

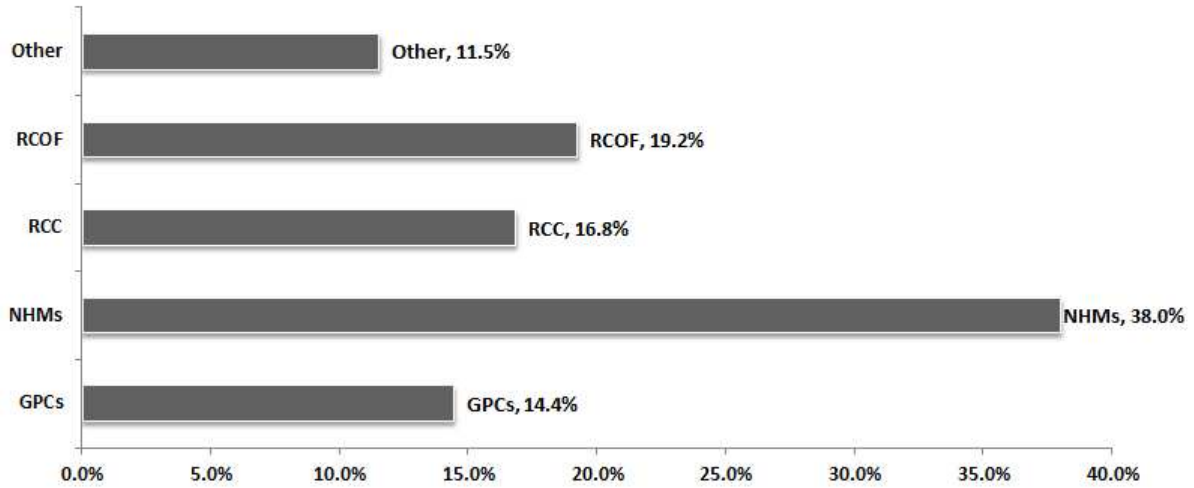
- NHMS에 소속된 참여자가 전체 중 38.0%를 차지하고, 그 다음으로는 GPC가 14.4%, RCC와 RCOF 관련 참여자가 각 16.8%, 19.2%를 차지했으며, 기타 기관 참여자는 11.5%로 집계됨.

- 기타 기관은 아래와 같음

1) University, WMO (World Meteorological Organization, 세계기상기구), Research Center, Weather company, WFP (World Food Programme, 유엔세계식량계획), Bank 등등

구분	인원(명)	비율(%)
WMO Global Producing Centres(GPCs) for Long Range Forecasts(LRF)	30	14.4
National Hydrological and Meteorological Services(NHMS)	79	38
WMO Regional Climate Centre(RCC)	35	16.8
Regional Climate Outlook Forum(RCOF)	40	19.2
기타	24	11.5

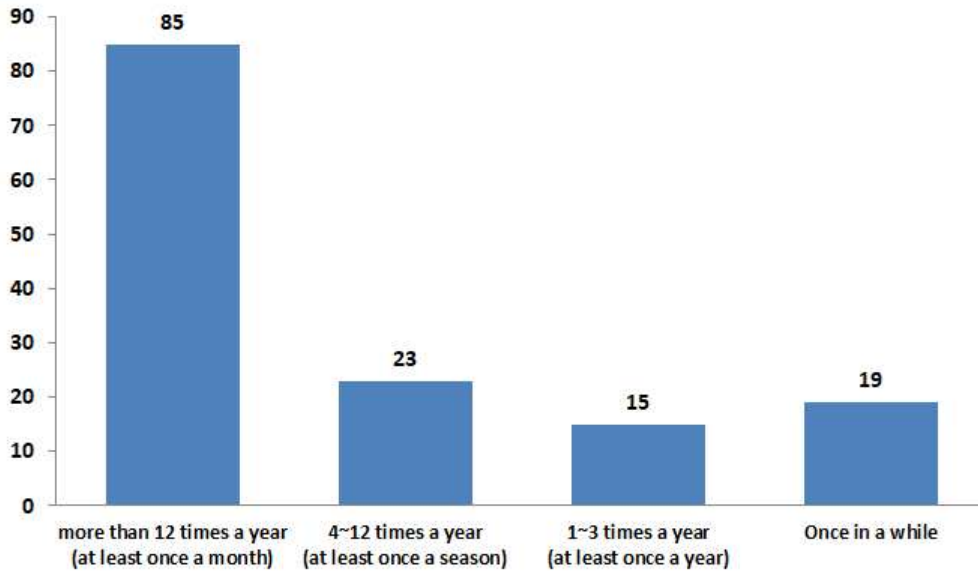
Organisation of survey participants



○ 홈페이지 방문 주기 (중복선택 불가)

- WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 얼마나 자주 방문하는가에 대한 답변으로 한달에 한번 이상 방문한다는 답변이 59.9%로 가장 많은 비율을 차지하였으며, 계절별로 한번정도 접속하는 회원은 16.2%, 가끔 접속하는 회원은 13.4%, 1년에 한번 정도 방문하는 회원은 10.6%임.
- WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 계절 또는 한 달에 한번 이상 방문한다고 응답한 비율은 전체 설문 참여자 중 약 76.1%를 차지함. 2018년 설문 참여자의 약 70%가 계절 또는 한 달에 한번 이상 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지를 방문하다고 응답한 것에 비해 홈페이지 방문 주기가 짧아짐.

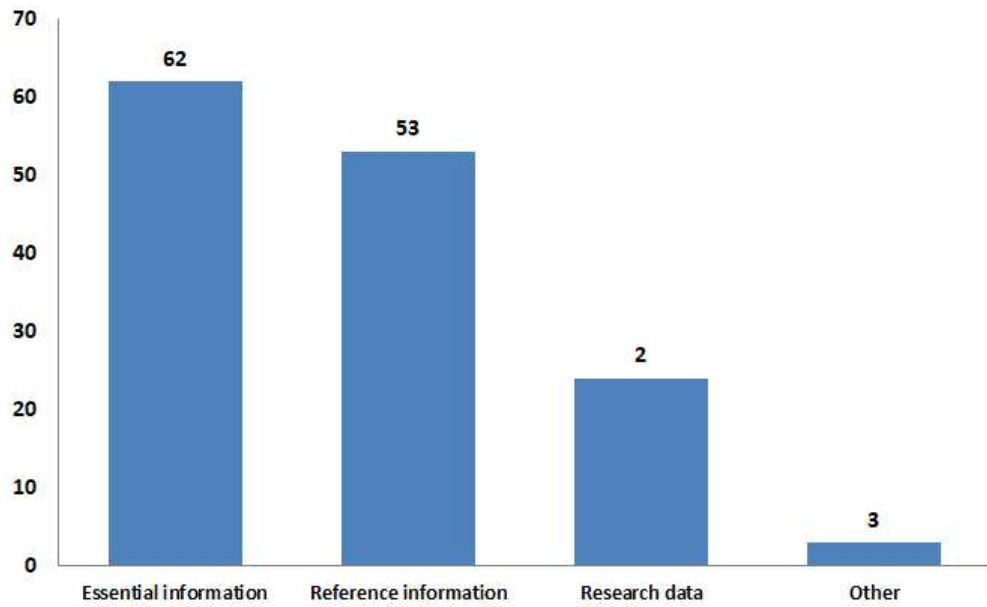
구분	인원(명)	비율(%)
more than 12/year (at least once a month)	85	59.9
4~12/year (at least once a season)	23	16.2
1~3/year (at least once a year)	15	10.6
once in a while	19	13.4



○ 자료 사용 목적 (중복선택 불가)

- WMO 장기예보 선도센터에서 생산하는 자료를 현업 장기예보에 필수자료로 사용한다고 응답한 설문 참여자는 43.7%를 차지했고, 그 다음으로는 현업 장기예보 참고자료로 37.3%, 연구 자료로는 16.9%, 기타 목적으로 활용하는 설문 참여자는 2.11%를 차지함. 전체의 81%가 WMO 장기예보 선도센터 자료를 현업 장기예보에 직·간접적으로 사용하는 것으로 나타남.
- 기타로는 1) 모니터링과 다 기관 자료 비교 2) 연구와 현업 자료 생산을 위한 참고 자료 등에 WMO 장기예보 선도 센터 자료가 사용되고 있음.

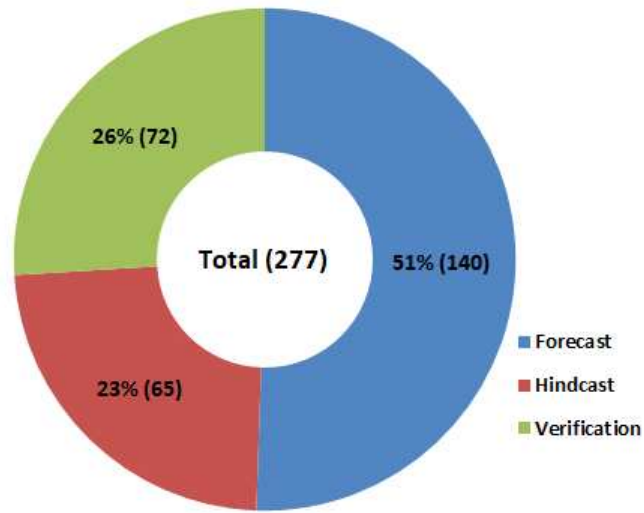
구분	인원(명)	비율(%)
essential information of operational long range forecast	62	43.7
reference information of operational long range forecast	53	37.3
research data on long range forecast	24	16.9
기타	3	2.11



○ 선호하는 자료 종류 (중복선택 가능)

- WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자들은 forecast 자료를 가장 선호 (50.5%)하고 다음으로 verification 자료 (26.0%), hindcast 자료 (23.5%) 순으로 선호함.

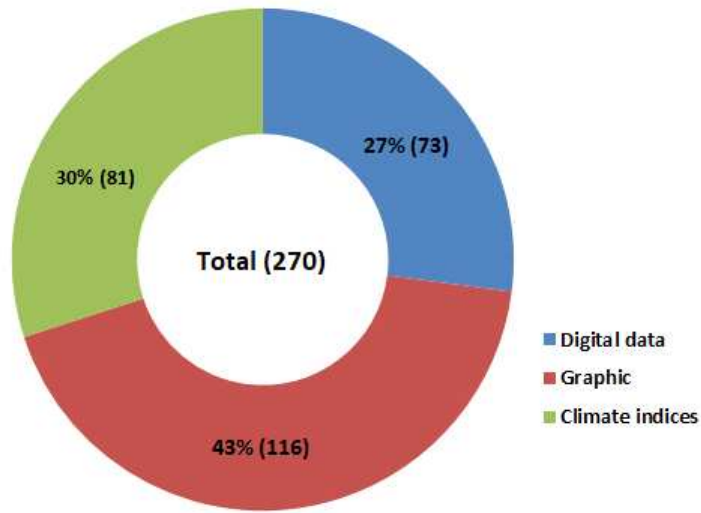
구분	인원(명)	비율(%)
forecast	140	50.5
hindcast	65	23.5
verification	72	26.0



○ 선호하는 자료 유형(중복선택 가능)

- WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 이용자들은 graphic 유형의 자료를 가장 선호 (43.0%)하고 두 번째로는 기후지수 유형 자료 (30.0%), 마지막으로 digital 유형 자료 (27.5%)를 선호함.
- 2018년 자료 유형의 선호도가 graphic 유형의 자료, digital 유형 자료, 기후지수 유형 자료 순 이었던 것과 달리 기후지수 유형의 자료 선호도가 상승함.

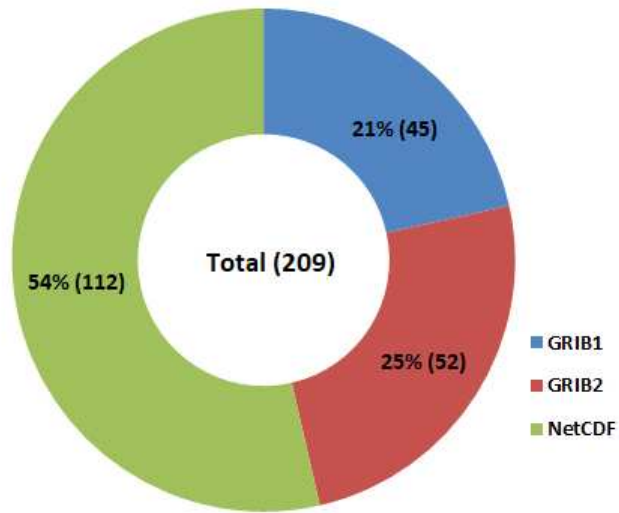
구분	인원(명)	비율(%)
digital data	73	27.0
graphic	116	43.0
climate indices	81	30.0



○ 선호하는 자료 포맷 (중복선택 가능)

- WMO 장기예보 선도 센터 홈페이지 서비스 만족도 조사 설문 참여자 중 약 53.6%가 NetCDF 형태의 자료를 가장 선호하고, GRIB1 (21.5%), GRIB2(24.9%) 순으로 선호함.

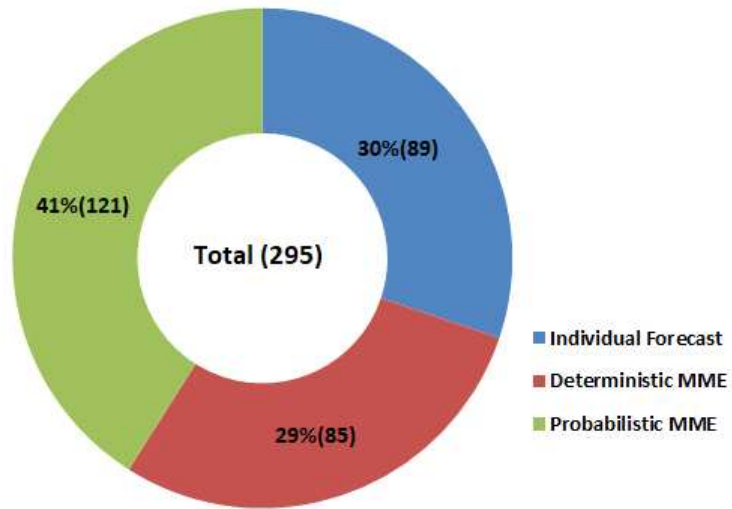
구분	인원(명)	비율(%)
GRIB1	45	21.5
GRIB2	52	24.9
NetCDF	112	53.6



○ 선호하는 예측 유형 (중복선택 가능)

- 가장 많은 41.0%의 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 이용자가 PMME 예측 자료를 선호했고, 개별모형자료와 DMME 자료는 각각 30.2%, 28.8%의 선호도를 보임.

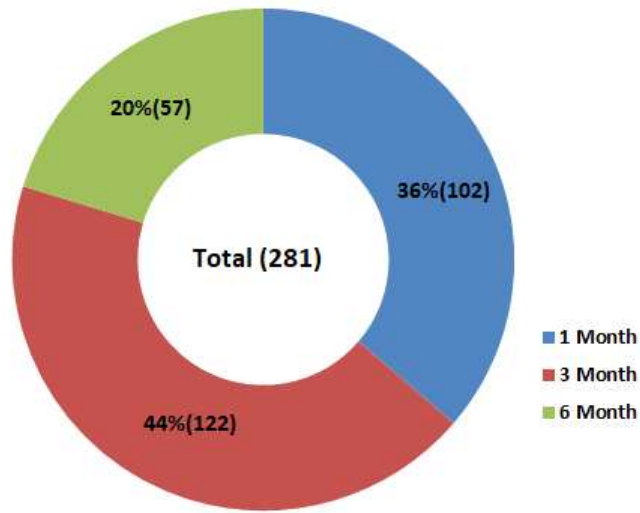
구분	인원(명)	비율(%)
individual forecast	89	30.2
Deterministic MME	85	28.8
Probabilistic MME	121	41.0



○ 선호하는 예측 기간 (중복선택 가능)

- 각각 43.4%, 36.3%의 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자가 3개월 예측자료와 1개월 예측자료를 가장 선호했고, 나머지 20.3%는 6개월 예측자료를 선호함.

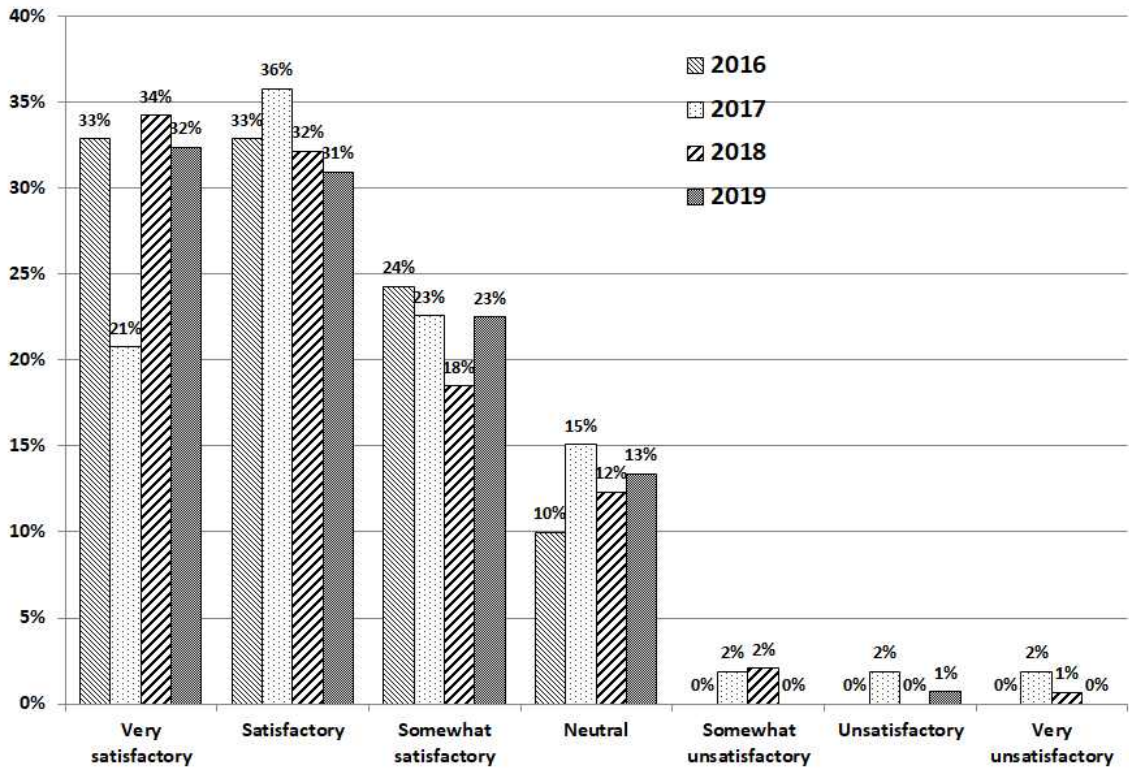
구분	인원(명)	비율(%)
1-month	102	36.3
3-month	122	43.4
6-month	57	20.3



○ 만족도 (중복선택 불가)

- WMO 장기예보 선도센터의 서비스에 각각 32.4%, 31.0%, 22.5%, 19.4%의 사용자들이 매우만족, 만족, 약간만족, 보통 순으로 만족함. 86%의 사용자들이 긍정적인 반응 (약간만족~매우만족)을 보임. 2018년에 비해 긍정적인 반응(약간만족~매우만족)이 약1.1% 증가함.

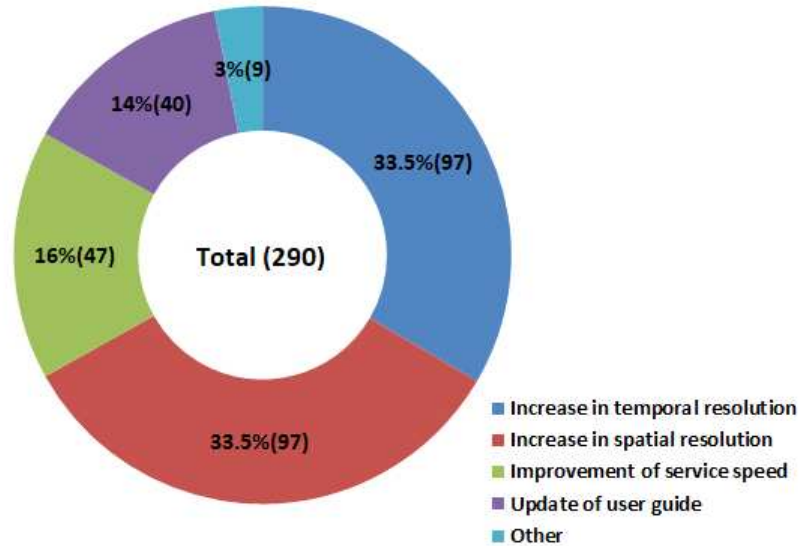
구분(점수)	2016년		2017년		2018년		2019년	
	인원(명)	비율(%)	인원(명)	비율(%)	인원(명)	비율(%)	인원(명)	비율(%)
매우만족(7)	23	32.9	11	20.8	50	34.2	46	32.4
만족(6)	23	32.9	19	35.8	47	32.2	44	31.0
약간만족(5)	17	24.3	12	22.6	27	18.5	32	22.5
보통(4)	7	10.0	8	15.1	18	12.3	19	13.4
약간불만족(3)	0	0.0	1	1.9	3	2.1	0	0
불만족(2)	0	0.0	1	1.9	0	0.0	1	0.7
매우불만족(1)	0	0.0	1	1.9	1	0.7	0	0



○ 개선점 (중복선택 가능)

- WMO 장기예보 선도센터에서 개선되었으면 하는 부분은 시간해상도 증가와 공간해상도 증가가 각각 33.4%와 34.4%로 가장 높은 비율을 차지했고, 그 다음으로는 서비스 속도 증가가 16.2%, 사용자가이드 업데이트가 13.8%를 차지함.
- 2018년과 동일하게 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자는 WMO 장기예보 선도센터 홈페이지에서 시간해상도와 공간해상도 증가를 가장 개선되었으면 하는 부분으로 꼽았음.
- 3.1%의 기타의견은 다음과 같음

구분	인원(명)	비율(%)
시간해상도 증가	97	33.4
공간해상도 증가	97	34.4
서비스속도 증가	47	16.2
사용자가이드 업데이트	40	13.8
기타	9	3.1



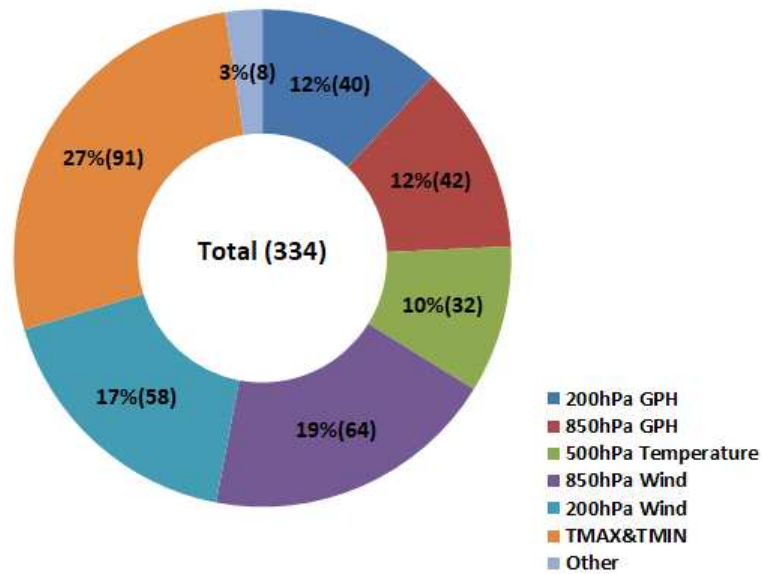
○ 추가적인 변수 (중복선택 가능)

- WMO 장기예보 선도센터 홈페이지 사용자들이 추가 제공해주기를 바라는 변수는 Maximum & Minimum Temperature, 850 hPa 바람이 27.2%, 19.2%로 가장 높은 비율을 차지함. 이어서 200hPa 바람, 850 hPa 지위고도 그리고 200 hPa 지위고도가 각각 17.4%, 12.3%, 12.0%로 그 뒤를 이었고, 500 hPa Temperature가 9.6%를 차지함.

- 8.0%의 기타의견은 아래와 같음.

- 1) Velocity Potential Anomaly at 200hpa-800hpa
- 2) Wind speed and gust, runoff, radiation
- 3) Stability index
- 4) Stream function & velocity potential
- 5) Divergence & potential velocity

구분	인원(명)	비율(%)
Z200	40	12.0
Z850	41	12.3
T500	32	9.6
U850	64	19.2
U200	58	17.4
TMAX a& TMIN	91	27.2
기타	8	2.4



○ 추가 의견(선택문항)

- If possible to allow the access free for all information
- comparing to results of other organizations on the same webpage
- NO, That I think good
- Pinpoint seasonal forecast (user a friendly user interface as google map)
- Good work, add administrative boundaries
- good for our reference
- Increase grid resolution develop region specific verification develop country specific verification
- The reference periods of the global data sets are not the same. Therefore, it is difficult to compare anomaly data with each other. It would be useful to prepare the anomaly data for the same reference period and/or to share the current dataset for the reference periods of the global dataset
- use of weighted multi model forecast according to the quality of models
- good reference for Long Range prediction