

상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템

Expert Seasonal Prediction System for Seasonal Outlook in Korea (ESPreSSO-KR)

김원무 기후연구팀, 여새림, 김유진 기후예측팀

발간사

갈수록 심각해지는 이상 기후 현상에 따른 사회·경제적 피해를 경감시키기 위해, 우리 센터에서는 신뢰도 높은 기후 예측 정보를 제공하고자 예측 성능 향상을 위한 기술 개발과 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 특히, 기후 변화와 함께 이상 기후 현상이 빈번해지는 상황에서 정확하고 믿을만한 계절 예측 정보를 제공하고 다방면으로 노력하고 있다. 이를 위해, 다중모형앙상블 기법을 이용한 역학적 계절 예측 정보를 제공하고 있으며, 보다 정확하고 신뢰도 높은 예측 정보 생산을 위해 매달 예보 토의/검증 회의를 거쳐 전문가의 검토를 거친 맞춤형 계절 예측 정보를 제공한다.

이 연구보고서는 다년도 연구의 1차년도 연구 성과를 담은 것으로, 「상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템: Expert Seasonal Prediction System for Seasonal Outlook in Korea (ESPreSSO-KR)」은 우리 센터가 보유한 여러 예측 기술을 통합적으로 활용하여 계절 예측의 정확도를 더욱 향상시키고자 하는 취지에서 기획되었다. 즉, 다중모형앙상블 기법을 이용한 역학적 계절 예측 정보를 기반으로, 상세화 기법을 응용하여 전문가의 지식과 경험을 활용한 최적의 계절 예측 정보를 제공하고자 하였다. 이를 통하여 예측 성능이 향상된 계절 예측 정보를 안정적으로 제공하고, 장기적으로 예측의 정확도 평가가 가능하도록 하며, 주요 기후 인자를 쉽게 파악할 수 있는 계절 예측 시스템을 구성하였다. 지난 한 해동안의 검증 결과, 기반 역학 모형에 비해 예측성이 크게 향상되고 안정적인 예측을 수행하고 있는 것을 확인하였다. 또한, 이 연구를 통해 정리된 전문가의 지식과 결과 표출 인터페이스 등이 새로운 연구에 직·간접적으로 활용될 예정으

로, 예측성뿐만 아니라 확장성 측면에서도 의의를 갖는다.

이 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 노력이 있었다. 무엇보다도 이 연구에 전문가로서 참여한 김유진, 여새림 박사의 역할이 EPreSSO의 예측 성능을 향상시키는 데 결정적이었다. 이 연구를 통하여 수 편의 논문을 작성하고 한 건의 특허를 출원하였는데, 이 과정에서 기여한 익명의 동료 연구자들에게도 감사드린다. 또한, 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 익명의 자문 위원과 평가자들에게도 깊은 감사를 표하는 바이다.

2018년 3월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

The Expert Seasonal Prediction System for Seasonal Outlook in Korea (ESPreSSO-KR) is developed to provide reliable seasonal prediction. It is a hybrid dynamical–statistical system that is based on the operational APEC Climate Center (APCC) Multi-Model Ensemble (MME) seasonal prediction. It further utilizes the MME and statistical downscaling techniques that APCC has elaborated, as well as the experts’ knowledge on the climate system in Korea and its manifestation in MME prediction system. The stability and the prediction skill of the operational ESPreSSO-KR is assessed for 2017, and ESPreSSO-KR shows stable improvement of prediction skill throughout the year.

목 차

1. INTRODUCTION	1
2. DATA AND METHODOLOGY	3
2.1 ESPreSSO의 기본 가정	3
2.2 모형의 구성 및 구동 단계	4
3. EXAMPLE: ESPRESSO-KR FOR SEPTEMBER TEMPERATURE	9
3.1 기본 가정 적합성 여부	9
3.2 기후 현상에 대한 고려 1: 기술적 부분	10
3.3 기후 현상에 대한 고려 2: 과학적 부분	14
4. RESEARCH RESULTS	18
4.1 ESPreSSO-KR의 예측 결과	18
4.2 ESPreSSO-KR의 예측 성능 평가 및 검증	31
4.3 프로젝트의 기타 성과물	34
5. CONCLUDING REMARKS	35

1. INTRODUCTION

기후 변화와 함께 이상 계절 현상이 빈번해지는 상황에서, 정확하고 믿을 만한 계절 예측 정보를 제공하는 것은 과학적 측면은 물론이고 사회-경제적으로도 중요한 문제다. 우리 센터(APCC; APEC Climate Center)에서는 이러한 사회적 요구에 발맞춰 역학 계절 예측(dynamical seasonal prediction) 모형에 기반한 다중 모형 앙상블(MME; Multi-Model Ensemble) 기법을 이용하여 신뢰도 높은 기후 예측 정보를 생산하고 있다. 그러나 역학 모형의 예측 결과는 낮은 공간 해상도와 계통적 편이(systematic bias) 등의 문제를 안고 있어, 모형 예측 결과를 직접적으로 신뢰하고 사용하기는 어려운 실정이다. 우리 센터에서는 전자의 문제에 대응하기 위해서 다양한 역학/통계적 상세화 기법을 개발하여 적용하고 있으며, 후자의 문제를 해결하기 위해서는 다중 모형 앙상블 기법을 개발/도입하여 모형내/모형간 편이에서 기인한 오보를 최소화하고 있다. 개별 예측 모형은 구성 요소에 포함된 모수화 과정이나 모형의 특성에 따라 오차를 가지게 되고 이로 인해 예측 성능이 떨어질 수밖에 없는데, 다중 모형 앙상블 기법을 통하여 개별 예측 모형 사이에서 나타나는 불일치를 상쇄하여 보다 신뢰도 높은 계절 예측 결과를 생산할 수 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 모든 문제가 해결되지는 않으며, 보다 정확한 계절 기후 예측을 위하여 매달 예보 토의 및 기후 검증 회의를 소집하여 전문가들의 의견을 교환하고, 모형의 예측 값을 수정/보완하는 작업을 거친다. 즉, 정확한 계절 기후 예측을 위해서는 기반 역학 모형의 성능 및 관측에 기반한 기후 통계적 특성에 대한 이해를 포함한 예보관의 높은 역량이 뒷받침될 필요가 있다.

다년간의 경험에 비추어볼 때, 이러한 수정/보완 작업은 결과적으로 예측 정확도를 올린다는 사실을 보여준다는 점에서 매우 중요하고 의미 있는 작업이라 평가할 수 있다. 그러나, 이러한 수동 작업은 참여하는 전문가 혹은 예보관의 조합에 의해 매번 변화할 수 있으며, 많은 인적 자원을 요구한다는 단점이 있다. 또한, 전문가의 지식을 체계적으로 정리하기 어렵고, 해당 기상/기후 상황에 따라 구체적인 내용이 달라질 수 있다는 어려움이 있다. 따라서, 이 연구에서는 역학 모형 앙상블에 기반한 계절 기후 예측에 관한 전문가의 지식을 미리 정리하여 데이터베이스화하고 이를 자동적으로 활용함으로써, 1) 안정적인 예측을 제공하고 2) 장기적 정확도 평가가 가능하도록 하며, 3) 주요 기후 인자를 쉽게 파악할 수 있는 계절 예측 시스템을 구성하고자 한다.

상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템(ESPreSSO-KR; Expert Seasonal Prediction System for Seasonal Outlook in Korea)은 역학-통계 하이브리드 계절 예측 시스템으로서, APCC의 현업 MME 계절 예측에 기반하고 있다. 또한, ESPreSSO는 과학적인 지식에 근거한 전문가 가이드를 이용하는 창의적 시스템으로서, ESPreSSO의 구성에 참여하는 전문가의 기후 시스템에 대한 역학/물리적 이해, 기반 역학 계절 예측 모형의 특성 및 ESPreSSO 시스템 자체에 대한 이해를 포함한다. 이 과정에서 우리 센터의 핵심 기술인 다중 모형 앙상블 기법과 상세화 기법을 확장/응용하여 현업 예보에 직접적으로 기여한다는 점에서 APCC 계절 예측에 가치를 더하게 된다. 또한, 체계적으로 정리된 전문가의 지식은 APCC의 현업 MME의 특성과 한반도 기후를 이해하는 데 기여하게 된다. 우리는 이 연구를 통하여 개발된 ESPreSSO가 계절 예측의 정확성을 높이고, 안정적인 예측을 제공하며, 기후 현상에 숨겨진 인자를 잘 정리해주길 기대한다.

이 연구는 신뢰도 높은 기후 예측 정보를 제공한다는 측면에서 우리 센터의 목적과 방향성에 부합하며, 장기적으로 안정적인 예측 시스템을 구성한다는 점에서 향후 인적 자원의 효율적 운용에 도움을 줄 수 있다. 뿐만 아니라, 전문가의 지식을 체계적으로 정리하여 데이터베이스화함으로써, 우리 센터에서 수행중인 기타 상세화 프로젝트에 활용되는 등 범용성을 확보할 수 있었다. 한편으로는 다양한 최신 현업 예측성 향상 기술을 한데 통합하여 구현함으로써 실제 현업에 적용할 수 있도록 계절 기후 예측성에 기여하는 시너지 효과를 만들게 되었다. 다음 제2장에서는 ESPreSSO의 기본 가정을 살펴보고, 이를 바탕으로 모형을 구성하고 구동하는 단계를 설명한다. 이를 바탕으로 제3장에서는 사용한 자료와 방법론이 기본 가정에 적절한지 확인하고 모형 구성시 고려해야하는 기술적 부분과 과학적 내용을 예시를 통해 알아본다. 제4장에서는 지난 한 해 동안의 ESPreSSO-KR의 예측/예보 결과를 제시하고 예측 기간의 성능을 평가하고 검증한다. 마지막으로 5장에서는 ESPreSSO의 확장 가능성에 대하여 고찰해보고자 한다.

2. DATA AND METHODOLOGY

2.1 ESPreSSO의 기본 가정

ESPreSSO가 안정적으로 신뢰도 높은 계절 기후 예측을 수행하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 첫째로, 기반 역학 모형은 어느 정도 예측 성능이 있어야 한다. 표적 변수의 경년 변동은 예측 가능한 시그널 밖에도 내외부적인 무작위 노이즈에 의해 결정된다. 이 중에서 적어도 대규모 순환으로부터 기인하는 시그널이 기반 역학 모형에서 적절히 모의되어야, 상세화 과정을 통해 표적 변수 경년 변동의 예측성을 확보할 수 있을 것이다. 이 연구에서 개발된 ESPreSSO-KR은 APCC의 현업 MME 예측 값을 기반으로 하고, 이는 특히 적도 지역의 대규모 순환과 관련된 시그널을 안정적으로 모의하는 것으로 알려져 있다(*cf.*, <http://apcc21.org/ser/fore.do>). 특히 엘니뇨-남방진동을 포함한 열대 태평양의 경년 변동성은 매우 높은 수준으로 예측 가능하며, 대부분의 열대 지역의 온도/강수의 예측성도 확보 되어있다. 우수 현업 계절 예측 기관의 예측 성능과 비교하여서도 APCC의 현업 MME 계절 예측의 성능은 매우 우수하다고 평가할 수 있다. 비록, 관측과 비교하여 기반 역학 모형에 계통적 오차 등이 존재하나, 이는 추후 설명할 ESPreSSO의 구성에 따라 전문가의 개입을 통해 극복하게 된다. 둘째로, 예측하고자 하는 표적 변수는 적절히 균질하며, 한편으로는 적절히 비균질해야 한다. 여기서 균질하다는 것은 비슷한 물리/역학적 현상에 의해 지배 받는 기후 현상이라는 의미이며, 비균질하다는 것은 잠재 예측 인자에 다양성이 나타날 수 있을 정도의 지역적 특색이 포함되어야 한다는 의미이다. 이러한 균질적 특성으로부터 전문가가 지배적인 기후 인자를 선별하게 되는 한편, 비균질적 특성으로 인해 다양한 예측 인자를 안정적으로 확보하며 특정 시그널에 과적합되는 현상을 방지할 수 있다. 객관적으로는, 표적 변수의 시공간 상관성을 대표하는 최상위 주요 모드(leading principal component)가 공간적으로 같은 방향성(공진성)을 가지는 한 편, 상위 수 개의 모드로 전체 변동성의 상당부분을 설명할 수 있을 때 이와 같은 특성을 만족한다고 볼 수 있다. 이후 구체적으로 확인할 바와 같이, ESPreSSO-KR에서 사용된 표적 변수(한반도 59개 관측소 기온)는 이러한 가정에 적합하다. 마지막으로 ESPreSSO의 구성에 참여하는 전문가는 기후, 모형, 그리고 ESPreSSO에 대한 지식을 갖추어야 한다. 즉, 표적 기후 시스템을 지배하는 실제 물리/역학적 과정에 관한 이해와 기반 역학 모형의 예측 성능 및 계통적 오차의 특성, 그리고

실제 관측과 관련성에 대한 이해가 필요하다. 한편으로는 전문가는 선택한 잠재 예측 인자가 ESPreSSO 안에서 어떻게 구성되고 처리되는지에 관한 이해도 필요하다. ESPreSSO-KR의 구성에 투입된 전문가는 기후 예측 분야의 박사들로, 한반도 계절 예측에 다년간 종사한 전문가들로 구성되었다. 이들은 한반도 계절 기후에 미치는 인자에 관하여 지속적으로 연구를 하고 있고, APCC MME를 이용한 계절 예측에 매달 참여하고 있다. 구체적으로 이들은 ESPreSSO-KR의 구성 과정을 뒷받침하기 위한 분석을 실시하여, 각각 여름철과 겨울철을 중심으로 한 계절 변동성에 영향을 미치는 주요 인자와 그 예측성에 관한 연구를 수행하였다. 따라서, ESPreSSO 구성에 참여한 전문가들은 위의 세 가지 인적 기준에 부합한다. 추가적으로, 만약 기반 역학 모형이 현업 MME 기반이라면, 현업 MME 자체의 안정성이 요구된다. 현업 MME의 모형 구성 등은 현업 작업 일정에 따라야 하므로 세부 사항에 변화가 나타날 수 있으나, 10 여 개의 모형을 사용하는 APCC 현업 MME의 특성상, 그 예측력이 세부 구성에 따라 민감하게 영향 받지 않는 것으로 평가(<http://apcc21.org/abt/model.do>)된다.

2.2 모형의 구성 및 구동 단계

위의 가정이 만족된다면, ESPreSSO가 안정적으로 구성되어 정확도 높은 계절 기후 예측을 수행할 수 있다. 모형은 전체 다섯 개의 핵심 모듈로 구성되는데, 전문가가 잠재 예측 인자를 선택하는 선택부, 객관적으로 예측 인자를 선별하는 선별부, 다양한 방식으로 상세화 과정을 진행하는 사상부, 앙상블 기법을 이용하여 최적의 계절 예측 정보를 생성하는 통합부, 예측을 시각화하고 자연어 설명을 제공하는 표출부로 구성이 되어있다. 각 모듈이 원활하게 수행되도록 지원 역할을 하는 사전 구성부, 가이드 제작부와 제시부, 변수 추출부와 명명부, 그리고 성능 비교 및 평가부가 보조적인 역할을 하게 된다. 모형을 구성하고 구동하는 핵심 단계를 다음 그림 1에 간략히 정리하였다.

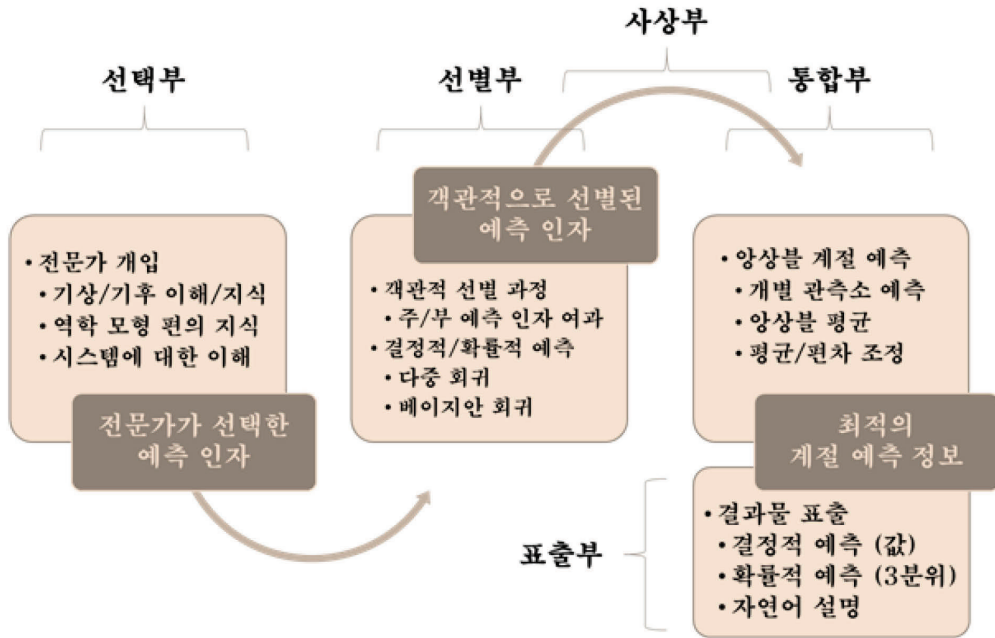


그림 1. ESPreSSO 한눈에 훑어보기. ESPreSSO는 전문가가 잠재 예측 인자를 선택하는 선택부; 객관적으로 예측 인자를 선별하는 선별부; 다양한 방식으로 상세화 과정을 진행하는 사상부; 이상불 기법을 이용하여 최적의 계절 예측 정보를 생성하는 통합부; 예측을 시각화하고 자연어 설명을 제공하는 표출부;로 구성된다.

선택부는 전문가의 개입이 객관적으로 정리되어 모형에 반영되는 모듈로서, 전문가는 물리/역학적 이해와 기반 모형의 특성을 고려하여 개별 현상을 가장 잘 설명할 수 있는 주요 잠재 예측 인자를 선정하게 된다. 이 과정에서 관측 및 모형 예측과의 교차 검증된 관련성 등 참고 자료가 자동적으로 제공(그림 2)되게 되며, 전문가는 기존 지식과 참고 자료를 바탕으로 주인자와 부인자를 선택한다. 여기서 각각의 잠재 주/부 예측 인자는 되도록 독립적인 현상에서 기인한 지식자로 선택하도록 한다. 그림 2의 예시 화면에 나타난 바와 같이, 선택부에서는 전문가의 선택을 보조하기 위한 자료가 팝업 형식으로 자동적으로 제공되며, 전문가는 ESPreSSO의 반응형 사용자 인터페이스를 통하여 간단한 마우스 조작만으로 잠재 예측 인자를 선정할 수 있다. 이 버전에서는 직사각형의 영역 평균 혹은 상관계수 가중 평균을 사용할 수 있도록 개발하였다. 이러한 선택 과정은 표적 변수만큼 반복되며, 각 반복 시행은 확인 및 취소 과정을 거치도록 하여 입력 오류를 줄이도록 디자인하였다. 또한 선택부에서 입력 받은 전문가의 선택은 따로 기록하여 통합부에서 최종 결과물로 정리되어 표출되며, 이로부터 전문가는 주요 현상에 대하여 명

6 | 상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템

명할 권리를 부여 받는다. 명명된 현상은 추후 표출부에서 자연어 예보 가이던스로 정리하여 제공함으로써 ESPreSSO의 계절 기후 예측의 판단 근거 자료로 사용할 수 있게 된다.

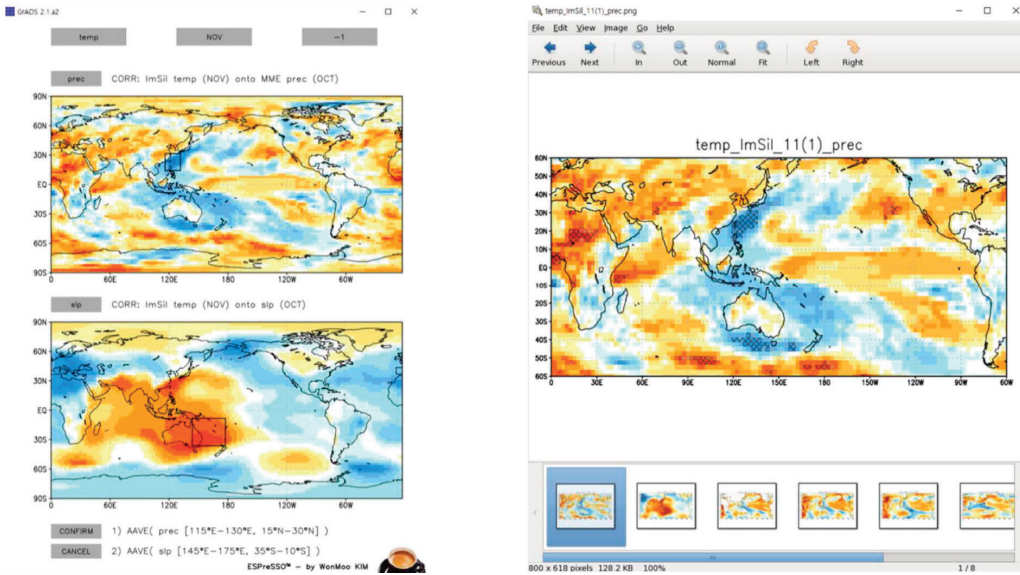


그림 2. ESPreSSO 선택부의 반응형 사용자 인터페이스 실행 화면 예시. 좌) 잠재 예측 인자 선정 화면과 우) 전문가 가이드 보조 자료, 표적 변수와 계절, 그리고 예측 리드 타임을 설정하면, 자동적으로 보조 자료가 표출되며, 반응형 인터페이스를 통해 간단한 마우스 조작으로 예측 인자와 영역을 선택하고, 선택된 잠재 예측 인자를 확인/취사하는 과정을 거쳐게 된다.

선별부에서는 선택부에서 전문가에 의해 주관적으로 선택된 잠재 예측 인자들이 객관적 선별 과정을 거치게 되는데, 잠재 인자들 사이의 부분 상관 독립성에 따라 부인자를 객관적으로 취사 선택하게 된다. 고려해야하는 변수가 두 가지(주/부)인 경우, 이 기준은 다음의 식으로 간단히 정리할 수 있다. 여기서 r_1 과 r_2 는 각각 표적 변수와 주인자, 부인자와의 상관계수, r_{12} 는 주인자와 부인자 사이의 상관 계수를 의미한다.

$$r_2 > r_{12} r_1$$

즉, 추가적인 예측 인자(부인자)의 기여로 선형적으로 설명 가능한 표적 변수의 분산이 증가하는 경우 부인자를 사용하고, 그렇지 않은 경우 부인자는 탈락시킨다. 이 취사 선택은 각각의 표적 변수에 대하여 개별 시행한다. 이러한 선별 과정을 통하여 예측 인자에 과도하게 적합되는 현상을 완화할 수 있다.

사상부에서는(1차년도) 다중 선형 회귀를 이용하여 결정론적인 예측을 수행하고,(2차년도) 베이지안 회귀를 이용하여 확률론적인 예측을 수행하게 된다. 다중 선형 회귀는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\hat{y} = y - \varepsilon = \beta_0 + \sum \beta_i x_i$$

위의 식에서 관측(y)과 예측(\hat{y}) 사이의 오차(ε)를 최소화 하는 방향으로 계수(β)를 결정하게 된다. 이 과정을 표적 변수만큼 반복한다. 베이지안 회귀의 방법론은 핵심 개발이 진행되었고, 몇 가지 민감도 검사를 거쳐 2차년도에 적용될 예정이다.

통합부에서 최종적인 결과값이 산출되는데, 이는 다중 모형 앙상블 기법을 확장하여 적용하는 것으로서, 표적 변수만큼 반복된 개별 예측을 합하여 최종 예측 값을 산출한다. 즉, ESPreSSO-KR에서는 59개의 관측소 기온이 표적 변수로서, 개별 관측소에 대해서 각각 수행된 예측을 모두 합하여 최종 앙상블 예측 값이 생산된다. ESPreSSO의 가정에 따라 비슷한 물리/역학적 현상에 따른 시그널은 전문가에 의해 지속적으로 선택되고 앙상블 과정에서 강화될 것이나, 비균질성이나 국지성, 오차에 의한 산발적인 인자는 앙상블 과정에서 오차 상쇄 과정을 통해 약화되게 된다. 즉, 기존 다중 모형 앙상블과 비슷한 오차 상쇄 효과를 노리되, 기존 방식과 다른 점은 앙상블 과정이 물리적 차원에서 이루어진다는 것이다. 통합부는 2차년도의 확률 예측 결과 표출 시 예측 결과가 가지는 불확실성을 추정하는 단계에서도 활용하게 된다.

한편, 통합부에서는 전문가가 선택한 잠재 예측 인자의 발현 빈도가 정리되어 제공되며, 이를 바탕으로 전문가는 주요 현상에 대해 명명할 권리를 부여 받는다. 이 과정을 통해 명명된 주요 인자는 표출부에서 자연어 가이드스로 제공되어 사용자의 이해를 돕게 된다. 또한, 사용자의 선택에 따라 모멘트 조정이 추가될 수 있는데, 이는 통계적인 측면에서 선결 과제의 오류를 범할 수 있는 부분이므로 주의가 요구된다. ESPreSSO에서는 평균과 분산의 조정이 가능하도록 옵션을 두었는데, 이를 이용하면 훈련 기간과 예측 기간의 평균 및 산포의 정도를 조정하여 두 기간의 비정상성에 대한 고려를 추가하고, 결정론적 예측의 경우 사용자가 이해하기 쉬운 예측 범위를 생산할 수 있다.

마지막으로 표출부에서는 결정 예측(1차년도)과 확률 예측(2차년도) 및 예측 성능 지표가 제공되며, 공간 분포와 시계열을 제공하여 사용자가 기후 예측 정보를 한눈에 파악

할 수 있도록 돕는다. 특기할 만한 사항은, 전문가의 지식이 정리되어 자연어의 형태로 표출된다는 점인데, 이는 계절 기후 예측 역량이 부족한 국가에서 특히 유용한 정보가 되리라 판단한다. 다음은 ESPreSSO가 제공한 계절 전망의 예시로서, 밑줄 친 부분은 ESPreSSO 결과에 따라 자동적으로 생성되는 내용이다.

*ESPreSSO-KR의 계절 전망 예시:

“The ESPreSSO™ thinks the in-situ temperature (T2m), low-level temperature to the east (T850), and seasonal foot-print SST (SST) are important factors to consider. The APCC MME forecasts that in-situ temperature (T2m) is positive and seasonal foot-print SST (SST) is positive this year. As a result, the ESPreSSO™ predicts that the temperature this March will likely be above normal (ABOVE 60%, NORMAL 30%, BELOW 10%), around +0.45°C. Note that the prediction skill (HSS/correlation skill) of ESPreSSO™ in March is very high (HSS = 48%, r = 0.77) during the total (training + forecast) period. The correlation skill for the training (1983–2005) period and the independent forecast (2006–2017) period are r = 0.73 and r = 0.87, respectively.”

3. EXAMPLE: ESPRESSO-KR FOR SEPTEMBER TEMPERATURE

이 장에서는 ESPreSSO를 한반도 9월 기온 예측에 적합하는 과정을 통하여, ESPreSSO-KR의 적용 가능성을 확인하고 구체적인 구성에 대해 설명하고자 한다.

3.1 기본 가정 적합성 여부

제2.1장에서 ESPreSSO 시스템의 안정적인 구성을 위한 세 가지 기본 가정에 대하여 상술하였다. 이중 기반 역학 모형인 APCC MME의 예측 성능은 다년간 현업 수행과 연구를 통하여 그 성능이 검증(*cf.*, <http://apcc21.org/ser/fore.do>)이 되어있고, 시스템 구성에 참여하는 전문가의 적절성 역시 상기하였다. 따라서, 표적 변수의 적절한 균질/비균질성에 관한 가정에 대하여 확인할 필요가 있다.

오른쪽 그림 3은 ESPreSSO-KR의 구성에 사용한 한반도 59개 관측소의 공간적 분포를 나타내고 있다. 이들 관

측소는 지리적으로 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 의 좁은 영역에, 산지를 제외하고는 비교적 균일하게 분포하고 있다. 관측된 표적 변수(월별 기온)는 비슷한 물리/역학적 기후 현상에 대해 지배받는 균질한 특성을 보이고 있다. 이 예시에 사용된 9월 한반도 기온의 경우, 전체 변동성의 80% 이상을 설명하는 첫번째 모드는 공간적으로 모두 같은 방향의 변동성(공진성)을 보인다. 한편, 상위 3 개의 모드로 전체 변동성의 90% 이상이 설명되며, 각각의 하위 모드는 남/북, 내륙/해안, 동/서의 패턴을 설명하고 있다(결과 생략). 모든 계절에 대하여 주 성분 분석의 주요 모드는 한반도 전체적으로 일관성 있는 온난/한랭 패턴(공진성)을 보여준다. 그러나 국지적 지형의 영향 등으로 세부 특성 역시 존재하며, 이러한 특성에

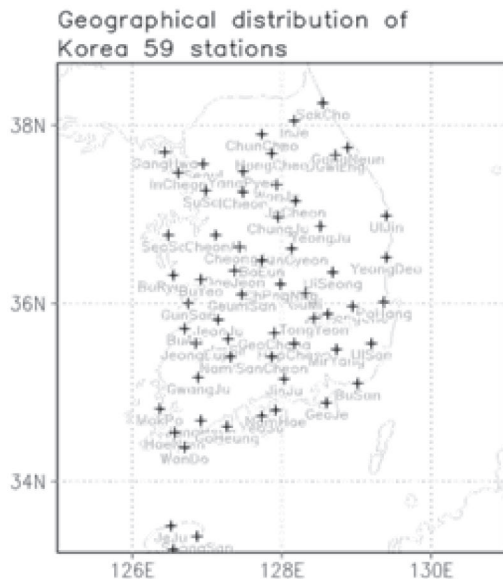


그림 3. ESPreSSO-KR의 구성에 사용한 한반도 59개 관측소의 공간적 분포와 관측소의 이름.

따라 몇 가지 세부 지역 설정이 가능한 정도의 비균질성도 만족하고 있다. 그럼에도 불구하고 상위 3-4 개의 모드만으로 전체 변동성의 90% 이상을 설명할 수 있다. 따라서, 한반도 월별 기온은 표적 변수로서 기본 가정에 적합하고 볼 수 있다.

3.2 기후 현상에 대한 고려 1: 기술적 부분

ESPreSSO-KR의 구성에 사용되는 기후 현상에 대한 전문가 지식의 구체적인 예시는 다음 3.3 장을 통하여 설명하고, 여기에서는 기술적인 부분에 한하여 간략히 설명하고자 한다. 그림 4는 한반도 59개 관측소 평균 9월 기온과 관측 재분석 자료(순환장 NCEP2, 해수면 온도 ERSST.v4, 강수량 CMAP) 사이의 동시 상관 관계를 표시한 그림(1983년-2005년의 훈련 기간; 훈련 기간은 2016년 생산한 현업용 MME를 기준으로 하였다)이다.

한반도 9월 평균 기온은 연근해 및 쿠로시오 해수면 온도와 양의 상관 관계를 보이며, 북태평양 고기압의 확장에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 이와 함께, 유라시아 대륙을 따라 동서 방향의 정상 파동 형태가 관측되며, 한반도 근방으로 유입되는 남풍의 영향으로 기온이 변화한다는 점도 중요한 요소이다. 또한, 이러한 국지 순환은 남중국해 지역의 대류 활동 변화와 의미 있는 상관성을 보이고 있다. 관측에 기반한 이러한 지식을 바탕으로 기반 역학 모형의 예측에서 의미 있는 시그널을 찾아 매핑하는 것이 전문가의 몫이다. 그러나, 그림 5에 나타나다시피, 관측에서 나타나는 관련성이 기반 역학 모형에서는 정확히 모의되지 않는다. 해수면 온도의 경우, 연근해와 관련성이 떨어지며, 쿠로시오 해수면 온도도 과도하게 확장된 모습을 보인다. 북태평양 고기압의 확장은 어느정도 모의되나, 남서 방향으로 장출하는 모습은 찾아보기 힘들다. 동서 방향의 정상 파동 형태도 위치가 왜곡되어 나타나는 특성을 보인다. 그러나 한반도 근방으로 유입되는 남풍과 남중국해 지역의 대류 활동 강화는 어느 정도 예측 가능한 시그널로 분류할 수 있는 것으로 보인다.

다만, 이러한 공간적 유사성이 실제 관측과 같은 물리/역학적 현상인지, 아니면 역학 모형의 특성이거나 우연히 나타난 통계적 착시인지 구별할 필요가 있다. 적은 자료로부터 물리/역학적으로 의미 있는 현상을 객관적 접근 방식만으로 탐지하는 것은 불가능하므로, 전문가의 지식과 경험이 필수적이다. ESPreSSO 구성에 참여하는 전문가는 기반

역학 모형의 성능과 계통적 편이 등을 관측에서 나타나는 대규모 기후장의 특성과 연관시켜 예측인자로서 의미가 있는 시그널을 분류하고, 이들을 중심으로 주인자와 부인자를 선택한다. 즉, 전문가는 실제 관측에서 나타나는 물리/역학적 현상 중, 기반 모형에서 예측성을 가지고 모의되는 변수와 영역을 식별하여 이 중 최대 두 가지 잠재 예측 인자를 선택하게 된다. 이 과정에서 주인자와 부인자는 되도록 독립적인 현상으로 선택하도록 한다. 이렇게 선택된 잠재 예측인자는 그림 6과 같이 정리되어 통합부에서 전문가에게 제공된다. 전문가는 이중 의미가 있다고 판단되는 변수에 이름을 붙여 주요 인자로 선언할 수 있다. 주요 인자로 선언된 변수는 추후 표출부에서 자연어 형식으로 요약 제공되어, 계절 기후 전망에 활용할 수 있다.

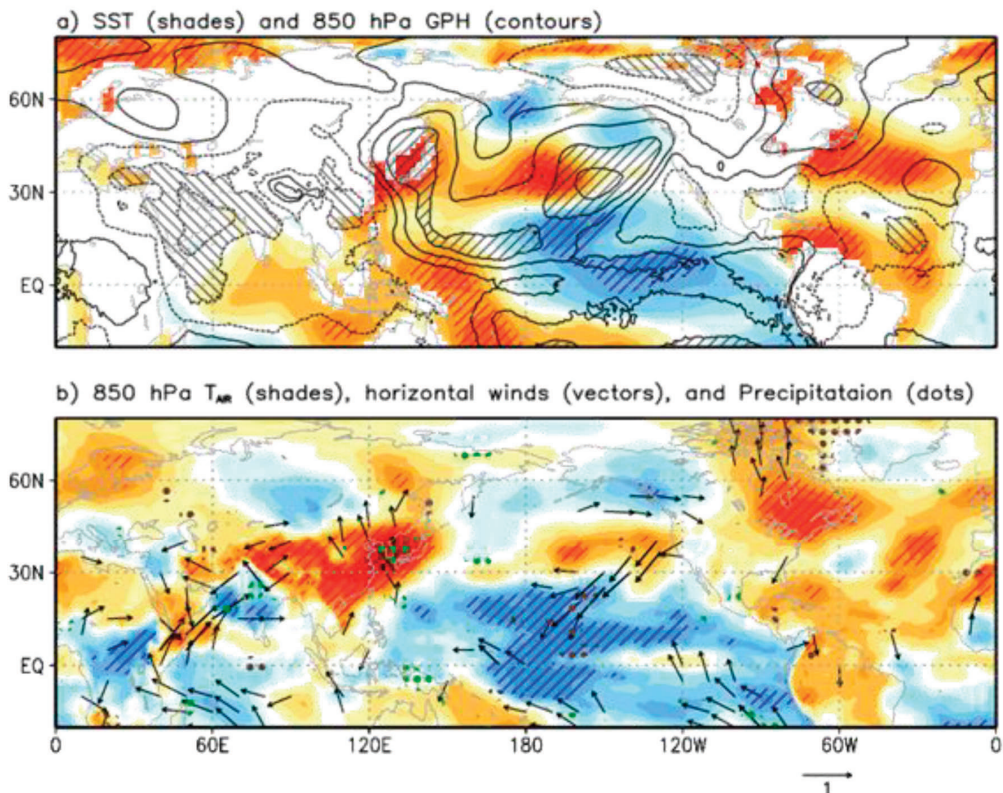


그림 4. 한반도 59개 관측소 평균 9월 기온과 대규모 순환장과의 관련성. a) 해수면 온도(채색; 붉은 색은 고온, 푸른 색은 저온)와 850 hPa 지위 고도(등치선; 실선은 양의 편차, 파선은 음의 편차), b) 850 hPa 기온(채색), 수평 바람(화살표) 및 강수(점; 초록색은 강수 증가, 갈색은 감소). 통계적으로 유의한 관련성만 표시하였고, 채색된 변수의 유의성은 사선으로 나타내었다.

12 | 상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템

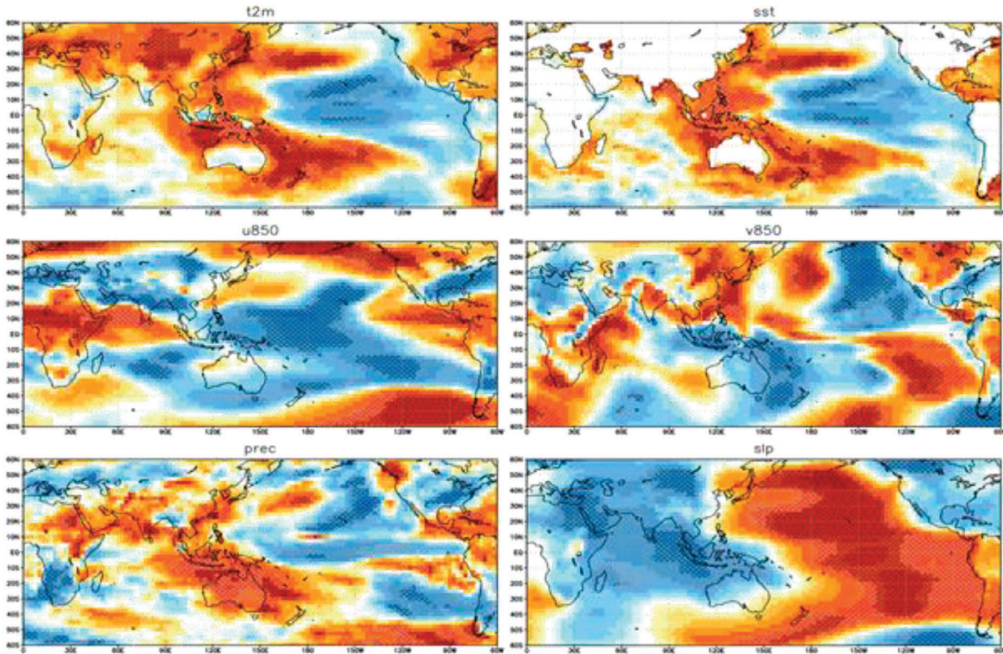


그림 5. APCC MME와 한반도 9월 평균 기온 사이의 동시 상관 관계. 교차 검증을 통하여 지속적으로 나타나는 유의미한 관계는 X 표로 표시하였다.

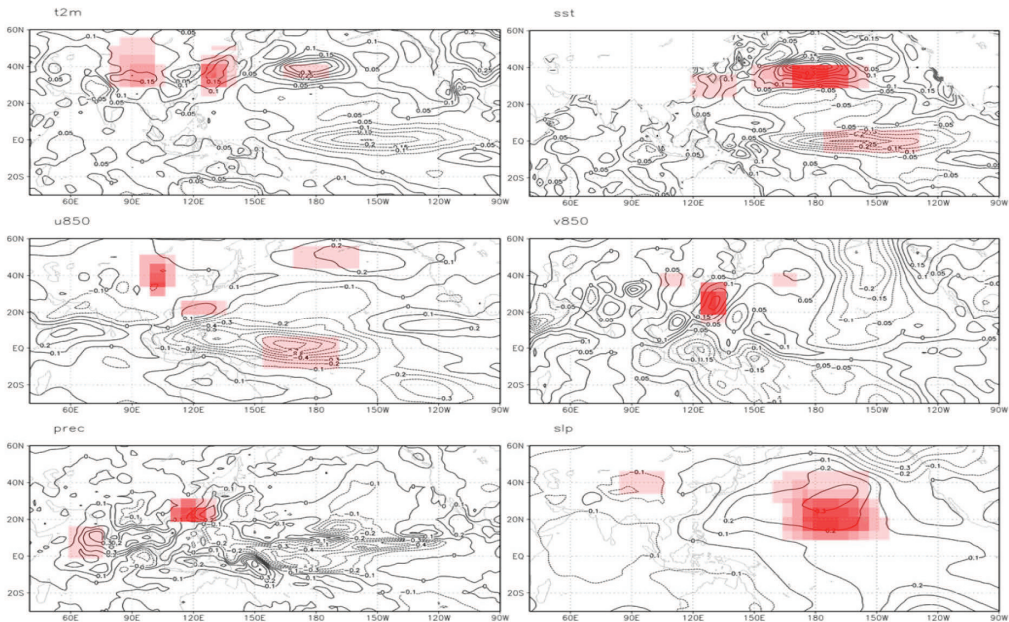


그림 6. 전문가에 의해 선택된 잠재 예측 인자의 예. 붉은 색이 진해질수록 반복적으로 선택된 지역이며, 이러한 지역과 변수 중 의미 있는 것은 전문가에 의해 통합부에서 주요 인자로 명명된다.

실제 지난 9월, 기반 역학 모형은 1개월 리드에서 동해와 쿠로시오 지역의 해수면 온도 편차는 따뜻하고 남중국해의 대류 활동은 증가하는 것으로 예측하였으나, 한반도 남쪽으로는 북풍 계열의 바람이 우세할 것으로 내다보았다. 이러한 기반 역학 모형의 예측은 APCC의 내부 예보 토의를 통하여 수정되어 APCC는 공식적으로 기온은 평년보다 따뜻하고 강수는 평년보다 적을 것으로, 기상청은 최종적으로 기온은 평년보다 따뜻하나 강수는 평년과 비슷한 수준으로 예보하였다.

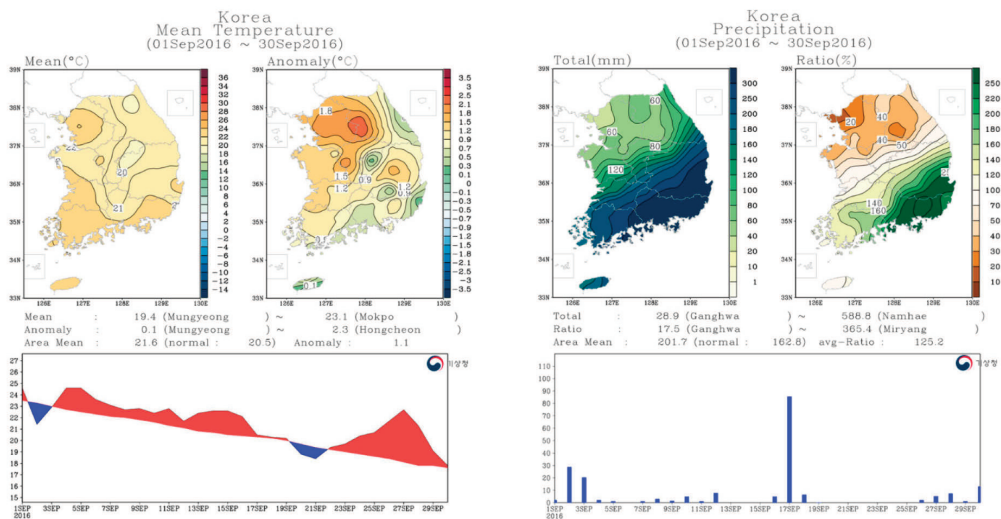


그림 7. 실제 해당년도 9월의 (좌) 평균 기온과 (우) 강수량. 자료 출처: 기상청(이상기후 합동분석 시스템, <http://co-anal.kma.go.kr>)

그림 7에서 확인할 수 있듯이, 실제 지난 9월은 평년보다 매우 더워서, 기온은 평년 대비 +1.1°C(평년 비슷 범위는 ±0.4°C)의 편차를 보였으며, 강수는 평년 대비 +25.2%P(평년 비슷 범위는 ±25%P)로 미미하게 평년을 웃돌았다.

ESPreSSO-KR의 9월 기온에 대한 훈련 기간 성능은 가교차검증(잭-나이프) 기준으로 상관 스킬 $r = 0.62$ 를 보여, 기반 역학 모형의 기준 스킬인 $r = 0.1$ 에서 크게 향상되는 모습을 보였다. 독립된 예측 기간의 실제 성능도 기반 역학 모형의 기준 스킬 $r = -0.2$ 에서 $r = 0.69$ 로 뚜렷하게 향상되었고, 훈련 기간과 예측 기간에서 모두 안정적인 예측 성능을 보여주었다. 이러한 성능 향상은 강수의 경우에서도 비슷하게 확인할 수 있으며, 구체적인 내용은 성능 평가 부분에서 제시하기로 한다. 결과적으로 ESPreSSO-KR은 지

난 9월 남중국해의 대류 활동과 계통적인 편이를 고려한 남풍 유입을 주요 인자로 판단하여, 평년 대비 +1.1°C 의 기온 편차와 평년과 비슷한 강수량을 정확히 예측(그림 8)하였다. 그림에서 지역 스킬 및 예측 정보는 사용자의 이해를 돕기 위한 그림으로, 국지적인 예측 스킬 및 예측 값은 신뢰하기 힘들다는 점에 유념하라. 최종 결과는 시계열 예측 그래프와 자연어 예보 전망 가이드선로서, 전문가에 의해 선택된 물리/역학적 기후 현상이 요약/제공되는 예보 전망 가이드선은, 비전문가도 이해할 수 있는 정보를 제공하여 예보 역량이 부족한 개발 국가에서 매우 절실한 정보가 될 것이다.

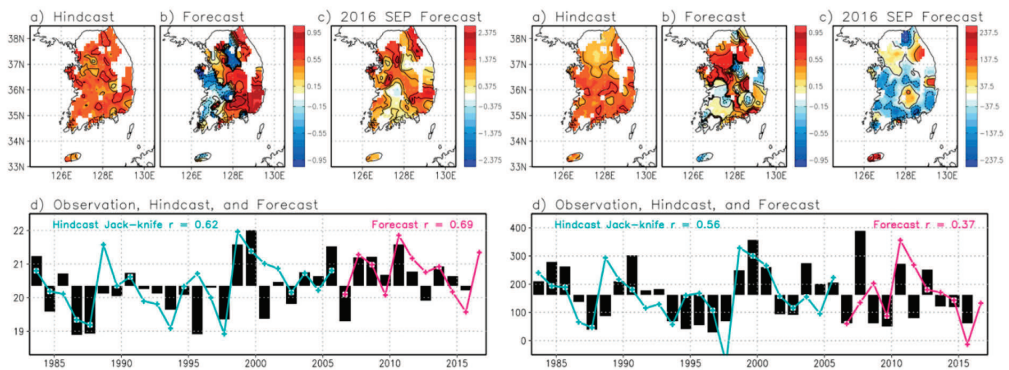


그림 8. ESPreSSO-KR의 9월 좌) 기온 및 우) 강수 예측 결과. 상단의 지도는 훈련 기간 및 예측 기간의 성과와 해당년도 9월 예측 값을, 하단의 시계열은 관측 변수(비) 및 교차 검증 ESPreSSO-KR의 예측 값(선)을 나타낸다. 각각의 기간에서 평가한 상관 예측 스킬이 표시되어 있다.

3.3 기후 현상에 대한 고려 2: 과학적 부분

전문가는 매 계절, 매 리드에 대하여 기후적 지식을 동원하여 잠재 예측 인자를 선택하게 된다. 이 과정에서 기존 연구에 관한 리뷰가 이루어지는 것은 물론이고, 전문가가 추가적인 연구를 수행하여 보다 의미 있는 예측 인자를 선별하게 된다. 예측 성능 제고를 위한 기후 현상 분석 및 기반 역학 모형의 특성에 관한 연구는 학술지 논문 발표를 통하여 공유(예: Kim W. *et al.*, under review, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*; Yeo S.-R. *et al.*, 2017, *J. Geophys. Res.*; Kim Y. *et al.*, in preparation)하고 있다. 이 장에서는 이러한 전문가 선택 과정에서 고려되는 기후적 지식에 대하여 한반도 여름철 기온을 예로 들어 설명하고자 한다. 관련 연구 내용은 학술지에 게재되었거나 게재될 예정임에 유의하라. 그림 9는 한반도 여름철 기온의 시계열과 선형 추세를 나타낸 것이다. 6월과

7월, 8월 모두 뚜렷한 온난화 추세가 나타나고 있으나, 6월에 비해 7월과 8월의 경년 변동성이 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 6월과 7월, 6월과 8월 기온의 상호 관련성은 거의 발견되지 않으나, 7월과 8월의 경우 두 시계열이 많은 부분 일치하는 특징을 발견할 수 있다. 실제 관련된 순환장을 살펴봐도 6월과 7/8월의 특성은 상이하나, 7월과 8월은 비슷한 성질을 보이고 있다(자세한 내용은 Yeo *et al.*, 2017 참조). 이는 전구적 온난화 경향성의 상대적인 중요성 및 동아시아 몬순/장마와 관계된 현상으로 나타난다. 즉, 6월의 경우 지구 규모의 온난화 추세가 한반도 기온과 밀접한 관련을 가지는 것으로 파악되는 한편, 온난화 추세를 제외한 경년 변동성은 해양에서는 그 시그널을 찾기 어렵고, 북동아시아 지역의 대기 패턴 등에서만 유의한 관련성을 보이는 것으로 나타난다. 예측의 측면에서, 지구 규모의 온난화 추세와 관계된 6월의 주성분은 기반 역학 모형을 통해 예측이 가능한 변동성이 된다. 그러나, 고위도 대기 패턴과 관련성이 높은 6월 경년 변동성은 해빙과 눈덮임 등 지면 과정이 포함되지 않은 APCC MME를 통한 예측에는 한계가 있을 수 밖에 없다. 반면, 7/8월의 한반도 기온의 경우(그림 10), 온난화 추세를 제거한 주요 변동성도 해수면 온도의 변화와 조직적인 관련성을 보이고 있다. 한반도 연근해 및 쿠로시오 출구 지역의 해수면 온도와 양의 상관 관계가 뚜렷하며, 반면 열대 태평양의 라니냐 패턴, 즉, 인도양 및 중-동태평양과 음의 상관, 서태평양 및 해양도서지역의 양의 상관 관계와 함께 북태평양 대기 패턴이 한반도 지역의 7/8월 기온과 밀접하게 관련된 것으로 나타난다. 이러한 열대 지역의 해수면 온도 변동성은 기반 역학 모형에서도 상당한 수준으로 모의가 가능하고 따라서 높은 예측력을 보인다. 이를 바탕으로 전문가들은 예측 가능한 열대 해수면 시그널과 이에 따른 원격 상관성을 기반으로 ESPreSSO의 예측 인자를 결정하게 된다.

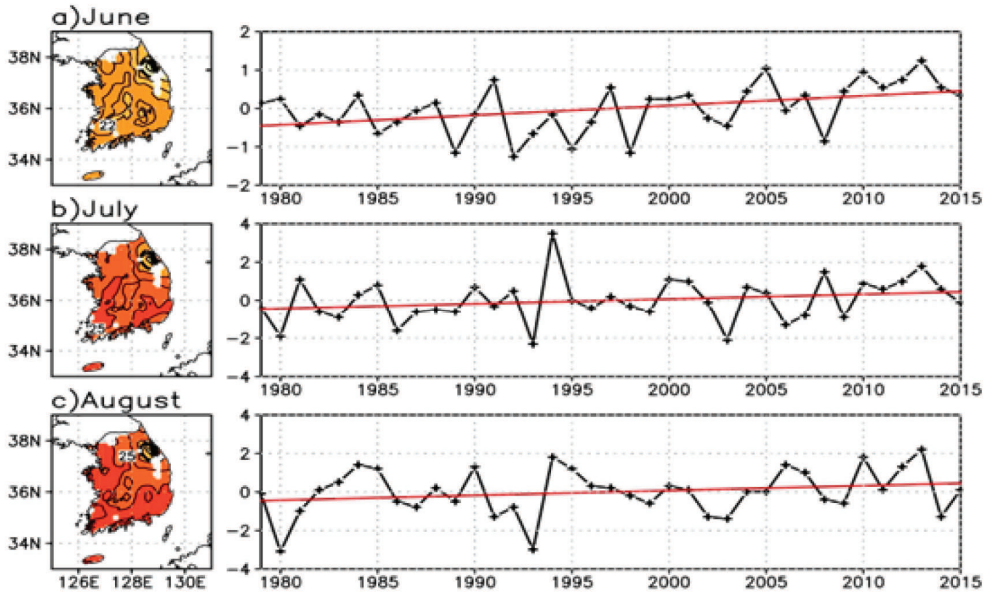


그림 9. 한반도 여름철 기온 시계열과 그 추세. 6월과 7/8월의 y축 범위가 다른 것에 유의하라. 자료 출처: Yeo *et al.*, 2017.

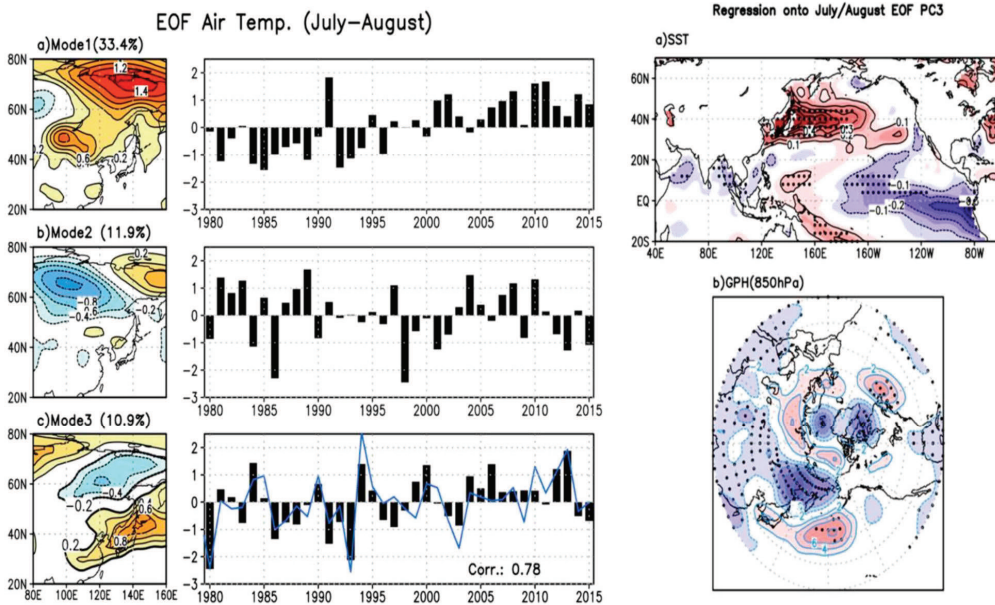


그림 10. 한반도 7/8월 기온과 관계된 좌) 동아시아 기온장의 주요 모드와 우) 해수면 온도 및 지위 고도의 상관 패턴(3번째 모드).

ESPreSSO-KR의 구성에는 위와 같은 정보들이 고려되어 전문가가 잠재 인자를 선택하는 기준으로 반영되게 된다. ESPreSSO의 구성과 관계된 과학적인 부분은 학술 논문 출판으로 공유할 계획으로, 중복성 문제로 상술하지 아니하나, 전문가는 기후 현상 및 기반 모형에 관한 지식을 최대한 동원하여 기반 역학 모형의 예측에서 유의미한 시그널을 선택하여야 한다. 한편, 다음 장에서 확인할 수 있듯이, 결론론적인 안정성 평가에서 상기 접근은 상당 부분 소기의 목적을 달성한 것으로 판단한다.

4. RESEARCH RESULTS

4.1 ESPreSSO-KR의 예측 결과

이 장에서는 2017년도에 수행한 ESPreSSO-KR의 실제 예보를 살펴본다. 그림 11-그림 21은 2017년 1월부터 11월까지 1개월 선행 예측(리드 +1)에서 수행된 ESPreSSO-KR의 기온 예보 결과다. 그림 a)-c)에 나타난 세부 사항은 참고 자료이며, d)와 e)에서 최종 결과를 요약하여 표출하고 있다. e)에서 나타난 자연어 예보 전망은, 전문가가 명명한 주요 인자가 해당 월에 뚜렷한 편차를 보일 경우 자동으로 추출되어 표출된 것이다. 아래 그림에 나타난 바와 같이, ESPreSSO는 현재 결정 예측 결과 값과 해당 월에 고려할 만한 주요 예측 인자, 그리고 해당 월에 나타난 주요 예측 인자의 유의미한 변동을 제시하여 사용자가 예측 결과뿐만 아니라 예측의 근거도 확인할 수 있도록 돕는다. 한편으로는, 전체 예측 성능을 제시하여 ESPreSSO의 결과가 어느정도 신뢰할 수 있는지 확인이 가능하며, 모형이 구성되는 데 사용된 훈련 기간과, 이와는 독립적으로 사용된 예측(검증) 기간의 성능도 같이 제공해줌으로써 ESPreSSO가 얼마나 안정적으로 수행되고 있는지 파악할 수 있게 돕는다. 1차년도인 2017년에는 결정 예보만 제공하고 있으나, 향후 확률 예보로 기능이 확장되면 비 전문가가 보다 더 쉽게 이해할 수 있는 자연어 스킬 평가도 추가될 예정이다.

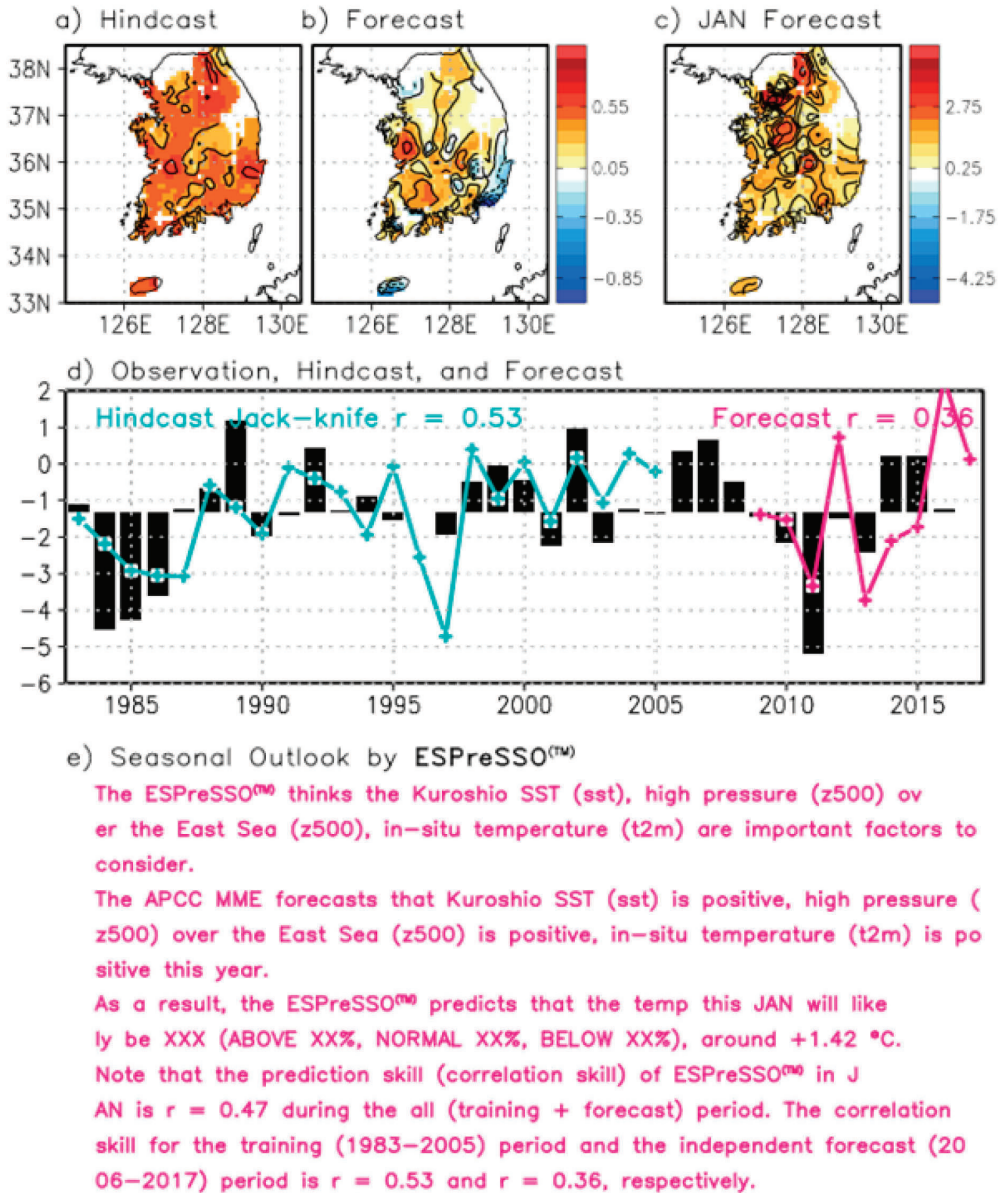


그림 11. ESPreSSO-KR의 2017년 1월 기온 예측 결과 화면.

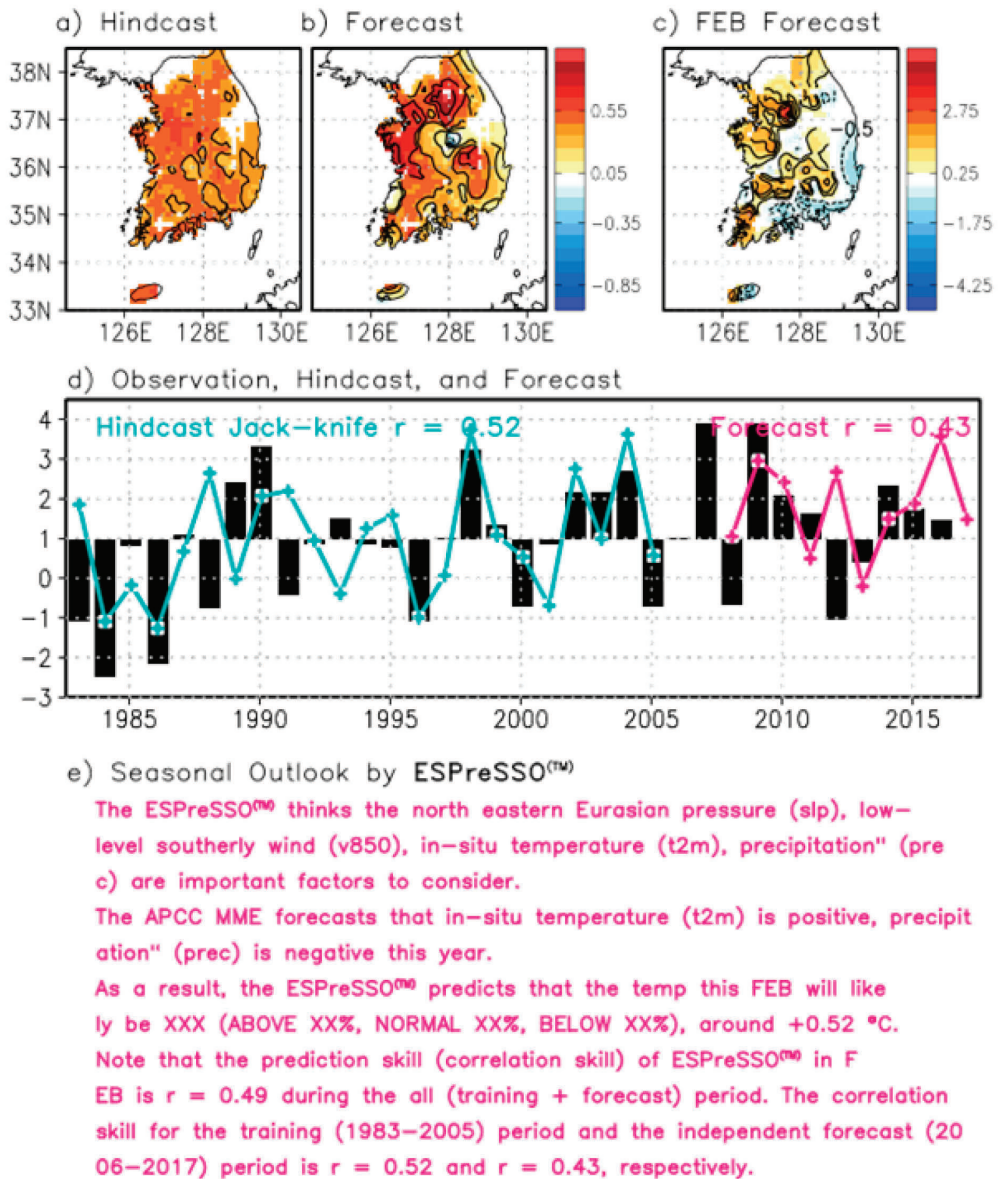


그림 12. 그림 11과 같으나 2월.

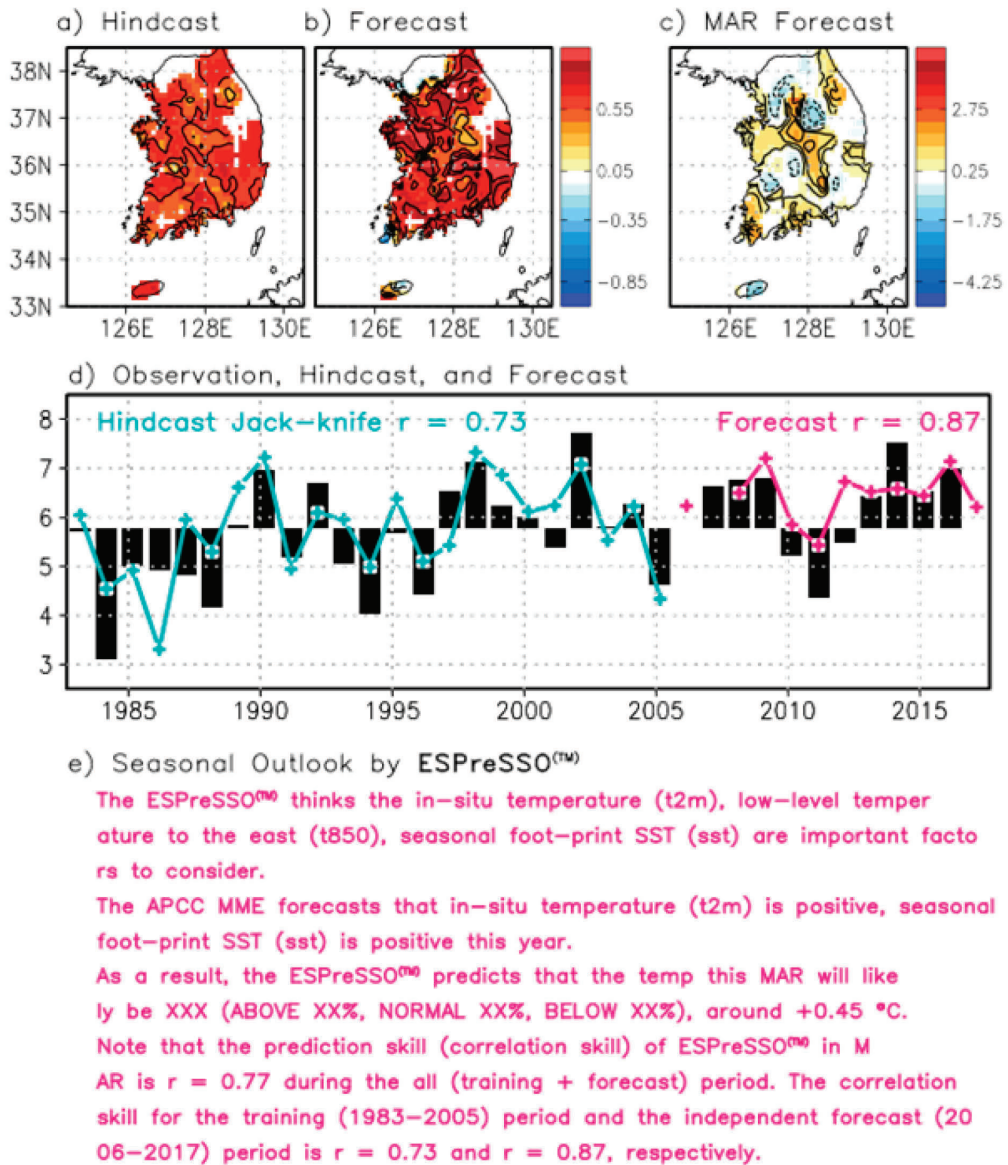


그림 13. 그림 11과 같으나 3월.

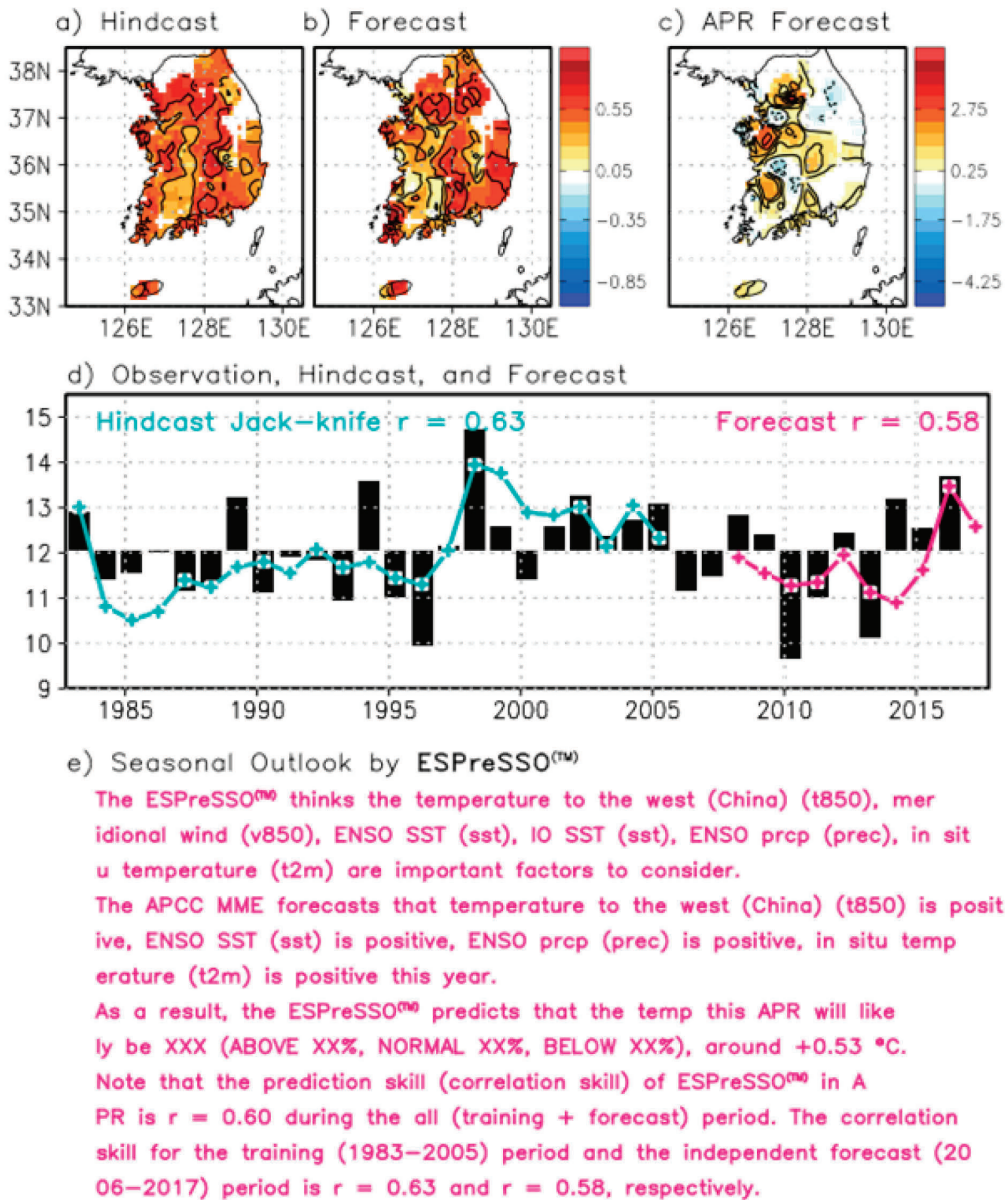
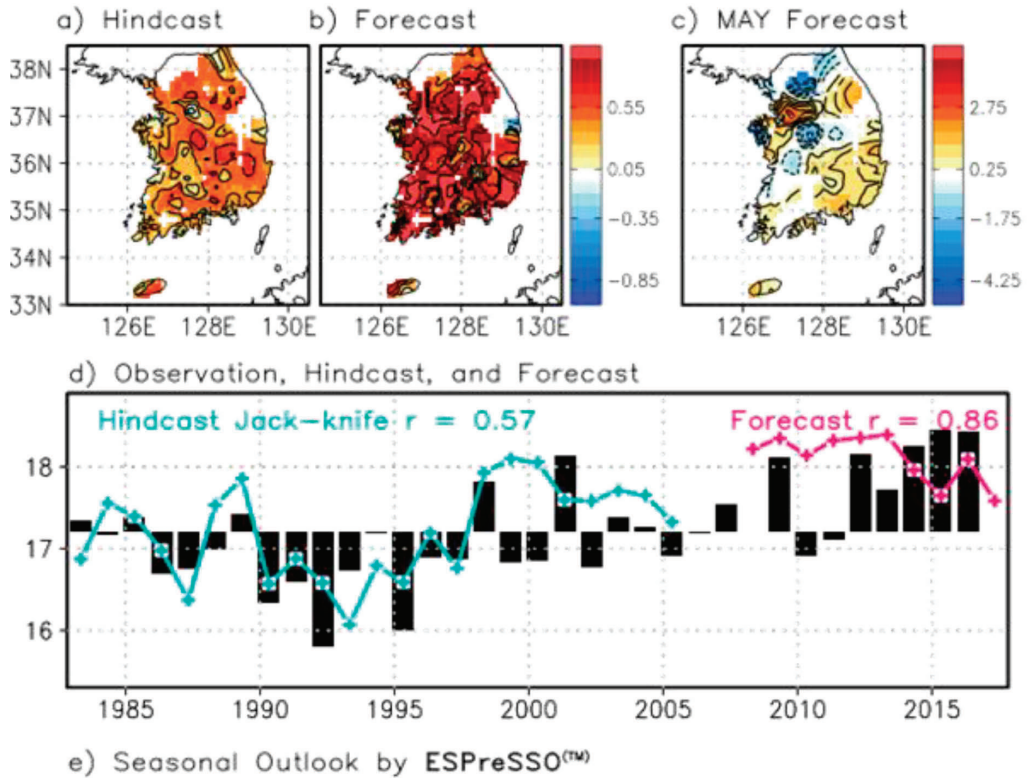


그림 14. 그림 11과 같으나 4월.



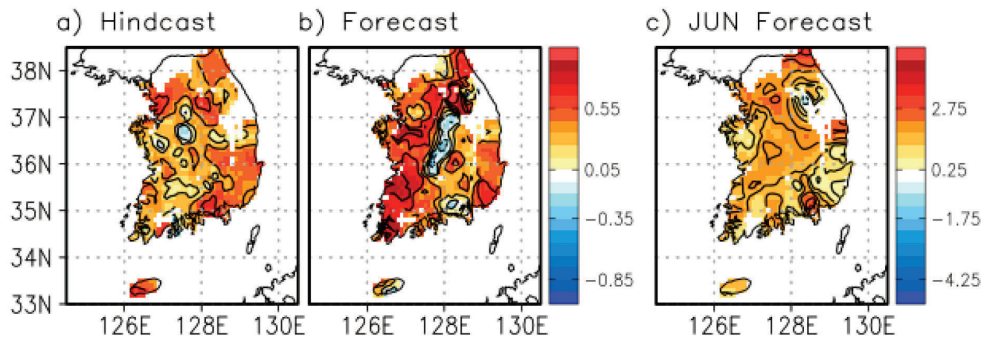
The ESPreSSOTM thinks the subtropical western Pacific temperature (t850), southerly wind (v850), in-situ high pressure (z500), local high slp (slp) are important factors to consider.

The APCC MME forecasts that subtropical western Pacific temperature (t850) is positive, southerly wind (v850) is negative, in-situ high pressure (z500) is positive this year.

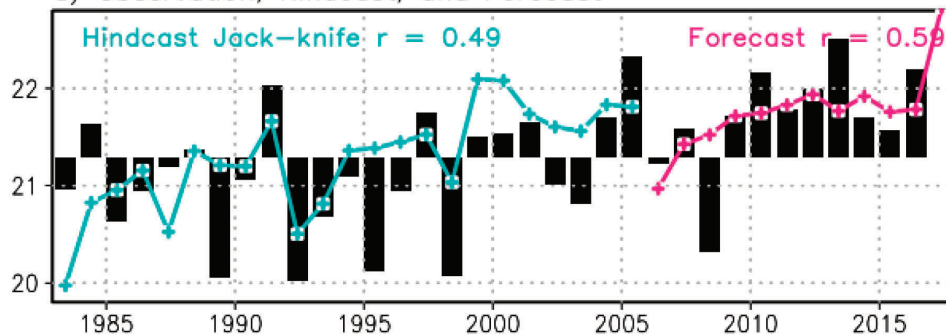
As a result, the ESPreSSOTM predicts that the temp this MAY will likely be XXX (ABOVE XX%, NORMAL XX%, BELOW XX%), around +0.37 °C.

Note that the prediction skill (correlation skill) of ESPreSSOTM in MAY is $r = 0.69$ during the all (training + forecast) period. The correlation skill for the training (1983–2005) period and the independent forecast (2006–2017) period is $r = 0.57$ and $r = 0.86$, respectively.

그림 15. 그림 11과 같으나 5월.



d) Observation, Hindcast, and Forecast



e) Seasonal Outlook by ESPreSSO™

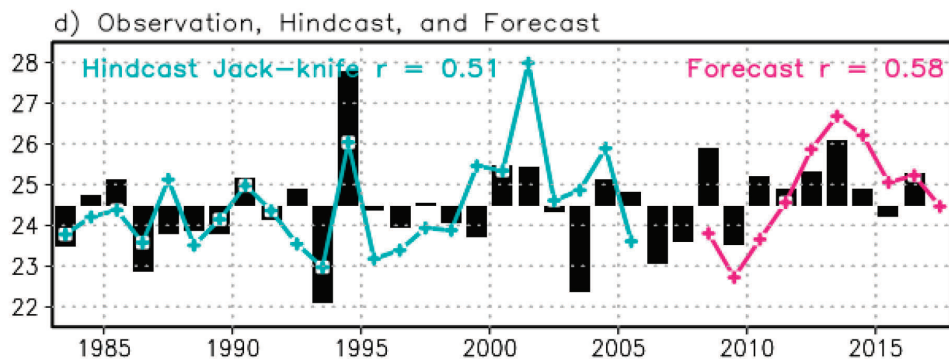
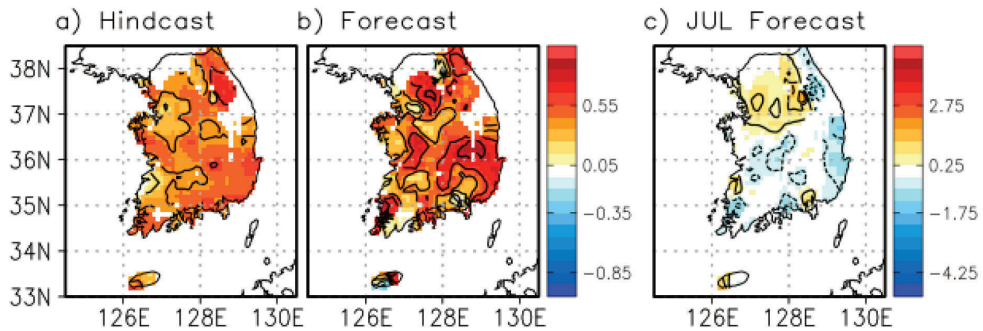
The ESPreSSO™ thinks the zonal wind over East Asia (u850), air temperature near Korean peninsula (t850), Sea surface temperature over the North Pacific (sst) are important factors to consider.

The APCC MME forecasts that zonal wind over East Asia (u850) is positive, a air temperature near Korean peninsula (t850) is positive, Sea surface temperature over the North Pacific (sst) is positive this year.

As a result, the ESPreSSO™ predicts that the temp this JUN will likely be XXX (ABOVE XX%, NORMAL XX%, BELOW XX%), around +1.54 °C.

Note that the prediction skill (correlation skill) of ESPreSSO™ in JUN is $r = 0.53$ during the all (training + forecast) period. The correlation skill for the training (1983–2005) period and the independent forecast (2006–2017) period is $r = 0.49$ and $r = 0.59$, respectively.

그림 16. 그림 11과 같으나 6월.



e) Seasonal Outlook by **ESPreSSOTM**

The **ESPreSSOTM** thinks the South China precipitation (prec), Kuroshio extension southerly (-) (v850) are important factors to consider. The APCC MME forecasts that there is no significant signal this year. As a result, the **ESPreSSOTM** predicts that the temp this JUL will likely be XXX (ABOVE XX%, NORMAL XX%, BELOW XX%), around ± 0.00 °C. Note that the prediction skill (correlation skill) of **ESPreSSOTM** in JUL is $r = 0.53$ during the all (training + forecast) period. The correlation skill for the training (1983–2005) period and the independent forecast (2006–2017) period is $r = 0.51$ and $r = 0.58$, respectively.

그림 17. 그림 11과 같으나 7월.

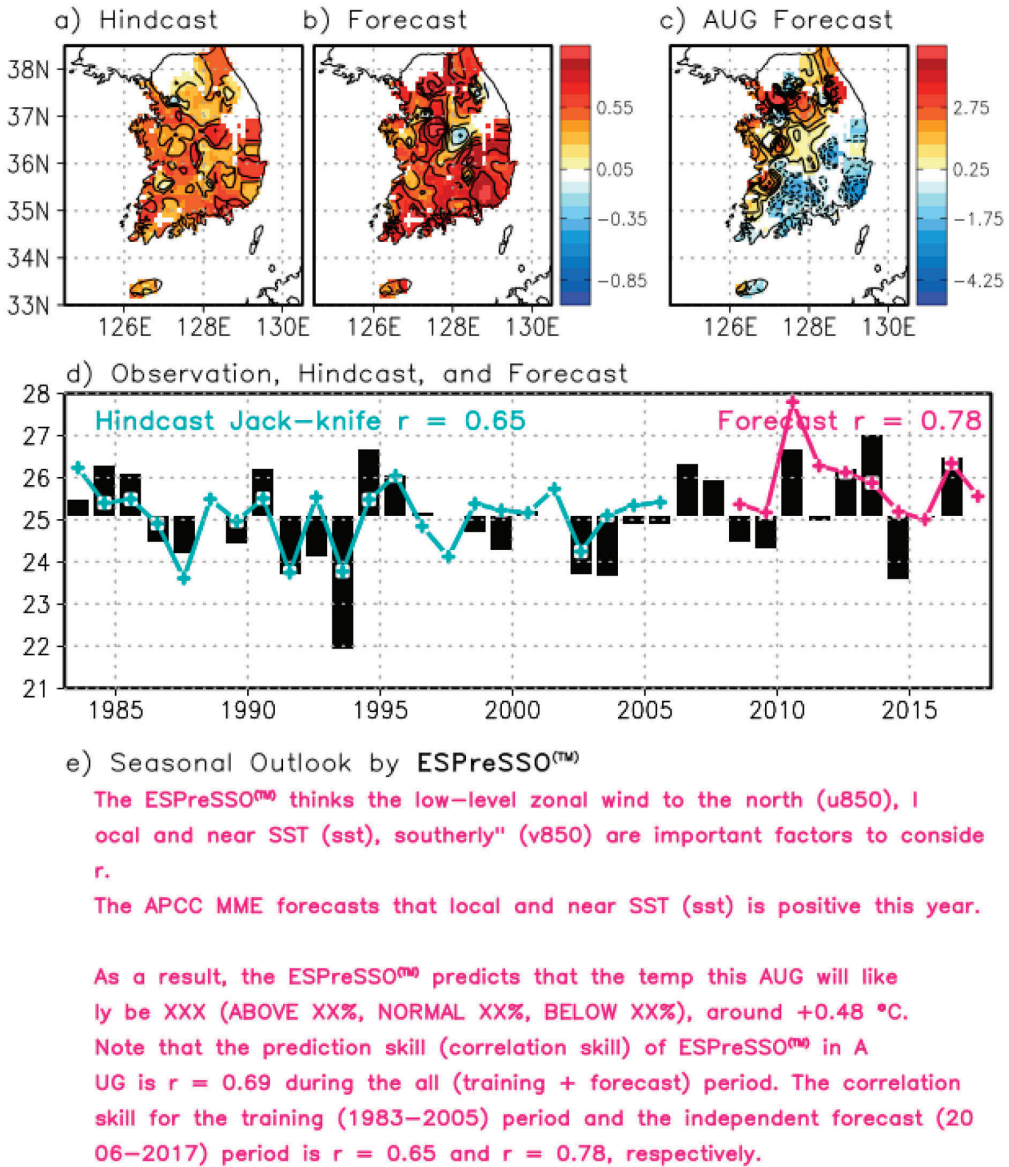


그림 18. 그림 11과 같으나 8월.

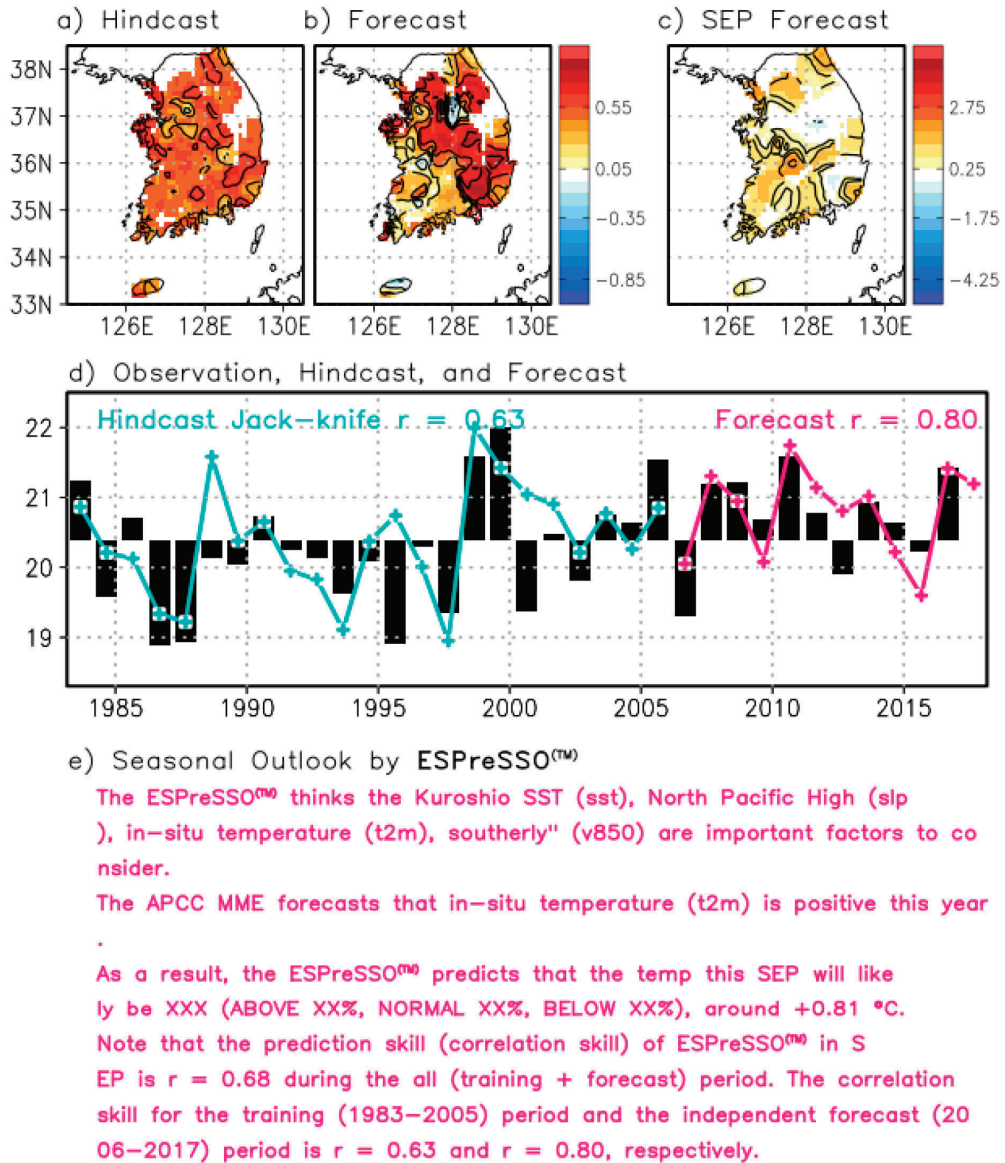
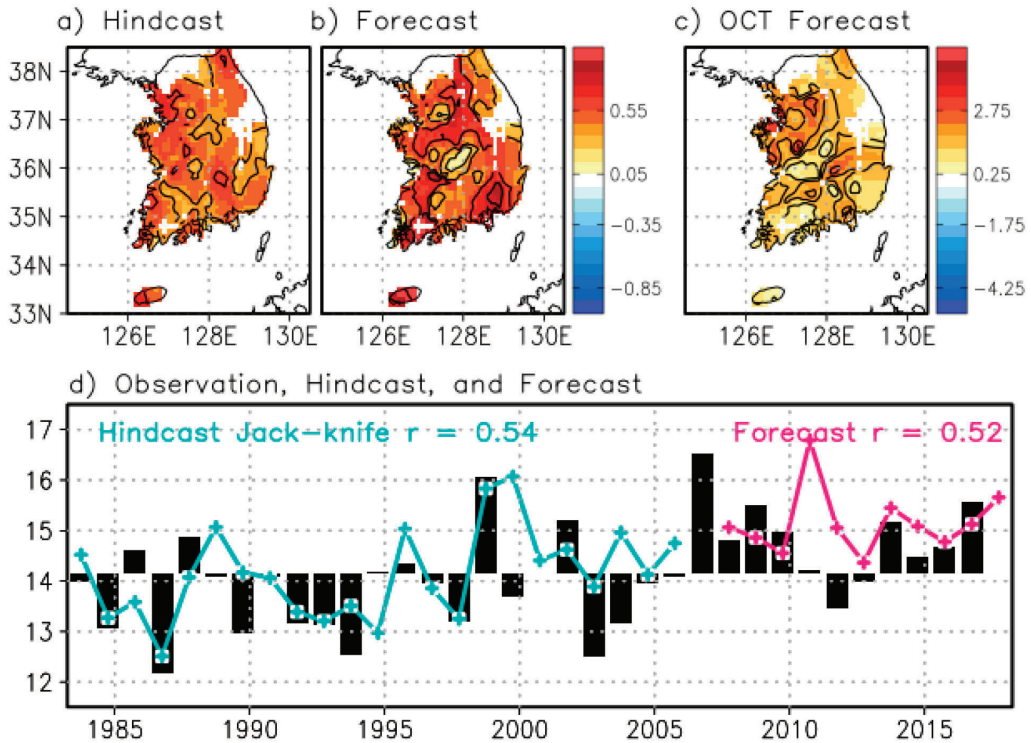


그림 19. 그림 11과 같으나 9월.



e) Seasonal Outlook by ESPreSSO^(TM)

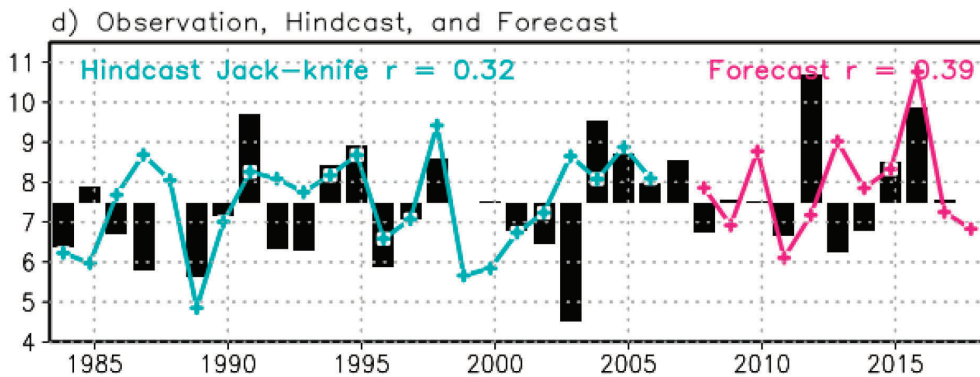
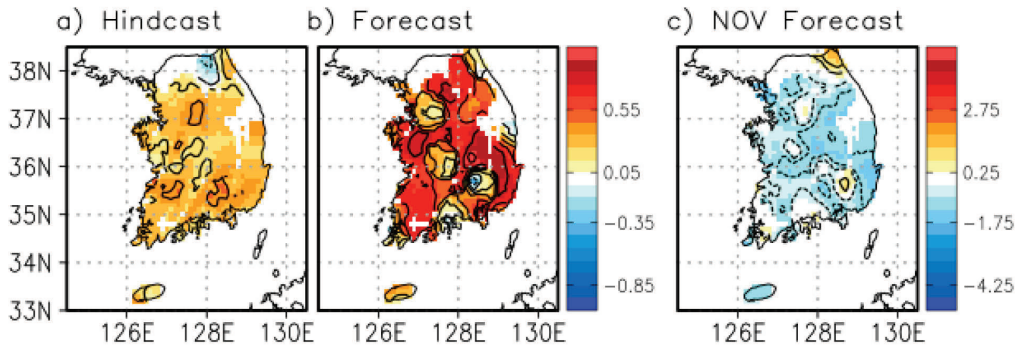
The ESPreSSO^(TM) thinks the low-level temperature (t850), in-situ temperature (t2m), North Pac westerly (u850), Arabian precipitation (prec) are important factors to consider.

The APCC MME forecasts that low-level temperature (t850) is positive, in-situ temperature (t2m) is positive, North Pac westerly (u850) is positive, Arabian precipitation (prec) is positive this year.

As a result, the ESPreSSO^(TM) predicts that the temp this OCT will likely be XXX (ABOVE XX%, NORMAL XX%, BELOW XX%), around +1.52 °C.

Note that the prediction skill (correlation skill) of ESPreSSO^(TM) in OCT is $r = 0.53$ during the all (training + forecast) period. The correlation skill for the training (1983–2005) period and the independent forecast (2006–2017) period is $r = 0.54$ and $r = 0.52$, respectively.

그림 20. 그림 11과 같으나 10월.



e) Seasonal Outlook by ESPreSSOTM

The ESPreSSOTM thinks the South China Sea convection (prec), SCS SLP (slp), SE Asian temperature (t2m), meridional wind (SE) (v850), meridional wind (SW) (v850) are important factors to consider.

The APCC MME forecasts that South China Sea convection (prec) is positive, SCS SLP (slp) is negative, SE Asian temperature (t2m) is positive, meridional wind (SW) (v850) is negative this year.

As a result, the ESPreSSOTM predicts that the temp this NOV will likely be XXX (ABOVE XX%, NORMAL XX%, BELOW XX%), around -0.63 °C.

Note that the prediction skill (correlation skill) of ESPreSSOTM in NOV is $r = 0.34$ during the all (training + forecast) period. The correlation skill for the training (1983–2005) period and the independent forecast (2006–2017) period is $r = 0.32$ and $r = 0.39$, respectively.

그림 21. 그림 11과 같으나 11월.

ESPreSSO-KR을 통해 정리된 월별 주요 인자는 다음 표 1에 정리되어 있다. 이는 실제 계절 기후에 영향을 미치는 역학적인 정당성을 갖는 인자 중 APCC MME에서 어느 정도 예측력 있게 모의되고 있는 인자를 전문가들이 선택한 것을 기반으로 하며, 이러한 정보는 향후 APCC MME 기반의 상세화 도구를 개발하는 데 유용하게 사용될 수 있다.

표 1. ESPreSSO-KR에서 추출된 월별 주요 인자의 변수와 위/경도 및 설명

Mon	Var	Longitude		Latitude		Description
1	sst	142.5	177.5	20.0	37.5	Kuroshio SST
	z500	125.0	160.0	32.5	47.5	high pressure (z500) over the East Sea
	t2m	122.5	145.0	27.5	47.5	in-situ temperature
2	slp	77.5	125.0	32.5	57.5	north eastern Eurasian pressure
	v850	107.5	135.0	35.0	55.0	low-level southerly wind
	t2m	117.5	147.5	27.5	42.5	in-situ temperature
	prec	115.0	147.5	35.0	52.5	In-situ precipitation
3	t2m	107.5	142.5	27.5	42.5	in-situ temperature
	t850	130.0	162.5	30.0	47.5	low-level temperature to the east
	sst	222.5	252.5	7.5	22.5	seasonal foot-print SST
4	t850	70.0	112.5	32.5	47.5	temperature to the west (China)
	v850	132.5	160.0	15.0	32.5	meridional wind
	sst	250.0	282.5	-17.5	2.5	ENSO sea surface temperature
	sst	47.5	75.0	-7.5	12.5	Indian Ocean sea surface temperature
	prec	245.0	277.5	-15.0	0.0	ENSO precipitation
	t2m	70.0	152.5	27.5	47.5	in situ temperature
5	t850	112.5	142.5	-2.5	20.0	subtropical western Pacific temperature
	v850	105.0	127.5	40.0	62.5	southerly wind
	z500	115.0	150.0	32.5	52.5	in-situ high pressure
	slp	125.0	170.0	32.5	55.0	local high sea level pressure
6	u850	107.5	157.5	32.5	60.0	zonal wind over East Asia
	t850	87.5	175.0	10.0	47.5	air temperature near Korean peninsula
	sst	157.5	217.5	10.0	45.0	sea surface temperature in the North Pacific
7	prec	100.0	127.5	12.5	30.0	South China precipitation
	v850	152.5	187.5	15.0	50.0	Kuroshio extension southerly (-)

표 1. ESPreSSO-KR에서 추출된 월별 주요 인자의 변수와 위/경도 및 설명(계속)

Mon	Var	Longitude		Latitude		Description
8	u850	105.0	220.0	47.5	62.5	low-level zonal wind to the north
	sst	115.0	155.0	27.5	47.5	local and near SST
	v850	117.5	137.5	27.5	47.5	southerly wind
9	sst	157.5	200.0	27.5	42.5	Kuroshio SST
	slp	165.0	210.0	7.5	40.0	North Pacific High
	t2m	120.0	137.5	27.5	47.5	in-situ temperature
	v850	117.5	137.5	17.5	35.0	southerly wind
10	t850	112.5	155.0	15.0	40.0	low-level temperature advection
	t2m	122.5	147.5	22.5	40.0	in-situ temperature
	u850	152.5	212.5	40.0	57.5	North Pac westerly
	prec	42.5	77.5	5.0	35.0	Arabian precipitation
11	prec	110.0	140.0	10.0	32.5	South China Sea convection
	slp	110.0	137.5	10.0	37.5	South China Sea sea level pressure
	t2m	90.0	122.5	5.0	32.5	SE Asian temperature
	v850	122.5	147.5	12.5	32.5	meridional wind (SE)
	v850	100.0	122.5	15.0	37.5	meridional wind (SW)

4.2 ESPreSSO-KR의 예측 성능 평가 및 검증

이 장에서는 ESPreSSO-KR이 예측한 월별 기온 결과와 실제 관측 기온, 그리고 기반 역학 모형의 리드별/월별 예측 성능을 비교하여 살펴보고자 한다. 표 2는 2017년 관측된 한반도 평균 기온 편차와 3-분위 범주, 그리고 ESPreSSO-KR의 기온 예측 결과를 요약하여 나타낸 것이다. 지난 2017년의 ESPreSSO-KR의 결정 예보 값과 1월-11월 관측 기온 편차와의 상관 계수 스킵은 $r = 0.63$ 으로, ESPreSSO-KR은 의미있는 예측 성능을 보유한 것으로 판단할 수 있다(검증 기간이 짧으므로 해석에 주의). 한편, 3-분위 예보로 전환된 ESPreSSO-KR의 적중률은 지난 열 달 동안 75-85%로, 매우 높은 성능을 보여주고 있다. 오차(RMSE)는 0.85°C 수준으로, 평균적인 오차는 1°C 이내로 평가할 수 있다. 다만, 겨울과 이른 봄철까지는 예측이 매우 정확했던 반면, 여름철 예측은, 비록 3-분위 예보는 모두 정확히 예측하였으나, 결정 예보 값의 오차가 상대적으로 큰 것을

볼 수 있다. 전체적으로 12개월 중 9개월을 정확히 예측하였고, 나머지 3개월은 한 범주만 벗어나게 예측하였다. 그 중 4월-7월의 예측이 상대적으로 오차가 컸는데, 이는 기반 역학 모형의 한계와 복잡한 기후 시스템의 영향으로 여겨진다. 한편, 지난 2017년은 온난화의 영향으로 인하여 대부분의 달이 양의 온도 편차를 보였으나, 때로는 평년과 비슷한 경우도 존재했다. 흥미롭게도 EPreSSO-KR 역시, 이러한 추세를 적절히 예측하였으며, 평년보다 더웠던 달은 물론 평년과 비슷했던 달에서도 비슷한 예측 성능을 보였다. 그러나 한 해의 실행으로 성능을 판단하기에는 무리가 있으므로, 표 3에서 결정 예측의 월별 상관 계수 스킬을 제시하였다. 첫 줄은 훈련 기간에서 나타난 관측과 교차 검증 예측 값의 상관 계수, 둘째 줄은 독립적인 예측(검증) 기간의 상관 계수, 그리고 마지막 줄은 두 기간을 모두 합쳐 구한 상관 계수 스킬을 보여준다. 대체적으로 상관 스킬은 0.4-0.8 구간에 분포하며, 모든 달을 통틀어 안정적인 모습을 나타낸다. 훈련 기간의 스킬은 향상되도록 디자인 된 것이기에 그 값을 직접적인 성능으로 평가하기는 어려우나, 훈련 기간의 스킬과 독립적인 예측 기간의 스킬이 비슷하다면, 이는 안정적인 예측 인자 선정이 이루어진 것에 대한 지표로 생각할 수 있다. 표 3에 나타난 바와 같이, EPreSSO-KR의 훈련 기간과 예측 기간의 성능은 전체적으로 크게 다르지 않으며, 따라서 전문가의 개입을 통해 실제로 의미 있는 기후 시그널을 적절히 추출하였다고 결론적으로 평가할 수 있다.

표 2. 관측 기온 편차/분위와 EPreSSO-KR 기온 예측 결과

2017		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	RMSE
관측	편차	1.1	0.5	0.4	1.7	1.5	0.6	1.9	0.3	0.1	1.0	-0.8	-1.8	
	분위	+	0	0	+	+	+	+	0	0	+	-	-	
EPreSSO	+1	1.42	0.52	0.45	0.53	0.37	1.54	0.00	0.48	0.81	1.52	-0.63	-2.21	0.85
		+	0	+	+	+	+	0	0	+	+	-	-	9/3/0

표 3. EPreSSO-KR의 월별 예측 성능(correlation skill)

2017		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Period
EPreSSO	+1	0.53	0.52	0.73	0.63	0.57	0.45	0.51	0.65	0.63	0.54	0.32	0.52	HIND
		0.40	0.43	0.87	0.58	0.86	0.59	0.58	0.78	0.80	0.52	0.39	0.14	FORE
		0.47	0.49	0.77	0.60	0.69	0.53	0.53	0.69	0.68	0.53	0.34	0.38	TOTAL

ESPreSSO-KR의 예측 성능과 안정성을 위 표에서 확인할 수 있었다면, 이러한 성능 향상이 기반역학 모형에 비하여 얼마나 나타나는지 살펴볼 필요가 있다. 표 4는 기반역학 모형(APCC MME)의 850 hPa 해당 좌표(한반도를 포함하는 4개의 좌표의 변수 값을 단순 산술 평균) 기온과 실제 관측 값 시계열 사이의 상관 계수를 리드별/월별로 살펴본 것이다. 대부분의 경우, 기반역학 모형은 중위도 지역의 기후를 적절히 예측하지 못하며, 특히 한반도의 기온(혹은 강수)의 직접적인 예측 성능은 높지 않다는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 역학 모형에서 사용되지 않은 경계 조건(해빙, 눈덮임)과 모수화 과정 등에서 나타나는 모형의 계통적 편이 및 예측 성능의 한계에 의한 것으로, ESPreSSO는 이들 중 계통적 편이만을 보정하는 역할을 하게 된다. 표 4과 표 3를 비교해보면, ESPreSSO-KR의 성능이 기반역학 모형의 직접적인 성능에 비해 크게 향상된 것을 볼 수 있다. 흥미로운 점은, 이러한 성능 향상이 기반역학 모형의 직접적인 성능에 관계없이 이루어진다는 것이다. 즉, 기반역학 모형의 직접적인 성능이 떨어지는 경우, 전문가가 표적 변수를 지배하는 대규모 현상 중에서 모형이 표현 가능하고 예측성을 가진 원격예측 인자를 선정하게 되어, 모형에서 나타나는 계통적 편이와 원격 상관 모의 실패를 극복하게 된다. 결과적으로 ESPreSSO의 성능은 기반역학 모형의 직접적인 성능과 무관하게 안정적이고 고른 예측 성능을 보일 수 있다.

표 4. 기반역학 모형(APCC MME)의 리드별/월별 예측 성능(T850, correlation skill)

2017		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Period
MME (T850)	+1	0.37	0.43	0.07	-0.15	0.15	0.09	0.53	0.37	0.09	-0.07	0.19	0.05	HIND
		0.33	0.65	0.62	-0.45	-0.33	-0.37	0.07	0.09	0.23	-0.24	-0.28	-0.20	FORE
		0.33	0.54	0.32	-0.07	0.24	0.11	0.34	0.36	0.21	0.10	0.28	0.07	TOTAL
	+2	0.02	0.00	0.07	-0.07	0.24	0.15	0.54	0.43	0.09	-0.23	0.10	-0.22	HIND
		0.20	0.14	0.55	-0.08	-0.33	-0.32	-0.38	0.34	-0.07	0.11	-0.06	0.17	FORE
		0.11	0.38	0.40	-0.01	0.27	0.18	0.21	0.44	0.32	0.01	0.25	-0.01	TOTAL
	+3	0.07	0.10	-0.41	0.25	0.19	-0.01	0.43	0.38	0.13	-0.06	0.27	-0.16	HIND
		0.34	0.02	0.52	-0.38	-0.04	-0.09	0.10	0.12	0.08	0.38	-0.67	-0.14	FORE
		0.14	0.22	0.55	0.27	0.28	0.11	0.28	0.35	0.38	0.15	0.29	-0.01	TOTAL

4.3 프로젝트의 기타 성과물

상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템(ESPreSSO) 구축 프로젝트의 결과물은 APCC 예보 토의에 ESPreSSO-KR의 예측 값 및 자연어 전망을 제공함으로써 APCC의 계절 기후 예측 능력 향상에 직접적으로 기여하고 있다. 한편, 전문가의 지식이 데이터베이스화되어 필요에 따라 쉽게 접근할 수 있게 되었으며, 전문가의 조합에 영향을 받지 않는 안정적인 예보가 가능하게 되었다. 예측 성능의 향상과 안정적인 예측 수행이라는 점에서도, 위에서 살펴본 바와 같이 ESPreSSO-KR은 기대 이상의 성과를 올리고 있는 것으로 평가한다. 또한, 단지 예측 값 제공에 그치는 것이 아니라, 주요 예측 인자를 정리하고 진단함으로써 사용자의 이해도 함께 증진시키는 역할을 하고 있다.

기본적인 성과물 이외에도, 기대 이상의 성과가 도출되고 있는데, 본 연구에서 구축한 ESPreSSO의 방법론은 대한민국 특허로 출원(출원번호 10-2016-0166833)되어 검토 중인 상태다. 또한 연구 과정에서 ESPreSSO 구성과 그 배경 기후 분석에 관한 내용을 정리하여 학술 논문을 통하여 학계에 보고하고 있다. 현재 여름철 한반도 기온에 관한 논문이 출판되었고, ESPreSSO 구성에 관한 논문이 심사 중이며, 겨울철 한반도 계절 예측에 관한 논문을 작성 중이다.

* 논문 목록:

- Kim, W., S.-R. Yeo, and Y. Kim (submitted), Development of the expert seasonal prediction system: An application for the seasonal outlook in Korea, Asia-Pac. *J. Atmos. Sci.*
- 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. doi:10.1002/2017JD026458.
- Kim Y., S.-R. Yeo, and W. Kim (in preparation) Expert seasonal prediction system: Winter monthly prediction in Korea, Asia-Pac. *J. Atmos. Sci.*

또한 ESPreSSO-KR의 구성 방법론과 예측 수행 결과를 유럽 지구과학 학회(2017년 4월, EGU2017 AS1.1 EGU2017-10829 X5.206)와 기상청 여름철 과제 워크샵(2017년 1월, 용인) 등을 통하여 외부 전문가들과 공유하였고, 이로부터 좋은 반응을 얻기도 하였다. 한편 내년도 상세화 프로젝트와 관련하여 표 1에 정리된 내용을 바탕으로 통계적 상세화 도구를 개발하는 데 협력할 예정으로 범용성 있는 확장이 가능함을 입증하였다.

5. CONCLUDING REMARKS

이 연구를 통하여 우리 센터의 역학 다중 모형 앙상블 계절 예측을 기반으로 전문가의 지식을 통합하여 상세화한 한반도 월별 기온 예보를 생산하는 시스템(ESPreSSO-KR)을 구축하였다. 이를 통하여 예측성이 높고 안정적인 기온 예측을 수행하고 있으며, 2017년 예측 수행 결과, 기반 역학 모형에 비해 예측성이 크게 향상되고 안정적인 예측을 수행하고 있는 것을 확인하였다. 이러한 ESPreSSO-KR의 예측 참여를 통하여, 한반도 기온 예측 정확성이 향상되고, 안정적인 예측을 바탕으로 장기적인 성능 평가가 가능하게 되며, 전문가의 지식에 기반한 예보 가이던스 제공이 가능하게 되었다. 한편, ESPreSSO가 생산한 결과와 그 데이터베이스는 내년도 상세화 과제의 주요 인자로 사용될 계획으로, 활용성 측면에서도 괄목할 만한 성과를 이루고 있다. 그 밖에도 연구 논문, 특허 및 학회 발표를 통하여 연구를 통해 얻어진 지식을 공유하고 있다. 1차년도 모형 구성을 바탕으로, 2차년도에서는 확률 예보 및 리드별 예보를 제공할 계획이며, 한반도 영역의 강수 예측에 대한 관심을 반영하여 강수 예측을 시도할 예정이다.

이 연구의 결과물인 ESPreSSO 시스템은 현재 우리 센터의 역학 다중 모형 앙상블 계절 예측에서 모의 가능한 시그널을 이용하여 예측을 수행하고 있다. 그러나, 기반 역학 계절 예측 모형은 최근 그 중요성이 부각되고 있는 고위도 지역의 기후 강제 인자(해빙, 눈덮임, 토양수분 등)와 성층권 과정 등을 포함하지 않아 실제 예측성의 한계로 이어질 가능성이 있다. 그러나 ESPreSSO의 방법론을 확장하면, 기반 역학 모형이 예측할 수 없는 기후 인자(해빙, 눈덮임, 성층권 등)를 관측 기반으로 통합하여 예측 정확도를 향상시킬 수 있다. 이러한 정보 통합 과정은 우리 센터에서 생산되는 다양한 종류의 기후 정보에도 확장하여 적용할 수 있어, 기후 정보 통합 플랫폼의 중요 기능으로 자리잡을 것으로 기대한다.

【연구자】

김원무 선임연구원

여새림 선임연구원

김유진 선임연구원

연구보고서 2017-06

상세화 기법을 응용한 한반도 전문가 계절 예측 시스템

I S B N 979-11-5698-196-1

발 행 2018년 3월

발 행 인 정 홍 상

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.