

APCC-MME를 이용한 동북아시아 여름몬순 물리-경험 계절 예측 모형 개발

Development of a physical-empirical seasonal forecast model for the
northeastern Asian summer monsoon using APCC-MME

김유진

APCC-MME를 이용한 동북아시아 여름몬순 물리-경험 계절 예측 모형 개발

Development of a physical-empirical seasonal forecast model for the
northeastern Asian summer monsoon using APCC-MME

김유진

발간사

APCC는 세계 유수의 기후예측기관들로부터 예측정보를 수집하여 다중모델 앙상블 기법을 사용하여 어느 단일 역학 모델보다 정확도 높은 전지구 기후 계절예측 정보를 생산해 오고 있습니다. 이러한 APCC의 전지구 계절 예측 정보는 여러 국가 기상청에서 자국에 대한 계절예측 정보를 생산하는데 활용하고 있습니다.

문제는 APCC 다중모델 기법을 이용한 전지구 계절예측자료가 어느 단일 모델보다 향상된 예측정보를 제공한다고 하여도, 동북아시아 지역 여름철 강수와 같이 특정 국가, 지역의 특정 계절 기후변수에 대해서 전반적인 역학모델의 한계 혹은 해당 기후변수의 특성으로 인해 실질적인 예측 정보의 신뢰성이 낮다는 것입니다.

동북아시아 지역에서는 여름 몬순으로 여름철에 많은 강수가 발생하는 특징이 있고 이는 이 지역의 자연 환경 뿐 아니라 경제, 농업, 수자원 활용 등 많은 분야에 큰 영향을 미치고 있습니다. 따라서 동북아시아 여름철 강수는 계절 예측이 중요한 기후 현상 중 하나이고 이에 대한 신뢰성 높은 예측 정보는 전방위적으로 활용될 수 있습니다. 따라서 APCC 다중모델 앙상블 예측자료를 동북아시아 여름 강수에 맞춰 통계적으로 향상시키는 연구는 꼭 필요합니다.

본 연구보고서 “APCC-MME를 이용한 동북아시아 여름 몬순 물리-경험 계절 예측 모델 개발”에는 동북아시아 지역 여름철 강수 예측의 정확성과 활용성을 향상시키기 위해 APCC-MME를 이용한 통계적 모델의 개발 내용을 담고

있습니다. APCC에서는 지난 2015년 “통계계절예측 시스템을 이용한 중위도 동아시아 여름몬순 예측성 향상”을 발간한 바 있는데, 이와 시리즈로 2016년에는 APCC-MME를 이용하여 현업에서의 활용성을 높이는 방향으로 시스템을 개발하였습니다. 이는 관련 분야 예보관들에게 활용할 수 있는 정보가 추가되었다는 점에서 고무적인 일이며 계절예측 모델을 한국 여름철 월별 강수 예측에 적용할 수 있는 방안을 개발하여 지역적 계절 예측정보의 활용성을 높였다는 측면에서도 의미가 크다고 할 수 있습니다.

마지막으로 본 연구를 수행해 주신 김유진 박사의 노고에 감사드립니다. 또한 보고서가 발간되기 위해 APCC-MME를 생산하고 기후감시 자료를 수집, 정리하여 연구를 진행하는데 큰 도움이 되어 준 APCC 기후예측팀에게도 감사드립니다. 본 연구보고서가 지역적으로 맞춤형 계절예측 정보 생산 관련 연구에 일조하여 사용자들의 의사결정에 직접 도움이 되는 보다 향상된 고품질 기후 예측 정보를 제공하고자하는 APCC의 목표에 다가가는 초석이 되길 바랍니다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

This study develops a physical-empirical seasonal forecast model for the northeastern Asian summer monsoon. Through this model, summer (June, July and August) precipitation in mid-latitude East Asia is predicted. Multivariate Empirical Orthogonal Function analysis (MEOF) is adapted to define the summer monsoon. The three leading MEOF modes from 850-hPa geopotential height and precipitation represent the summer monsoon. The first mode represents the variation through the western North Pacific subtropical high (WNPSH) in the mid-latitude East Asia. The WNPSH is a prominent component in East Asia that could also affect the mid-latitude area. The second mode represents the zonal wave transport of geopotential height and surface temperature through the Eurasian Continent. The northeastern Asian summer monsoon in the downstream region is influenced by the zonal wave transport. The last mode represents the variation by dipole pattern over the Okhotsk Sea and south side of Japan. Collectively, these three modes account for a large portion of the variability of the northeastern Asian summer monsoon.

The lead-lag correlations between principle component (PC) time series from MEOF and surface variables (2-m temperature, sea level pressure) from observation during winter and spring are analyzed to select predictors. In addition to this, simultaneous correlations between PCs and summer prediction fields of 500-hPa geopotential height, 850-hPa temperature, precipitation by APEC Climate Center (APCC)-Multi model ensemble (MME) system are also examined. Through stepwise regression function, two predictors are selected for each PC. These predictors reveal

the physical evolving processes of the northeastern Asian summer monsoon separately.

Independent prediction is conducted from 1983 to 2005 through 1-leave-out cross-validated strategy. During this period, the forecast skills for PCs are 0.76, 0.69, and 0.73, respectively. The predicted PCs and spatial patterns of MEOF are reconstructed to make the spatial prediction fields of precipitation. The area averaged prediction skill of the precipitation over mid-latitude East Asia in terms of temporal correlation coefficient is 0.41, which shows moderate improvement of forecast skill from that by only dynamical models (0.21).

Independent prediction is conducted from 2008 to 2016. Using the predicted PCs, real-time forecast for Korea precipitation can be improved. The second and third modes are closely related to August Korea precipitation: strong cyclonic flow over the northeastern China brings a moisture flux convergence over Korea, and a strong anticyclonic flow over the south of Japan draws a humid southerly wind over Korea. Thus, the prediction of the northeastern Asian summer monsoon can be adapted to the national-scale real-time forecast.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	5
2.1 연구 자료	5
2.1.1 관측 자료	5
2.1.2 역학 모델 자료	5
2.2 동아시아 여름 몬순의 정의	6
2.3 예측 방법	6
2.3.1 잠재 예측 인자 선정	6
2.3.2 예측 인자 선정	9
2.3.3 예측과 후측 모의 검증	9
3. 중위도 동아시아 여름 몬순	11
3.1 첫 번째 모드 : 북서태평양 고기압	11
3.2 두 번째 모드: 중위도 파동 전파	15
3.3 세 번째 모드: 오호츠크해 저기압 모드	18
3.4 역학 모델에서의 동아시아 여름 몬순	21
4. 예측	25

4.1 예측 인자 선정	25
4.2 예측과 검증	30
5. 결론	36
Ⅱ REFERENCE	38

1. 서론

동아시아 여름몬순은 여름철 동아시아 지역 해양과 대륙의 비열 차이로 발생하는 대기 순환 현상으로 해당지역에 많은 강수를 유발한다. 동아시아 지역은 대체적으로 여름 몬순 기간에는 우기, 겨울 몬순 기간에는 건기로 구분되고, 우기에 일 년 중 대부분의 강수가 발생하기 때문에 동아시아 여름 몬순은 국가의 수자원 관리와 농업, 계절 산업 등 여러 분야에 중요한 영향을 끼친다.

따라서 동아시아 몬순과 같은 계절 기후의 정확한 예측 정보는 국가의 기후 대응 능력을 향상시키고 관련된 산업과 농업, 수자원 관리를 효과적으로 운영하기 위한 기본이라고 할 수 있다. 이를 위해 한국을 비롯한 많은 나라에서 기상청과 같은 현업 기관을 운영하고 계절 예측 정보를 공공의 서비스로 제공한다. 또한 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)의 지원으로 전지구 기후 모델을 운영하고 이를 바탕으로 전세계를 대상으로 계절 예측 자료를 생산하는 센터들(Global Producing Centers; GPCs)도 있다. APEC (Asia Pacific Economic Cooperation) Climate Center(APCC)나 WMO Lead Center for Long-Range Forecast(LC-LRF)에서는 하나의 기후 모델만이 아니라 여러 역학 모델 자료를 수집하고 다중 모델 앙상블(Multi-Model Ensemble; MME) 기법을 적용하여 계절 예측 자료를 생산하기도 한다. 이러한 MME 기법은 다양한 모델들 간의 독립성이 보장될 때 성능이 뛰어난 단일 모델보다 유의미한 예측 성능의 향상을 기대할 수 있다는 과학적 합의가 있다.

위와 같은 현업 기관에서 생산하는 계절 예측 자료는 전 지구 기후 모델, 즉 역학 모델을 바탕으로 한다. 하지만 많은 역학 모델들이 현실적으로는 수요자가 기대하는 만큼의 예측의 정확성을 담보하지 못하고 있어 이를 보정하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 특정한 시기, 지역에 맞는 계절예측 정보를 생산하기 위해 역학 모델의 후처리(post-processing)가 필수적이다. 이와 별도로 역학 모델에 의존하지 않거나 부분적으로 의존하며 과거 관측 자료를 바탕으로 미래를 예측하는 통계적 예측도 현업 기관의 계절 예측에서는 널리 쓰이는데, 특히 역학 모델의 예측성이 상대적으로 낮은 중위도나 고위도 지역의 온도, 강수나, 물리적 과정이 잘 정리되어 나타나는 기후 인자에 대한 예측에 쓰인다(예: 각 나라 기상청의 기온, 강수 계절 예측, Climate Prediction Center의 ENSO 예측).

본 연구에서는 역학 모델의 MME 기법으로 전 세계적으로 우수성을 인정받고 있는 APCC-MME와 통계적 예측 방법을 통합적으로 이용하여 동아시아 지역에서 중요한 여름철 몬순을 예측하고자 한다. APCC에서는 매달 약 16개의 모델을 수집하여 MME 기법으로 결정론적, 확률론적 온도, 강수 예측 자료를 생산한다(<http://www.apcc21.org/ser/outlook.do?lang=en>). 2007년부터 매달 3개월 선행하는 500-hPa 지위 고도, 850-hPa 기온, 강수의 월별 예측 자료를 생산하여왔다(Min et al., 2014). 2016년 현재는 이들에 더하여 3개월, 혹은 6개월 선행하는 해수면온도, 2m-기온 등의 월별 계절 예측장을 생산한다. 이에 더해 APCC에서는 매달 생산되는 MME set에 맞는 후측 모의(hindcast) 또한 생산하여 이에 대한 검증 정보를 제공한다(<http://www.apcc21.org/ser/fore.do?lang=en>).

매달 규칙적으로 계절 예측 자료를 생산하고 있는 안정적인 APCC-MME 자료에 적절한 통계적 예측 방법을 적용한다면 안정적이고 활용성이 높은 계절 예측 자료를 생산할 수 있다. 또한 이러한 통합적 방법은 역학 모델에서 예측성과 안정성이 상대적으로 낮은 동아시아 여름 강수의 예측 성능을 높이기 위한 효과적인 접근 방법이다.

통계적 예측의 일반적 방법은 대상을 예측할 수 있는 예측 인자(predictor)를 과거 관측 자료에서 찾아 이 관계가 미래에도 계속될 것이란 가정 하에 대상-예측 인자의 관계를 미래에 투영하는 것이다. 본 연구에서도 이 방법론을 적용하고자 한다. 다만, 통계 예측에서의 이런 기본 전제는 대동소이하다 하더라도 이를 실제로 각각의 예측에서 적용하는 방법은 무수히 많고 이를 적절히 설계하는 것이 통계 예측의 핵심이다. 본 연구에서는 과거 관측 자료뿐만 아니라, 역학 모델에서도 예측 인자를 찾도록(예: APCC-MME 500-hPa 지위 고도, 강수, 850-hPa 기온) 시스템을 구축하여 예측 성능을 높이는 방향으로 설계하였다. 예측 인자를 APCC-MME에서도 찾는 것은 예측 변수(predictand)와 인자의 자연 상관관계뿐만 아니라 역학 모델 예측장에서의 동시 상관관계까지 통합적으로 예측 인자로 활용할 수 있도록 한다. 역학 모델이 예측 변수가 되는 동아시아 여름 몬순과 관련된 역학적 과정을 비교적 명확하게 예측하는 경우, 혹은 동아시아 여름 몬순과 과거 관측 자료와의 자연 상관관계가 명확하지 않은 경우에 역학 모델에서 인자를 찾는 것은 최선책 혹은 차선책이 되어 예측 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 이에 대한 자세한 방법과 장점, 단점에 대해서는 본 연구에서 사용한 자료에 대한 설명과 함께 2장에서 서술하겠다.

본 연구에서 예측하고자 하는 동아시아 여름 몬순은 계절 예측 분야에서는 매우 어렵고도 까다로운 목표 중 하나이다. APCC-MME로 예측한 여름 동아시아 지역 예측성을 확인하기 위해 Fig. 1에 예측 검증 기술 중 하나인 TCC(Temporal Correlation Coefficient)를 제시하였다. 비교 대상인 강수 관측 자료는 Global Precipitation climatology Project(GPCP) v.2.2(Huffman et al., 2011)이다. Fig. 1을 통해 이 지역 예측성이 매우 낮은 것을 알 수 있는데 이는 앞에서 기술하였듯이 역학 모델에서 예측 성능이 낮은 중위도 지역에 위치하기도 하고, 아직은 모수화가 정확하게 되지 않은 수문 순환이 포함되어 있기 때문이기도 하다. 참고로 이 지역 공간 평균 TCC는 0.21로 유의미한 예측성을 기대할 수 없다. 또한 동아시아 여름 강수는 지역적 특성이 강하기 때문에 통계적으로 이 현상을 규명하는 것 또한 쉬운 일은 아니다. 그래서 이미 많은 연구에서 통계 모형과 기후 모델을 이용하여 동아시아 여름 몬순을 예측하였으나 상대적으로 중위도 지역에서의 몬순은 저위도 지역에서보다 예측성을 담보할 수 없었다(Wang et al., 2015). 그래서 예측 기술의 향상을 위해 역학 모델의 예측성이 좀 더 나은 저위도 지역의 정보를 차용하여 중위도 지역 몬순을 예측하는 기술을 개발하기도 하였다(Lee et al., 2015; Kwon and Lee, 2014).

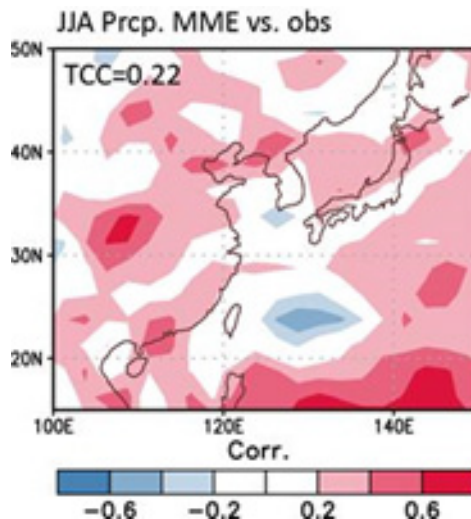


Figure 1 Temporal correlation coefficient map of precipitation from APCC-MME and observation (GPCP v.2). Summer mean during 1983–2005 period is used. Area-averaged TCC in the Northeast Asia is 0.22.

본 연구에서는 중국, 한국, 일본 등의 상대적으로 중위도 지역의 여름 몬순을 예측하기 위해 해당 지역의 몬순을 새로이 정의하였다. 개략적으로 설명하자면, 중위도 동아시아 지역 몬순을 정의하기 위하여 850-hPa 지위 고도와 강수를 다변량 경험적 직교함수(Multi-variate empirical orthogonal function; MEOF)로 풀어내어 이의 principal component(PC)를 예측 변수로 삼았다. 이는 여름 몬순에 의해 발생하는 강수뿐 만 아니라 강수 현상을 역학적으로 설명하는 지위 고도까지 고려함으로 강수에 관련된 물리 과정을 예측 변수에 포함하기 위해서이다(김유진, 2015). 동아시아 여름 몬순은 기본적으로 해양과 대륙의 비열차로 인한 대기 순환의 변화로 발생하기 때문에 기존 연구에서는 동아시아 여름 몬순을 정의하는데 주로 순환장을 중요시하였지만 본 연구에서는 강수의 예측의 정확성 향상을 위해 강수를 직접적으로 예측 변수에 포함하였다. 예측 대상 지역은 [100-150E, 15-50N]이다. 예측 변수를 정의하는 방법에 대한 자세한 설명은 2장에서, 분석은 3장에서 더 서술하도록 하겠다.

새로운 예측 시스템에서 선택된 예측 인자, 이를 이용한 방정식, 예측 결과와 예측성 검증은 4장에서 기술한다. 개략적으로 살펴보면, 예측성 검증은 후측 모의 자료를 생산하여 계산한다. 검증은 크게 두 기간으로 나누어 하는데, 첫 번째는 APCC-MME의 retrospective forecast 기간[1983-2005]이고, 두 번째는 real-time forecast 기간 [2008-2015]이다. retrospective forecast 기간에 고정하여 예측 대상인 동아시아 여름 몬순을 MEOF 분석을 통해 정의하고 예측 인자를 찾는 과정을 수행하였기 때문에 이 기간은 MEOF 분석에 대해, 예측 인자를 찾는 과정에 대해 비독립적이다. 다만 과대적합을 최대한 피하기 위해 예측 방정식을 세우는 과정에서는 1-leave-out cross validation을 하였다. 따라서 real-time forecast 기간에 대해서는 MEOF 분석에 대해, 예측 인자를 찾는 과정에 대해 독립적인 예측 방정식을 찾을 수 있다. 그리고 이를 한국 강수 예측에 활용할 수 있다. 자세한 설명은 4장에서 하겠다.

본 연구의 목표는 중위도 동아시아 지역 여름철 강수의 계절 규모 예측이다. 이를 위해 과거 관측 자료, 다중 역학 모델인 APCC-MME를 활용하여 물리적-경험적 예측 모델을 개발하였다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 연구 자료

2.1.1 관측 자료

예측 대상인 동아시아 여름 몬순을 정의하기 위해서는 관측 자료를 사용하였다. 이를 위해 850-hPa 지위 고도와 강수 자료가 필요하다. 대기 자료는 National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy(NCEP-DOE) reanalysis 2(R2)(Kanamitsu et al., 2002)를, 강수 자료는 주로 위성관측을 기초로 한 Global Precipitation climatology Project(GPCP) v.2.2(Huffman et al., 2011)을 사용하였다. 두 자료 모두 위성 관측이 활발하게 되었던 1979년부터 자료가 있고 현재까지 계속 업데이트 되고 있다.

과거 관측 자료와 예측 대상과의 지연 상관관계는 예측 인자를 찾고 예측 방정식을 세우기 위해 계산하였다. 관측 자료에서의 예측 인자는 겨울, 봄의 표면 기온(2-m air temperature)과 해면 기압장(sea level pressure)을 이용한다. 두 변수는 NCEP-DOE R2에서 추출하였다.

2.1.2 역학 모델 자료

예측 인자의 또 다른 출처는 APCC-MME이다. APCC-MME는 1983년부터 2005년까지 23년 동안의 다중 모델 공통의 retrospective forecast 자료가 있다. 2007년부터 9월부터 3개월 선행하는 월별 real-time forecast를 시작하여 현재에 이르고 있다(Min et al., 2014). 따라서 2008년부터 2016년 까지 9년 동안의 여름철 real-time forecast를 확보할 수 있다. 변수는 500-hPa 지위 고도, 강수, 850-hPa 기온이다. 현재는 2-m 기온, 해면 기압장, 해수면 온도의 월별 예측장을 생산하고 있으나, 이는 2012년부터 시작하여 검증할 수 있는 real-time forecast의 기간의 확보가 용이하지 않아 지양한다. 따라서 APCC-MME는 세 가지 변수에 대해 1) retrospective 예측 기간[1983-2005], 2) real-time 예측 기간[2008-2015]이 사용된다.

2.2 동아시아 여름 몬순의 정의

본 연구의 예측 대상은 중위도 동아시아 여름 몬순에 의한 강수이다. 동아시아 여름 몬순을 정의하는 데는 여러 방법이 있는데 Wang et al.(2008)의 표1에 잘 정리되어 있다. 이 연구에 의하면 대부분의 여름 몬순 정의는 순환장의 강도로 정의하는데 전통적으로 동아시아 적도에서부터 중위도까지 매우 넓은 남북 방향의 지역을 포함한다. 따라서 강수가 많고 변동성이 큰 저위도에서의 특성이 더 많이 드러나서 중국, 한국, 일본을 포함하는 중위도 지역의 몬순의 정보는 흐려질 수 있다. 또한 강수에 예측의 목적이 있다면, 이를 직접적으로 포함하는 예측 대상을 새로이 정의할 필요가 있다(김유진, 2015). 따라서 중위도 동아시아 지역인 [15-50N, 100-150E]의 850-hPa 지위 고도와 강수에 MEOF 분석을 적용하여 이의 PC를 예측 변수로 삼았다. 강수와 850-hPa 지위 고도는 여름철 평균(June-July-August)값을 사용하였고 모든 변수는 매달 기후값을 뺀 아노말리(anomaly)이다.

김유진(2015) 보고서에서도 850 hPa 지위 고도와 강수에 MEOF를 적용하여 동아시아 여름 몬순을 정의하였으나, 본 연구에서는 이전 연구에서와는 다르게 MEOF 적용 기간이[1983-2005]이다. 이는 APCC-MME의 공통 retrospective 기간[1983-2005]를 기저 함수로 삼기 위해서이다. 각 모드의 850-hPa 지위 고도와 강수의 공간 패턴, PC에 대한 해석은 3장에서 자세히 하도록 하겠다.

2.3 예측 방법

2.3.1 잠재 예측 인자 선정

앞서 설명하였듯이, 동아시아 여름 몬순을 예측하기 위해 예측 변수는 850-hPa 지위 고도와 강수의 MEOF의 PC들이다. 이 예측 변수들을 예측하기 위한 예측 인자의 후보군을 얻기 위해 각 시계열과 과거(겨울, 봄) 관측 자료 해수면 기압, 2-m 기온과의 지연 상관관계, 그리고 APCC-MME hindcast 자료, 500-hPa 지위 고도, 850-hPa 기온, 강수와의 동시(여름) 상관관계를 파악한다. 지연 상관관계는 여름철 몬순 PC와 각 관측 변수의 겨울(1-2월), 봄(3-4월), 그리고 겨울에서 봄으로의 tendency(봄-겨울) 아노말리의 상관관계를 의미한다. 즉, (1) 1-2월 아노말리의 평균

(2) 3-4월 아노말리의 평균, 그리고 (3) tendency는 (2)에서 (1)을 뺀 아노말리이다. 동시 상관관계는 여름철 몬순 PC와 5월에 예측된 역학 모델의 여름철 평균 예측장의 상관관계를 의미한다. 따라서 총 9장의 아노말리 공간에서 상관관계 지도를 얻을 수 있다. 공간 패턴에서 얻을 수 있는 예측 인자의 후보군은 Table 1에 정리했다.

Table 1 A candidate group for potential predictors from spatial pattern

Observation	1. JF SLP	2. MA SLP	3. MA-JF SLP
Observation	4. JF T2m	5. MA T2m	6. MA-JF T2m
Dynamical model	7. JJA 500-hPa GPH	8. JJA 850-hPa temp.	9. JJA precipitation

여기에서 해면 기압장과 2-m 표면 온도장의 지연 상관관계를 잠재 예측 인자로 사용한 것은 해면 온도장이나 알베도 같은 표면 경계 조건이 계절 규모 시간에서 지속되면서 계절 규모의 대기 변화나 몬순의 변동성의 일정 부분 강제력을 발휘할 수 있는 속성이 있기 때문이다(Charney and Shukla, 1981). 이러한 속성으로 인해 Wang et al.(2013), Lee and Seo(2013), Yim et al.(2014)와 같은 많은 논문에서 해면온도나 해면 기압장의 지연 상관관계가 계절 예측인자로 사용되었다. 역학 모델의 여러 변수를 동시 상관관계를 잠재 예측인자로 사용한 것은 바이어스를 가지고 여름 몬순을 예측하는 경우 그 특성을 이용하여 예측 인자로 사용하기 위함이다. 즉, 모델이 여름 몬순을 정확하게 예측하진 못하겠지만 적어도 그 시그널을 찾아 이를 예측에 활용하도록 하기 위함인데 이 때문에 역학 예측 모델의 후처리에 해당한다고도 할 수 있다.

그리고 이에 더해 동아시아 여름 몬순 일부 영향을 준다고 알려져 있고 북반구 중위도에서 에서 주요하게 나타나는 기후 지수, North Atlantic Oscillation(NAO), Pacific North America(PNA)의 지연 상관관계 또한 후보군으로 선정한다(Lee and Seo, 2013; Sung et al., 2006; Wang and Fu, 2000). 즉, 다시 말해, 겨울과 봄철의 기후 지수와 여름철 몬순 지수와의 상관관계를 계산하여 잠재 예측 인자 여부를 결정한다. 이는 대서양과 태평양 지역 선행 기후 조건이 차후 동아시아 지역에 계절적으로 영향을 끼칠 수 있다는 가정을 따른 것이다. 기후 지수에서 얻을 수 있는 예측 인자의 후보군은 Table 2에 정리했다. 이들 기후 지수는 National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center 에서 정리한 것을 얻었다

(http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh). 이들은 복잡하고 정형화되지 않은 대기 순환장에서 몇 주 혹은 몇 달까지 지속되는 중요하고 큰 패턴을 지수화한 것이다. 북반구 20-90N 500-hPa 지위 고도 정규화된 평균장에 Rotated Principal Component Analysis(RPCA) 기법을 적용하여 이 기후 지수들을 얻는데(Barnston and Livezey, 1987), 그 중 NAO와 PNA는 대서양과 태평양에서 주요하게 나타나는 모드이고 기존 연구에서 동아시아 지역 기후 변동과 연관이 있다고 잘 알려져 있어 선정하였다.

Table 2 A candidate group for potential predictors from climate indices.

Observation	1. JF NAO	2. MA NAO	3. MA-JF NAO
Observation	4. JF PNA	5. MA PNA	6. MA-JF PNA

다음 단계는 각각의 상관관계 지도에서 계수가 높은 지역이나 기후 인자 중 잠재 예측 인자를 선정하는 것이다. 상관관계 지도에서는 계수가 높은 지역의 공간 평균 시계열을 잠재 예측 인자로 정의한다. 잠재 예측 인자는 다음과 같은 조건을 만족하도록 선정하였다. 1) 알려진 물리 역학적 과정인 경우 우선적 고려, 2) 공간 패턴에서 잠재 예측 인자를 선정할 때는 상관관계가 높은 지역의 넓이가 지역적으로 국한되어 있지 않고 어느 정도 넓어야 함(예: 동아시아 지역, 동태평양 적도 지역), 3) 실제 여름철 관측장과 몬순 PC의 동시 상관관계가 높고, 이를 자연 상관관계나 역학 모델이 유사하게 재현하는 경우 이를 잠재 예측 인자로 선정한다. 예를 들어, 동아시아 여름 몬순과 여름철 중앙 태평양 적도지역 강수가 높은 상관관계를 보이고, 이 관계가 역학 모델에서 잘 모의되어 여름철 중앙 태평양 적도지역 강수와 높은 동시 상관관계를 보일 때 이 지역의 강수를 공간 평균하여 시계열을 정의하고 이를 잠재 예측 인자로 선정하였다. 상관관계를 시험하는 기간은 [1983-2005]로 23년이고, APCC-MME의 공통 retrospective 예측 기간과 일치한다.

각 PC의 잠재 예측 인자는 4장에서 그림과 함께 더 자세히 설명하겠다.

2.3.2 예측 인자 선정

각 PC의 잠재 예측 인자들은 전방향 걸음별 회귀 방법(forward stepwise regression method)을 거쳐 예측 인자로 선정하였다(Wilks, 2006). 전방향 걸음별 회귀 방법은 여러 잠재 예측 인자 중에서 예측 변수를 가장 잘 설명하는 조합을 만들어내는 적절한 방법으로 계절 기후 예측에 널리 쓰이는 방법 중 하나이다(김유진, 2015). 이 회귀 방정식에 여러 개의 잠재 예측 인자를 넣으면 그 중 가장 높은 예측 능력을 가지도록 2 개의 예측 인자를 선정하도록 하였다. 이는 회귀의 과대 적합(over-fitting)을 방지하기 위해 샘플수의(23년) 10% 정도인 2 개로 한정된 것이다.

각 예측 인자의 독립을 보장하기 위해 각각의 단계에서 인자들끼리의 상관관계가 유의 수준 95%를 넘지 않은 인자만을 선택하도록 하였다. 예측 인자를 찾기 위한 회귀 방정식의 훈련 기간(training period)은 1983-2005년이다. 통계적으로 찾은 예측 인자에 대한 물리적 설명은 4장에서 기술하도록 하겠다.

2.3.3 예측과 후측 모의 검증

예측 기술을 검증하기 위해 후측 모의(hindcast) 자료를 생산하였다. 예측은 선정된 예측 인자를 이용해 다음과 같은 선형 회귀 방정식을 세워서 수행한다.

$$\hat{y} = a + b_1x_1 + b_2x_2. \quad (1)$$

이 방정식에서 예측 대상은 동아시아 여름 몬순의 PC, $\hat{y}$ 이고, a 는 y 축 절편, x_1 , x_2 는 앞에서 전방향 걸음별 회귀 방법으로 선정한 예측 인자 2개, b_1 , b_2 는 예측 인자와 예측 대상의 관계를 설명하는 회귀 계수(regression coefficient)이다. 이 방정식을 매년 반복하여 후측 모의 자료를 생산하는데, retrospective 예측 기간 [1983-2005] 23년과 real-time 예측 기간 [2008-2016] 9년 합쳐 32번 반복한다.

먼저 retrospective 예측 기간에는 최대한 과대 적합을 피하기 위해 1년씩 교차적으로 훈련 기간에서 예측 기간을 배제하는 1-leave-out 교차 검증(cross-validated) 방법을 적용하였다(Michaelsen, 1987). 즉 1983년의 동아시아 여름 몬순을 예측하기 위해 1984-2005년 22년의 시계열을 이용해 회귀 계수 b_1 , b_2 를 찾고, 이를 식 (1)에

대입하여 1983년의 여름 몬순의 PC를 예측한다. 회귀 계수를 찾는 방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + e. \quad (2)$$

여기서 Y 는 1984-2005년의 PC, X_1 , X_2 는 1984-2005년 기간 각 예측 인자의 시계열, e 는 residual이다. 즉, 예측 시기 [1983년]과 훈련 기간 [1984-2005년]을 독립시켜 과대적합을 피하고자 하였다.

다만, 교차검증을 하였다고 하여도 예측인자를 찾는 과정에서 이미 예측 기간을 포함하여 예측 대상에 대한 정보를 배제하지 않았기 때문에 완전한 독립이라고 할 순 없다. 따라서 retrospective 예측 기간 [1983-2005] 23년 기간에 얻은 예측 기술은 현업에서 이 모델을 적용했을 때 얻을 수 있는 것보다 과대 적합이다.

real-time 예측 기간에서는 회귀 계수를 1983-2005년 23년에 대해서 고정시켰다. 즉, Y 는 1983-2005년의 PC, X_1 , X_2 는 1983-2005년 기간 각 예측 인자의 시계열이다. 예측 기간은 2008-2015년 이므로 예측 기간과 훈련 기간은 독립적이고, 예측 인자를 찾는 과정 또한 이 real-time 예측 기간에 포함되지 않기 때문에 예측 인자를 선정하는 과정 또한 예측 기간에 대해 독립적이다. 또한 예측 대상인 동아시아 여름 몬순을 정의하는 기간도 예측 기간에 포함되지 않기 때문에 real-time 예측 기간은 예측 대상의 선정 과정에서도 독립적이라 할 수 있다. 따라서 retrospective 기간은 real-time 기간과 동등한 검증 방법을 사용할 수 없지만 retrospective 기간에 계산한 예측 기술은 현업에 적용하였을 때 기대할 수 있는 예측 기술이라 할 수 있다. 검증 결과는 4장에서 제시하도록 하겠다.

3. 중위도 동아시아 여름 몬순

3장에서는 예측 대상인 중위도 동아시아 여름 몬순의 역학적 메커니즘을 설명한다. 이는 1983-2005년 기간 여름철 평균 아노말리의 850-hPa 지위 고도와 강수를 MEOF 분석하여 얻은 공간 패턴과 PC를 이용한다. 역학적 메커니즘은 3번째 모드까지 각 모드별로 설명한다.

3.1 첫 번째 모드 : 북서태평양 고기압

동아시아 여름 몬순의 첫 번째 모드는 북서태평양 아열대 고기압(western North Pacific subtropical high; WNPSH)과 관련되어 있고 총 분산의 24.2%를 설명한다. 여름철 동안 크게 발달하는 북태평양 고기압의 아열대 서쪽 경계 지역은 하층 지위 고도의 변동성이 매우 크게 나타나는 지역으로 일반적으로는 여름철 하층 지위 고도의 아노말리의 경년변동성의 강도로 WNPSH의 변동성을 정의한다. 공간 패턴을 보면(Fig. 2a, 2b) 동아시아에서 저위도와 중위도 지역은 dipole 패턴을 형성하여 아열대 지역에서 상대적으로 저기압이 형성되고 강수가 많이 발생하며 중위도 지역은 상대적으로 고기압이 형성되고 건조하다. 이는 WNPSH가 상대적으로 강화되면 중위도 지역에서는 경압 불안정에 의한 장마/메이유/바이유 전선이 강해져서 강수가 많이 발생하는 것을 의미한다. WNPSH는 동아시아 몬순의 강도를 유발하는 중요한 인자로서 선행연구에서도 많이 연구되었다(Wang et al., 2013; Miyasaka and Nakamura, 2005; Zhou and Yu, 2005). 특히 Wang et al.(2013)에서는 WNPSH와 동아시아 여름 몬순이 -0.92로 강한 반상관관계를 가진다는 것을 보여주었다. 실제로 여름철 동아시아 지역 강수 패턴을 분석하면, 아열대 지역과 중위도 지역은 dipole 패턴을 나타낼 때가 많은데 이 모드가 이러한 특성을 반영한다. 중위도 고기압성 흐름을 따라 수분속의 발산이 나타나 건조한 현상이 나타나고, 저위도 저기압성 흐름을 따라 수분속의 수렴이 나타나 강수 현상이 발달한다. 특히 필리핀 해 근처에서는 강한 동풍 계열의 바람이 나타나는데 이에 따른 수분속의 수렴은 강한 강수로 이어진다. 더 자세한 설명은 Fig. 3을 통해 하기로 한다.

MEOF 분석 결과는 적용되는 기간에도 영향을 받기 마련인데, 본 연구에서는 APCC-MME의 공통 retrospective forecast 기간과 동일하게하기 위해 부득이하게

1983-2005년으로 기간을 고정하여 MEOF 분석을 하였다. 그리고 이와 비교하기 위해 현재 얻을 수 있는 가장 긴 관측 기간인 1979-2015년에 MEOF 분석을 적용해보았다. Fig. 1의 첫 번째 모드의 공간 패턴과 PC는 이들을 모두 표현하였는데, 공간 패턴에서 shading은 [1983-2005년]기간, 하얀 contour는 [1979-2015년]기간이다. PC의 경우, 검은 선은 [1983-2005년], 회색 선은 [1979-2015년]기간이다. 첫 번째 모드에서는 이 두 기간에 대한 MEOF 분석 결과가 대동소이하여 크게 다르지 않다. 즉, 첫 번째 모드의 경년 변동성은 장주기 기후 변동의 영향을 받지 않았다. 다만, [1979-2015]기간에서 지위 고도에서 음의 방향으로 강도가 더 강하게 나타나고, 강수에서도 양의 편차가 음의 편차보다 강하게 평균값이 음의 방향으로 이동하여 나타난다.

첫 번째 모드의 역학적 과정을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 넓은 영역의 850-hPa 지위 고도, 500-hPa 지위 고도, 2-m 기온, 강수의 상관관계 지도를 Fig. 3에 정리하였다.

지위 고도는 서태평양 적도-아열대 지역에서 상하층 모두 음의 상관관계가 있고, 동아시아와 북태평양 경계 해안선을 따라 북쪽으로 고-저 기압이 상하층 모두 연결되어 나타난다(Fig. 3a, 3b). 즉, 북서태평양 아열대 저기압이 나타나고, 이의 북쪽 방향으로 tripole pattern이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 중위도 지역만 나타나는 지위 고도의 loading vector(Fig. 2a)에서는 하층 지위고도의 dipole pattern이 주요하게 나타나는데 이것은 넓은 영역에서 보면 tripole pattern의 일부이고 barotropic한 구조임을 알 수 있다. 북서태평양 아열대 고기압이 특히 북서 태평양에서 크게 나타나긴 하지만 음의 아노말리는 적도 태평양에서 매우 넓게 나타나는 현상이다.

이와 비슷한 구조로 표면 온도에서도 북서태평양 아열대 지역부터 동아시아 해안선을 따라 북쪽으로 tripole 구조가 나타나 지위 구조가 표면 온도장과의 관계가 있음을 알 수 있다(Fig. 3c). 이러한 tripole 구조는 강수 패턴에서도 나타나는데(Fig. 3d) 강수가 많은 지역은 음의 온도 아노말리, 건조한 지역은 양의 온도 아노말리가 나타난다. 중위도, 고위도에서 상대적으로 저기압이 강하게 나타나는 곳은 강수가 많아지고, 구름이 많기 때문에 구름에 의한 알베도 증가로 하층 온도가 내려가는 것으로 해석할 수 있다. 반면, 고기압이 나타나고 건조한 지역은 여름철 일사 증가로 인해 하층 온도가 올라간다.

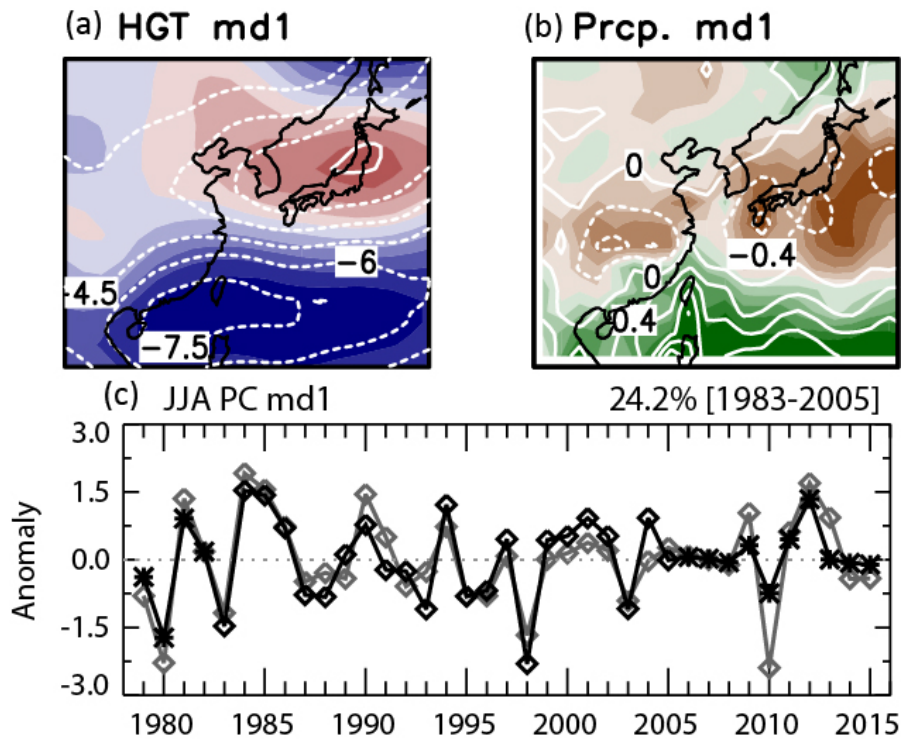


Figure 2 Spatial patterns of (a) 850-hPa geopotential height [m] and (b) precipitation [mm month⁻¹] of the first MEOF mode of the East Asian summer monsoon in the mid-latitude; and (c) the corresponding PC time series (unitless). Seasonal anomalies from the climatological mean (June, July and August) are used. 24.2% of the total variance is explained by this mode. [1983–2005] is the target period of the MEOF analysis and [1979–2015] period is also analyzed for comparison. Shading indicate the basis function for the [1983–2005] period and white contour lines are for the [1979–2015] period in the spatial patterns. Black line is for the period of 1983–2005, diamond symbols indicate the dependent PCs and asterisk symbols are projected values of anomalies on the basis function of [1983–2005], so these are independent PCs. Gray line represent MEOF PCs calculated for the period of [1979–2015]. This mode explains the variability of the western North Pacific Subtropical High, period in the spatial patterns. Black line is for the period of 1983–2005, diamond symbols indicate the dependent PCs and asterisk symbols are projected values of anomalies on the basis function of [1983–2005], so these are independent PCs. Gray line represent MEOF PCs calculated for the period of [1979–2015]. This mode explains the variability of the western North Pacific Subtropical High.

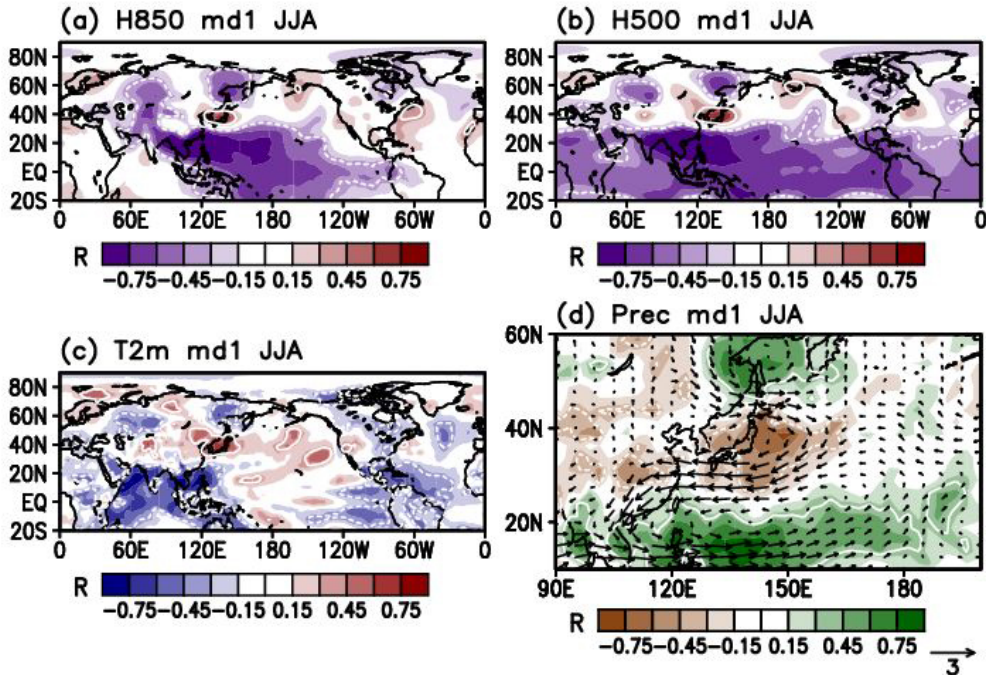


Figure 3 Correlation coefficient maps between the first PC and the (a) 850-hPa geopotential height, (b) 500-hPa geopotential height, (c) 2-m air temperature and (d) precipitation summer-mean anomalies. (d) Regressed vectors of 850-hPa wind during summer on the first PC is also plotted with the precipitation pattern. White contours indicate the 95% significance level, 0.45. Tripole patterns of geopotential height, surface temperature, and precipitation are prominent in the spatial patterns commonly.

아열대 북서 태평양 지역에서의 강수-온도 되먹임 작용은 Wang et al.(2013)에서 자세히 설명되어 있는데, 아열대 북서 태평양 지역에서 상대적인 저기압이 발생하면, 날짜 경계선 부근의 적도 태평양 부근에서는 강한 남서풍이 발생하고, 따뜻한 남쪽 공기가 유입되어 온도가 상승한다. 따뜻한 해수면 온도는 강한 대류 활동을 유발하고 이로 인해 강수가 많아지게 되면 수증기 잠열 방출에 의해 높은 대기 온도가 유지된다. 반면 북서 태평양 저기압의 서쪽 방면에서는 표면 온도가 낮게 형성되어 있고, 서풍 아노말리가 발생하는데 이 지역 여름 평균류는 남서풍이기 때문에 서풍 계열 바람이 더 강하게 된다. 이로 인해 해수면 잠열 방출에 의한 에너지 소실이 증가하기 때문에 해수면 온도는 더욱 감소하게 되고, 이러한 양의 되먹임 작용이 작동하면서 북서태평양 지역의 저기압은 오랫동안 유지될 수 있다.

동아시아 몬순 활동은 첫 번째 모드에 의하면 인도양의 해수면 온도와도 관계가 있다. 첫 번째 모드의 표면 온도장에서 인도양 지역의 온도는 낮게 유지되는데, 이는 인도양 지역에서 계절풍이(서풍) 강하면 해수면의 잠열 방출이 활발하면서 하층 온도가 낮아지고 인도양과 인도 남부에서는 대류 활동이 약해져 강수가 약하다. 반면 동남아시아에서는 인도양에서부터 강화된 서풍 아노말리와 중국으로부터의 북풍 아노말로 바람장이 수렴하면서 강수가 활발하다. 즉, 인도양에서의 대류 활동은 동남아시아의 수렴/발산과 연관되어 나타난다. Yang et al.(2007)에서는 엘니뇨가 발달한 겨울 이듬해 여름철 인도양의 온도가 높아지고, 대류활동이 활발해져 Matsuno-Gill type pattern으로 남아시아 고기압을 강화하고 남서풍이 강해져 북서 태평양 아열대 지역에서 상대적으로 고기압이 강화하여 아열대 동아시아 몬순을 약화시키고 강수를 적게 내리게 하는 메커니즘을 설명하였다. 따라서 Fig. 2에서도 인도양-북서태평양-동아시아 순환장과 표면 온도, 강수의 일련의 관계를 기존연구와 마찬가지로 설명한다.

3.2 두 번째 모드: 중위도 파동 전파

두 번째 모드는 중위도 파동의 전파와 관련된 모드이다. Fig. 4에는 두 번째 모드의 loading vector, 850-hPa 지위 고도와 강수의 패턴, 그리고 PC를 함께 나타내었고, 이 모드는 전체 변동성의 15.4%를 설명한다. 마찬가지로 MEOF 분석의 기간은 [1983-2005년]이고(shading, 검은 선), 이를 비교하기 위해 [1979-2015년]기간(white contour, 회색 선)을 함께 분석해 그림에 표현하였다. 이 모드의 공간 패턴에서 두드러지게 나타나는 현상은 중위도 지역 지위고도의 큰 변동성인데, 특히 중국 동북부 지역에서 지위 고도의 변동성이 크게 나타난다. 지위 고도에서 음의 편차가 강하게 나타나는 지역에서는 강수가 비교적 강하게 나타나고, 상대적으로 양의 편차가 나타나는 지역은 건조하다. 다만, 강수는 중위도 보다는 저위도에서 변동성이 크게 나타난다.

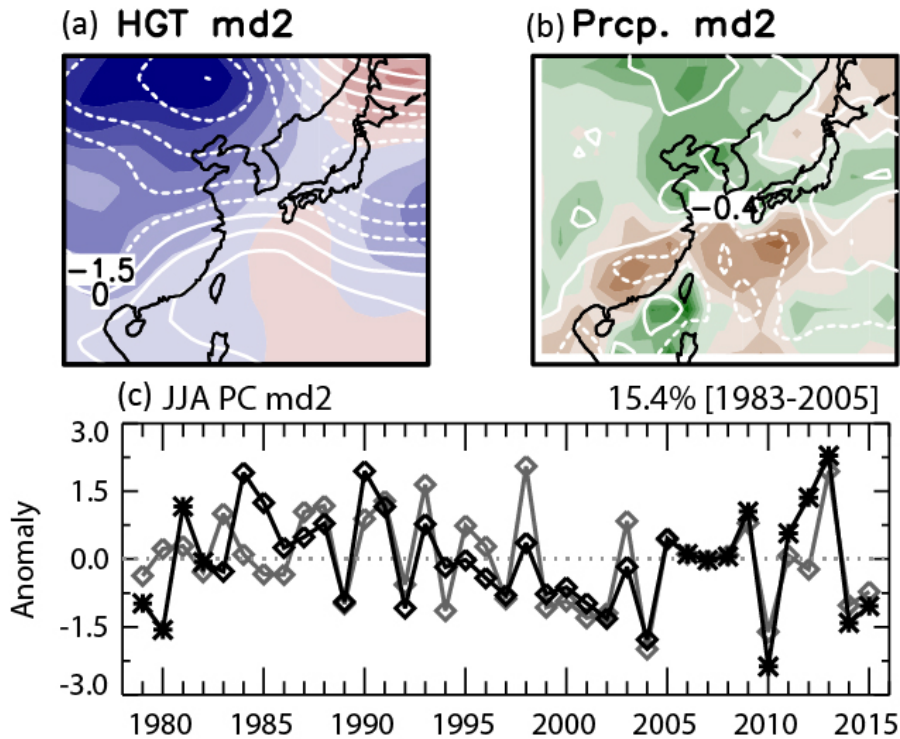


Figure 4 Same with the Fig. 1 but for the second mode. The second mode occupies about 15.4% of the total variance. This mode explains the wave transport over the mid-latitude areas in East Asia. According the differences between two targeted period for MEOF analysis, this second mode is quite dependent on the analysis period.

두 번째 모드의 PC는 MEOF 분석의 기간에 따라 경년변동성이 꽤 달라지는데, 이는 첫 번째 모드와는 확연히 다른 점이다. 특히 2000년을 구분하여 두 PC가 달라진다. 공간 패턴도 꽤 달라지는데 양과 음의 아노말리의 여부나 위치는 두 기간의 공간 패턴이 유사하지만, 특히 [1979-2015년] 기간에는 육지보다는 해양에서 동아시아 남북 방향의 지위 고도의 파동 전파 구조가 더 강해지고 북서 태평양 아열대 지역 지위 고도의 변동성이 강해진다. 따라서 북서 태평양 아열대 고기압의 남북 방향의 파동 전파 구조가 2000년을 기점으로 하여 달라지고 장기적인 변동성에 변화가 있었음을 짐작 할 수 있다.

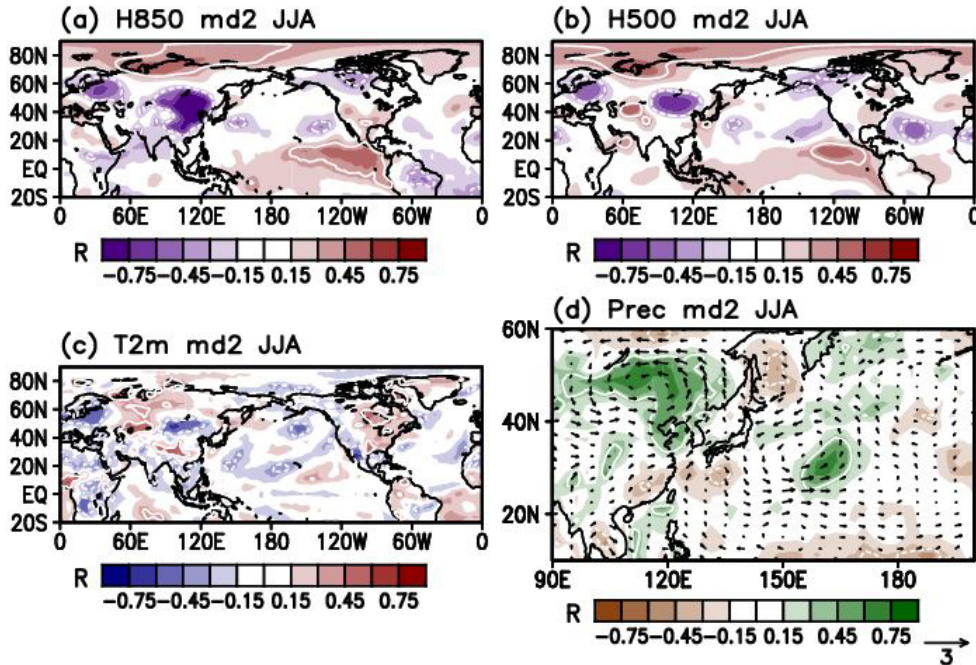


Figure 5 Same as the Figure 3 but for the second mode. Zonal wave transport patterns over the mid-latitude Eurasian Continent in geopotential height and 2-m temperature are important in this mode.

두 번째 모드의 역학적 구조를 알기 위해 지위 고도, 2-m 기온, 강수의 상관관계 지도를 Fig. 5에 나타내었다. loading vector에서 나타나는 중국 동북 방향의 저기압은 중국에 크게 자리잡은 저기압의 일부분이고 이는 하층, 상층에서 모두 나타난다 (Fig. 5a, 5b). 특히 상층에서는 유라시아 대륙의 중위도 지역을 따라 파동의 전파가 두드러지게 나타나고 이것은 유라시아 대륙의 표면 온도장에서 음-양-음 패턴이 나타나는 것과도 관련이 깊다.

유라시아 대륙에서 나타나는 동서 방향의 파동 전파는 Ding and Wang(2005)에서 연구했던 북반구 Circumglobal teleconnection(CGT)과 닮은 점이 있다(김유진, 2015). Ding and Wang(2005)에 따르면 중위도에서 나타나는 파동의 전파는 북반구 여름철 제트 기류와 결속하여 전 지구적으로 영향을 미친다. 다만, 기존에 연구되었던 CGT는 인도 몬순의 역할과 인도 북쪽의 대류 활동이 중요한 기작으로 증명되었는데, 본 연구의 두 번째 모드는 중위도 지역의 파열만 나타나고 인도 지역의 대류 활동

이나 강수는 큰 상관관계가 나타나지 않는다. 이것은 [1983-2005년] 기간의 MEOF 분석에만 적용되는 것으로, [1979-2015] 기간에는 인도 북쪽 지위고도나 온도의 역할이 중요하게 나타난다(김유진, 2015). 따라서 2000년 이전에는 상대적으로 중위도 유라시아 지역의 파동 전파가 상대적으로 더 중요한 역할을 하고 저위도 지역으로부터의 강제력은 작동하지 않는다. 다만 이러한 변화에도 불구하고, 2000년 이후 basis function 기간에 따른 PC는 서로 상관성이 크기 때문에 이에 대한 연구가 더 필요해 보인다.

강수는 중국 북동 지역의 저기압의 동쪽 사면에서 많이 발생하는데 이는 저기압을 따라 남풍이 유입되고 수분축의 수렴하여 나타난다. 그래서 한국의 북부 지역과 중국의 북동부 지역에서 두 번째 모드와 관련되어 많은 강수의 변동성이 나타난다. 이는 [1979-2015년] 기간을 타겟으로 분석하였을 때와는 다른 결과인데, 이는 북서 태평양 고기압의 남북 방향 전파가 약해지면서 태평양 지역의 강수나 바람장의 아노말리가 매우 약해져서일 것이라 사료된다(Figure 10, 김유진, 2015).

3.3 세 번째 모드: 오토츠크해 저기압 모드

세 번째 모드는 오토츠크해 저기압, 일본 남쪽의 고기압과 관련되어 나타나고 전체 변동성의 약 11%를 설명한다. 이 모드에서는 태평양 서쪽에서의 남북 방향 지위 고도의 편차의 dipole pattern이 중요하게 나타난다(Fig. 6). 특히 한반도 동북쪽, 오토츠크해에서 음의 지위 고도가 강하고, 일본 남쪽에서 양의 지위고도가 강하게 나타난다(Fig. 5a). 중국의 해안선을 따라서는 음의 지위 고도가 약하게 나타난다. 이와 연관되어 강수 아노말리는 일본 남쪽에서는 양의 지위 고도와 함께 음의 강수 패턴이 강하게 나타나고, 서쪽에서 음의 지위 고도와 함께 양의 강수 아노말리가 강하게 나타난다. 그리고 일본 남쪽 고기압 주위의 순환장으로 인해 남풍, 남서풍이 주로 나타나 한반도, 일본에서는 양의 강수 아노말리가 나타난다.

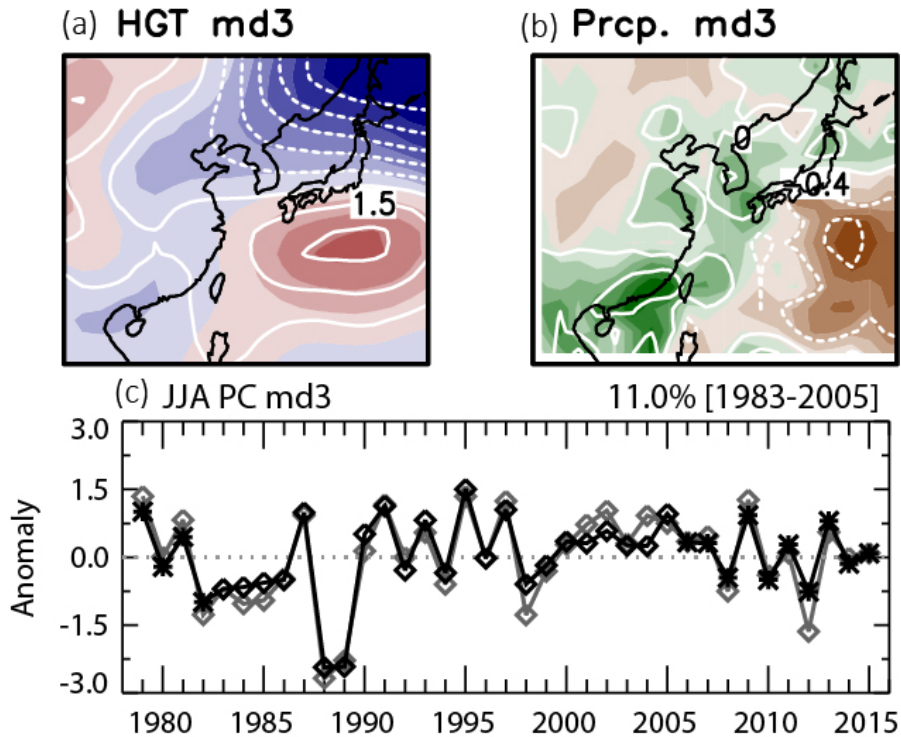


Figure 6 Same as the Figure 2, but for the third mode. The third mode. This mode represents the importance of the dipole pattern over the south of Japan and Okhotsk Sea in the low-level geopotential height field. This mode explains 11.0% of the total variance of East Asian summer monsoon.

이 모드는 중위도 동아시아에서 북서태평양의 영향 없이 장기적으로 안정적으로 나타난다. [1983-2005년] 기간과 [1979-2015년] 기간에도 공간 패턴의 변화가 거의 없고 기간에 독립적으로 PC의 경년 변동성도 유사하게 나타나 MEOF 분석 기간에 크게 영향 받지 않는 안정적인 모드이다. 따라서 동북아시아 강수를 예측하는 데 예측 가능한 변동성의 많은 부분을 차지하는 중요한 모드이다. 이 모드는 Sato and Takahishi(2007) 연구에서도 동아시아 지역 중기 여름철 상층 지위고도 변동성에서 주요하게 나타나 제시되었다. 상층 지위고도의 변동성은 하층 온도장, 에너지 변환등을 유도하기 때문에 몬순 변동성에도 큰 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 6에는 세 번째 모드의 역학적 메커니즘을 설명하기 위한 상관 계수 지도를 그렸다. 지위 고도는 상하층 모두 일본 남쪽의 고기압, 오후츠크해의 저기압, 그리고

베링해 지역의 고기압 패턴이 나타나 북서태평양 가장 자리를 따라 tripole pattern 이 주요하게 나타난다. 두 번째 모드에서처럼 유라시아 대륙의 동서 방향 파동 전파에 의한 패턴이 약하게 나타나긴 하지만 강한 아노말리가 나타나는 위치는 매우 다르다. 이 모드 또한 지위 고도는 barotropic한 구조를 보이고, 저기압 패턴이 나타나는 곳은 수분속 수렴, 일사 감소로 인해 저온 현상이, 반대로 고기압이 나타나는 곳은 수분속 발산, 일사 증가로 인해 온도의 상승이 나타난다. 지위 고도의 동서 방향 파동 전파는 대서양에서부터 시작되는 NAO(North Atlantic Oscillation)과 연관되어 나타나고 이는 선행 연구에서 NAO와 동아시아 여름 몬순의 연관성으로 연구된 바 있다(Lee and Seo, 2013; Sung et al., 2006; Branstator, 2002). 해수면 온도와 상층 지위 고도의 대서양에서의 tripole 구조는 NAO를 나타내는 패턴이다.

또 다른 흥미로운 사실은 열대 중앙 태평양의 온도 상승, 즉 중앙 태평양 엘니뇨 현상과 연관되어 동아시아 지역 강수가 증가하는 것이다. 이 모드는 [1979-2011년] 기간에 MEOF 분석을 하여도 중앙 태평양 엘니뇨 현상과 매우 연관 깊게 나타난다(김유진, 2015). 중앙, 동 태평양에서는 하층 온도의 상승과 함께 하층 대류 활동이 활발하게 나타나 저기압이 발달하지만 상층에서는 고기압이 발달하면서 상하층 baroclinicity가 증가하여 전선을 유도할 수 있다(Nakamura et al., 2004). 그리고 태평양의 북동쪽과 중앙태평양에서 나타나는 양의 온도 아노말리는 Lee and Seo (2013)의 연구에서 한국의 강수에 장마에 영향을 미친다는 북태평양 변화 모드(North Pacific Change: NPC)와 양상이 비슷하다(김유진, 2015).

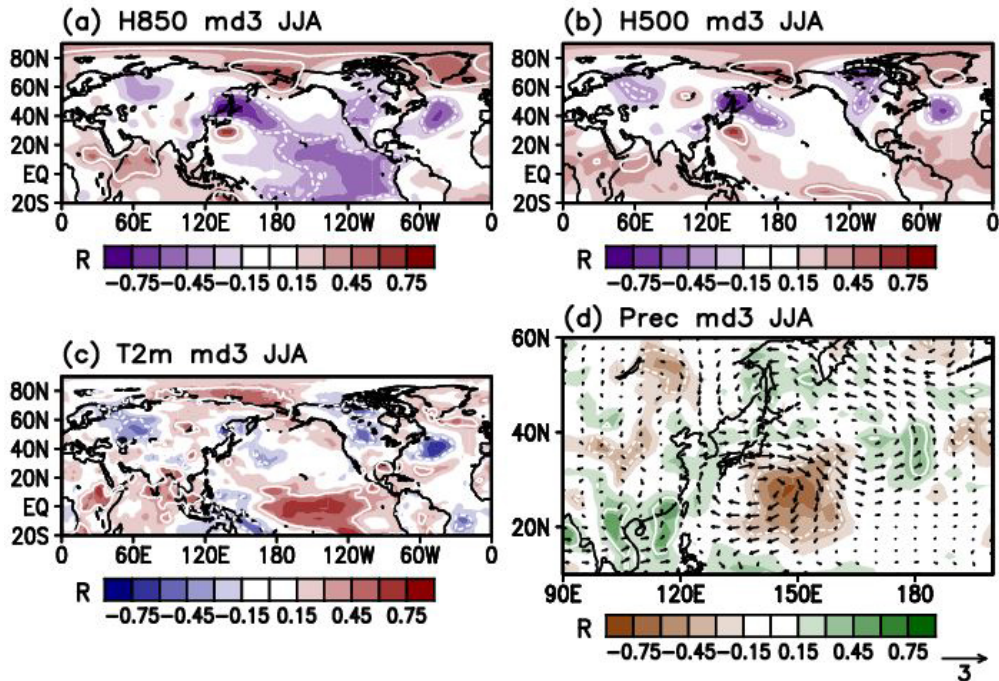


Figure 7 Same as the Figure 3, but for the third mode.

3.4 역학 모델에서의 동아시아 여름 몬순

지금까지 분석한 동아시아 몬순의 주요 모드들은 관측 자료를 기반으로 정의하였다. 뒤에는 이 모드들의 PC를 통계적으로 예측할 것이다. 하지만 그 전에, 역학 모델 자료를 기반으로 동아시아 몬순의 주요 모드를 정의하여 이를 관측 기반의 MEOF 분석과 비교하여 보고자 한다. 기후 예측은 크게 통계 예측과 역학 모델을 통한 예측으로 분류할 수 있다. Wang et al.(2013)에서는 역학 모델과 통계 예측을 hybrid로 혼합하여 동아시아 여름 몬순을 예측하고자 하였다. 역학 모델 자료와 관측 자료에서 동아시아 주요 모드를 정의하여 각 모드의 PC를 예측하는데, 역학 모델에서 추출한 PC가 관측 자료에서 추출한 PC를 대체할 정도의 유사성이 있고 예측성이 우수한 경우 역학 모델에서 예측한 PC를 예측값으로 하고, 그렇지 않은 경우 통계 예측을 통해 PC를 예측하여 동아시아 여름 몬순을 예측하였다. 이 연구에서 정의한 몬순 지역은 동아시아 지역뿐만 아니라 아시아 지역의 몬순을 정의하여 예측된 공간장에서 동아시아 지역의 몬순을 검증하였다. 그 결과 저위도까지 포함한 동아시아 몬순은 유의미

한 예측성능을 가진 것으로 검증 되었지만 중위도 지역의 동아시아 몬순은 유의미한 예측성이 나타나지 않았다.

본 연구에서는 역학 모델에서 동아시아, 특히 중위도 지역의 여름 몬순이 유의미하게 정의되는지의 여부를 분석해 보고자 APCC-MME의 [1983-2005년] 기간을 MEOF 분석하여 관측 자료 기반의 MEOF 분석과 비교해 보았다. APCC-MME에는 850-hPa 지위 고도가 없기 때문에 해면 기압장으로 대체하여 분석한다. 그래서 먼저, 관측 자료의 해면 기압장과 강수를 MEOF 분석하여 동아시아 여름 몬순의 PC를 정의한다(Fig. 8). 그 결과, 첫 번째 모드는 23.6%, 두 번째는 15.8%, 세 번째는 11.4%로 850-hPa와 강수로 몬순을 정의하였을 때 각 모드의 explained variance와 비슷한 순서로 설명한다. 각 모드의 공간 패턴과 PC 또한 서로 유사하여 850-hPa 지위 고도를 해면 기압장으로 대체하여도 큰 문제점이 없을 것이라고 판단하였다.

APCC에서는 4가지 deterministic MME를 생산하는데 이 중 Simple Composite Method(SCM) MME를 분석하였다. 다중 모델에서의 SCM은 각 모델들의 앙상블을 equal-weighting 평균하여 한 모델에 대해 하나의 예측값을 만든 다음 다중 모델들의 예측값을 역시 equal-weighting 평균하는 것이다. 지역, 계절마다 MME의 예측 성능은 매우 달라지지만, 일반적으로 전 계절, 지역에 대해 SCM은 가장 안정적인 예측 성능을 가진다(Min et al., 2014). 따라서 현업 계절 예측 분야에서는 해석이 쉽고 비용이 적게 드는 SCM에 많이 의존한다.

이 APCC-MME의 [1983-2005년] 기간의 해면 기압장과 강수의 hindcast를 이용하여 MEOF analysis를 분석하였다. 관측 자료를 기반으로 한 동아시아 여름 몬순을 역학 모델에서도 유사하게 정의한다면 통계 예측 대신 역학 예측을 혼합하여 사용할 수 있겠지만, PC와 공간 패턴, explained variance에서 보듯이 첫 번째 모드 말고는 역학 모델에서는 관측에서의 동아시아 여름 몬순을 제대로 모의하지 않는다. 첫 번째 모드는 관측 기반의 MEOF 에서보다 많은 37.3%를 설명하는데, 이것은 역학 모델에서 첫 번째 모드, 즉 북서 태평양 고기압에 의해서 설명하는 중위도 동아시아 여름 몬순에 의해 설명되는 부분이 크다는 것을 의미한다. 역학 모델에서는 해당 지역의 강수, 해면 기압장의 변동성을 충분히 모의하지 못하는데, 이것은 noise 성분이 적은

것을 의미하고, 그래서 첫 번째 모드에 의해 설명되는 변동성이 상대적으로 크게 모의될 수 있다.

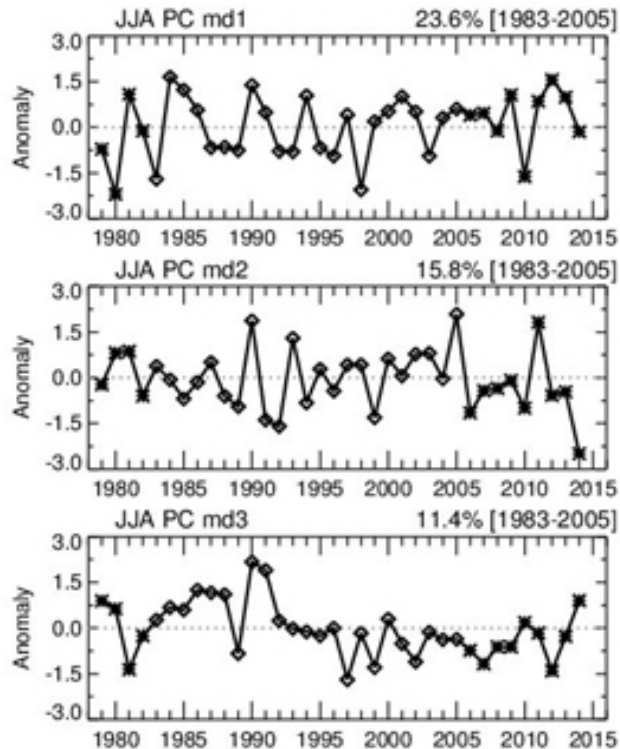


Figure 8 PCs of MEOF analysis of sea level pressure and precipitation from observation (NCEP/DOE R2). PCs of (a) the first mode, (b) the second mode, and (c) the third mode. The target period of MEOF analysis is [1983–2005], and the rest of PCs are projected values of anomalies of both variables on the corresponding PCs.

또한, 첫 번째 모드에 의한 변동성이 큰 것은 모델에서 ENSO에 의한 역학이 잘, 크게 모의되는 것과도 연관된다. 뒤의 자연 상관관계 지도에서 보게 되겠지만, 첫 번째 모드는 선행하는 겨울, 봄철에 발달하는 ENSO signal에 큰 영향을 받는 모드이다. 일반적으로 역학 모델은 동태평양 엘니뇨를 비교적 잘 모의하고 엘니뇨 강제력에 의한 원격 상관관계가 전 지구적으로 나타나는데 첫 번째 모드의 경우 이 동태평양 엘니뇨와 자연 상관관계가 있기 때문에 역학 모델에서도 잘 모의되는 것으로 판단된다. 각 모드의 자연 상관관계는 뒤의 4장에서 더 자세히 살펴해보도록 하겠다. 반면에 세 번째 모드도 발달하는 엘니뇨와 동시 상관관계가 있지만 이 모드는 중태평양 엘니

노와 상관관계가 있고, 중태평양 엘니뇨는 일반적으로 역학 모델에서 잘 모의하지 못하는 것으로 알려져 있다.

역학 모델에서 중위도 동아시아 여름 몬순을 잘 모의할 수 있다면 hybrid로 통계 모델과 결합할 수 있겠지만, 위에서 분석하였듯이, 첫 번째 모드만이 역학 모델에서 비교적 제대로 모의하고, 엘니뇨의 영향을 상대적으로 크게 받고 있기 때문에 본 연구에서는 이를 배제하고 관측 자료를 기반으로 한 동아시아 여름 몬순 정의를 사용하였다.

4. 예측

4.1 예측 인자 선정

지금까지 분석했던 동아시아 여름 몬순의 각 모드의 PC에 대해 예측을 수행하였다. 이를 통계적으로 예측하기 위해서는 예측 인자(predictor)를 찾아야 한다. 2장에서 자세히 설명하였지만 다시 간략히 정리하자면, 본 연구에서는 예측 인자를 찾기 위해 전방향 걸음별 회귀 방법을 사용하였다. 이를 위해 잠재 예측 인자를 회귀식에 적용해야 하는데, 잠재 예측 인자는 관측 자료와 역학 모델 자료에서 모두 얻을 수 있도록 설계하였다. 첫 번째 PC의 잠재 예측 인자를 위한 후보군은 Table 1에 정리한 변수들과 PC와의 상관관계 지도 9개에서 얻는다(Fig. 10). 상관관계는 [1983-2005년] 23년간 계산하였다.

이 총 9장의 상관관계 지도에서 상관관계가 높게 나타나는 지역들이 있다. 2장에서 설명하였듯이 이들 중 3개의 조건을 만족하는 지역을 선정하여 공간 평균한 시계열을 잠재 예측 인자로 삼았다. 첫 번째 모드와의 상관관계 지도에서 나타나는 잠재 예측 인자는 16개이다. 이들을 분석해 보면 우선 겨울철에 동 태평양에서 라니냐가 발달하고 봄철에 라니냐가 소멸해가는 패턴이 해면 기압장과(Figs. 10a, 10b, 10c) 표면 온도장에서(Figs. 10d, 10e, 10f) 주요하게 나타난다. 라니냐가 발달하면서 인도양에서도 표면 온도장에서 음의 아노말리가 발달하고 특히 봄철에 해면 기압장의 상승과 함께 온도의 음의 아노말리가 강해진다. 이러한 라니냐 후의 역학적 메커니즘은 Yang et al.(2007)에서 설명한 엘니뇨가 발달한 겨울 이듬해 봄철, 여름철에 나타나는 현상과 반대 방향으로 일치한다. 따라서 첫 번째 모드는 엘니뇨 현상과 매우 상관관계가 높게 나타나는 현상이고 이것이 선행-지연 상관관계에서 나타난다.

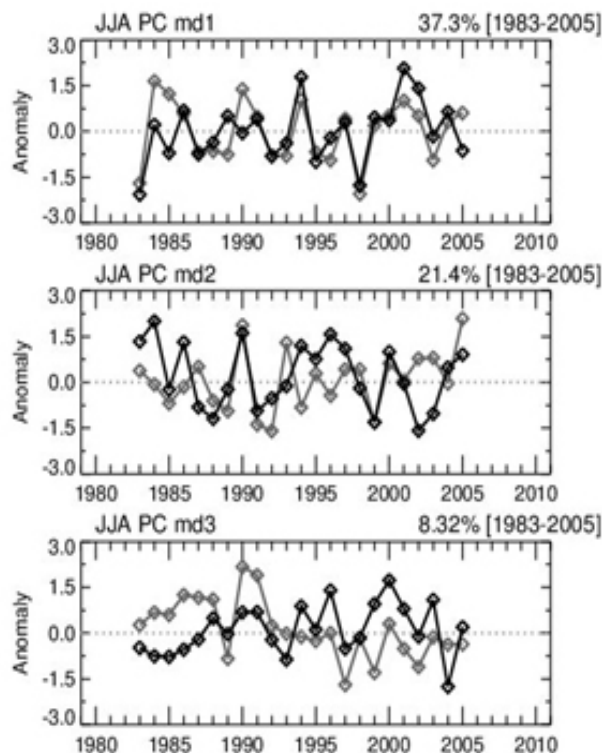


Figure 9 PCs of MEOF analysis of SLP and precipitation from APCC-MME (black) and observation (grey). PCs of (a) the first mode, (b) the second mode, and (c) the third mode. Only the first mode from the APCC-MME is similar to that from the observation.

역학 모델에서는 대체적으로 라니냐 발달 다음 해의 동아시아 여름 몬순의 특성을 잘 예측한다(Figs 10g, 10h, 10i). 역학 모델의 동시 상관관계는 관측장의 그것과 꽤 유사한데(compare Figs 10g, 10h, 10i and Fig. 3), 특히 열대 지역에서 예측성이 뛰어나다. 북서 태평양 지역 500-hPa 지위 고도의 음의 아노말리, 인도양 지역 표면 온도의 음의 아노말리, 북태평양 표면 온도의 양의 아노말리, 북서 태평양 지역 강수의 양의 아노말리, 동아시아 지역 강수의 음의 아노말리 모두 관측장에서도 잘 나타나는 동시 상관관계여서 잠재 예측 인자로 선정 하였다.

이에 더해 Table 2에 정리한 NAO, PNA의 겨울철, 봄철 시계열 또한 잠재 예측 인자로 선정하여 총 22개의 잠재 예측 인자를 전방향 걸음별 회귀식에 넣어 이 중 2개를 예측 인자로 선정하였다. 첫 번째로 예측 인자로 선정되는 시계열은 APCC-MME의 동아시아 지역 강수 시계열로 첫 번째 PC와의 상관관계가 가장 크기 때문에

선정되었다. 그리고 두 번째는 봄철 PNA 시계열이다. 봄철 PNA는 첫 번째 PC와 상관관계가 크진 않지만, 다른 변수들이 모두 ENSO와 관련되어 나타나기 때문에 첫 번째 예측 인자와 독립성이 보장되지 않기 때문에 탈락되고 그나마 남은 PNA가 선정되었다. 즉, 많은 잠재 예측 인자들 사이의 독립성을 고려하지 않고 걸음별 단계에 대입하여도 이들 중 서로 독립적인 인자로 2개를 선정하도록 설계하였다.

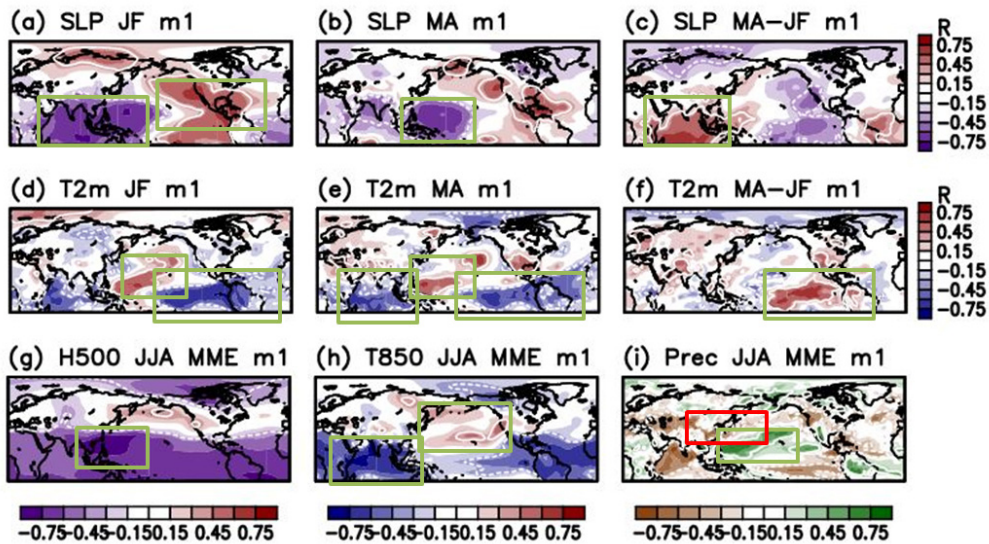


Figure 10 Lead-lag correlation maps of (upper) SLP, (middle) 2m-temperature from observation on the first PC. (left) January–February, (center) March–April mean anomalies of variables are used. (right) Tendency from winter (JF) to spring (MA) anomalies of variables are also used. Simultaneous correlation maps (bottom) of (g) 500-hPa geopotential height, (h) 850-hPa temperature, and (i) precipitation on the first PC. Yellow-green box present the potential predictors and red box represent the selected predictors.

두 번째 모드는 유라시아 대륙 중위도의 동서 방향 파동 전파로 설명되어지는 동아시아 몬순이다. 특히 중국 북동 내륙 지역의 강수 변동성의 많은 부분을 설명한다. 동시 상관관계 지도에서는 지위 고도 상하층, 표면 온도장에서 동서 방향으로 배열되어 있는 음, 양, 음 아노말리 패턴을 볼 수 있다. 따라서 이 모드에서는 유라시아 대륙에서 동서 방향의 파동 전파를 설명할 수 있는 성분을 찾아야 한다.

Fig. 11은 두 번째 모드에 해당하는 관측 자료의 선행-지연 상관관계와 역학 모델의 동시 상관관계 지도이다. 겨울과 봄철 해면 기압장과 표면 온도 패턴을 보면 겨울

철 유라시아 대륙 중위도에서 고기압이 발달하여 온도가 낮았는데 봄이 되면 상대적으로 해면 기압이 낮아지고 온도가 상승하는 경향을 볼 수 있다. 즉 동아시아 지역에서는 표면 온도장 음의 아노말리가 겨울부터 여름까지 유지되고 중앙아시아 지역에서 봄철에 온도가 따뜻해지는 경향이 있어 이들을 잠재 예측 인자로 삼았다.

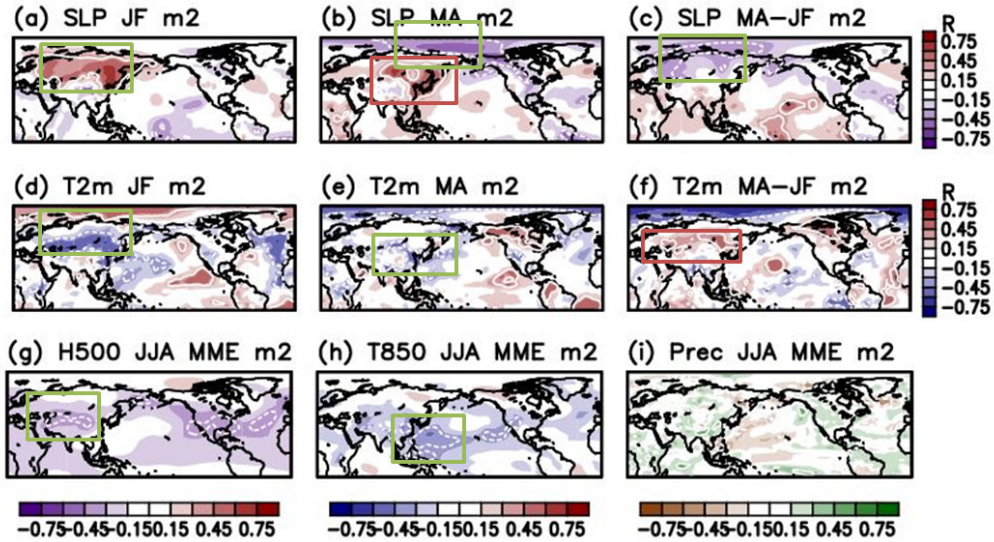


Figure 11 Same as the Figure 10 but for the second mode.

역학 모델과의 동시 상관관계는 첫 번째 모드처럼 큰 상관관계는 보이지 않는다. 이는 두 번째 모드는 역학 모델이 잘 모의하지 못하는 것에서도 유추해 볼 수 있는 사실이다. 그럼에도 불구하고 몇 가지 유의해 볼 만한 것은 500-hPa 지위 고도 중앙아시아에서 나타나는 저기압과 동아시아, 북서 태평양 지역에서 나타나는 850-hPa 온도장 음의 아노말리는 관측장으로부터의 동시 상관관계에서 나타나는 상관관계수가 높은 지역을 어느 정도 모사한다. 여기에 첫 번째 모드와 같이 PNA, NAO 시계열을 포함하여 15개의 잠재 예측 인자를 선정하였다.

이 잠재 예측 인자들을 걸음별 단계에 넣으면 2개의 예측 인자가 선정된다. 먼저 첫 번째는 동아시아 지역에서 나타나는 봄철 고기압 패턴과 다음은 겨울에서 봄철로 이동할 때 유라시아 대륙에서 나타나는 표면 온도의 상승 경향이다. 동아시아 봄철 고기압 패턴은 이 지역 표면 온도의 음의 아노말리와 상관관계가 큰데, 표면 온도장

보다는 해면 기압장에서 상관관계가 더 크게 나타나 이를 선택하였다. 즉 겨울부터 봄철까지 유라시아 대륙 동쪽에서 온도가 낮은 경향이 여름철까지 이어져 동아시아 여름 몬순에 영향을 주었다. 다만 이러한 온도의 경향성은 계속되지만 해면 기압장은 계절 변화의 영향을 반영하여 여름철에는 해당 지역에서 저기압성 흐름이 나타난다. 봄철에 표면 온도가 높아지는 경향은 중위도 유라시아 대륙에서 크게 나타나는데 이러한 경향성이 중앙아시아에서 여름철까지 지속되어 유라시아 중위도 지역 파열 형성에 영향을 끼치는 것으로 해석 된다.

세 번째 모드는 오호츠크해 지역에서 크게 발달하는 저기압과 일본 남부에서 발달하는 고기압에 의한 지위 고도의 dipole pattern으로 인해 동아시아에서 강수가 발생하는 모드이다. Fig. 12은 세 번째 모드에 해당하는 관측 자료의 선행-지연 상관관계와 역학 모델의 동시 상관관계 지도인데 오호츠크해에서 강하게 나타나는 저기압은 봄부터 크게 발달한다. 또한 이 모드는 여름철에 북서 태평양에서 일본 남부 지역의 고기압성 순환과 함께 해안선을 따라 남북 방향의 파동 전파가 나타나는데 오호츠크해 저기압은 이의 일부분이고 베링해 부근에서는 고기압성 순환이 나타난다(Fig. 6). 베링해 부근의 고기압성 순환은 봄부터 북극해에서의 표면 온도장의 상승과도 관계가 깊다. 여름철 베링해에서의 고기압성 아노말리, 하층 온도는 역학 모델에서도 모의하는데(Figs 12g, 12h), 관측에서 나타나는 동시 상관관계와는 위치가 약간 다르다.

또한 세 번째 모드는 중앙 태평양에서 발달하는 엘니뇨 활동과도 관계가 깊다. 중앙 태평양에서 여름철부터 발달하는 엘니뇨는 비교적 역학 모델의 온도와 강수장에서도 잘 모의된다.

상관관계 지도에서 10개, PNA, NAO 시계열 6개를 합하여 총 16개의 잠재 예측 인자 중에서 걸러진 2개의 예측 인자는 겨울에서 봄철로 오호츠크해 저기압이 발달하는 경향성, 그리고 역학 모델에서 모의하는 중앙 태평양 강수이다. 각 모드의 선택된 예측 인자는 다음 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Selected predictors for each PC.

	Time	Variable	Region
1 st mode	JJA	MME precipitation	East Asia
	MA	PNA	
2 nd mode	MA	SLP	East Asia
	MA-JF	T2m	Eurasia
3 rd mode	MA-JF	SLP	Okhotsk Sea
	JJA	MME precipitation	Central Pacific

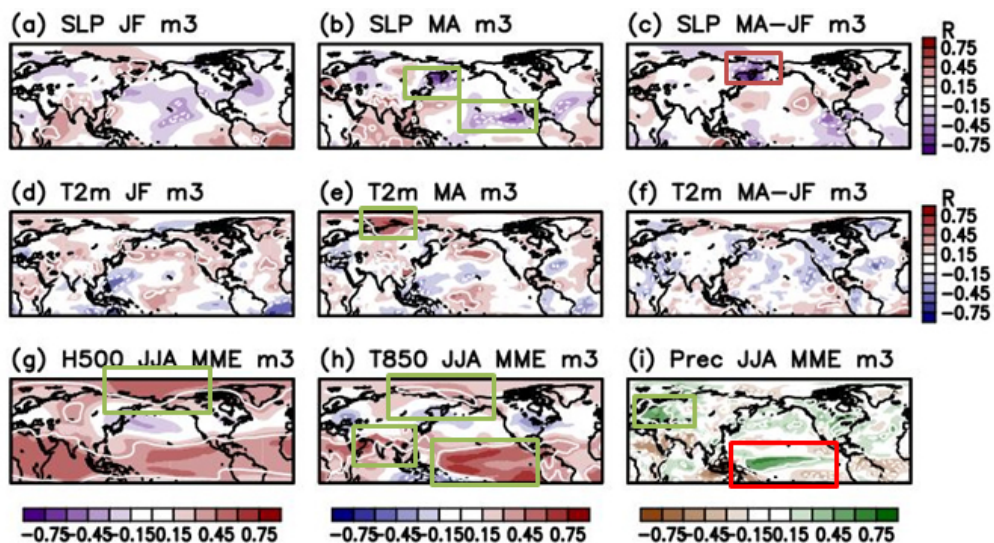


Figure 12 Same as the Figure 10 but for the third mode.

4.2 예측과 검증

위에서 선택된 예측 인자들을 이용하여 각 모드별로 예측을 수행하여, Fig. 13에서 관측에서 얻은 PC와 예측된 PC를 비교하였다. 예측은 두 기간으로 나누어 수행하였는데, (a) 1983-2005년, (b) 2008-2016년이다. (a) 1983-2005년은 APCC-MME의 hindcast와 일치하는 기간으로 이 기간은 MEOF 분석의 target 기간이고 예측 인자를 찾기 위한 상관관계 지도를 세우는 훈련 기간에도 포함되어 있다. 과대 적합을 피하기 위해 1-leave-out cross-validation을 하여 23년 간의 hindcast 자료를 생산하였다. 예측된 PC를 관측에서부터의 PC와 비교하기 위해 상관계수를 계산하였는

데 첫 번째 모드부터 차례대로 0.76, 0.69, 0.73이다. 따라서 (a) 기간 PC에 대한 예측성은 만족할 만하다. 다만 두 번째 모드의 경우 EOF 기간에 따라 basis function의 구조가 달라지기 때문에 현업 예측성을 여기서 얻은 상관계수 (0.69) 만큼 기대할 수는 없다. 좀 더 엄격하게 현업 예측성을 얻고자 한다면 EOF 기간에 대해서도 cross-validation을 하여서 관측과 비교하여야 한다. 이는 후속 연구에서 고려해보고자 한다. 한편 (b) 기간에 예측된 PC와 관측에서부터의 PC의 상관관계는 첫 번째 모드부터 0.40, -0.03, 0.06으로 거의 예측성이 없다.

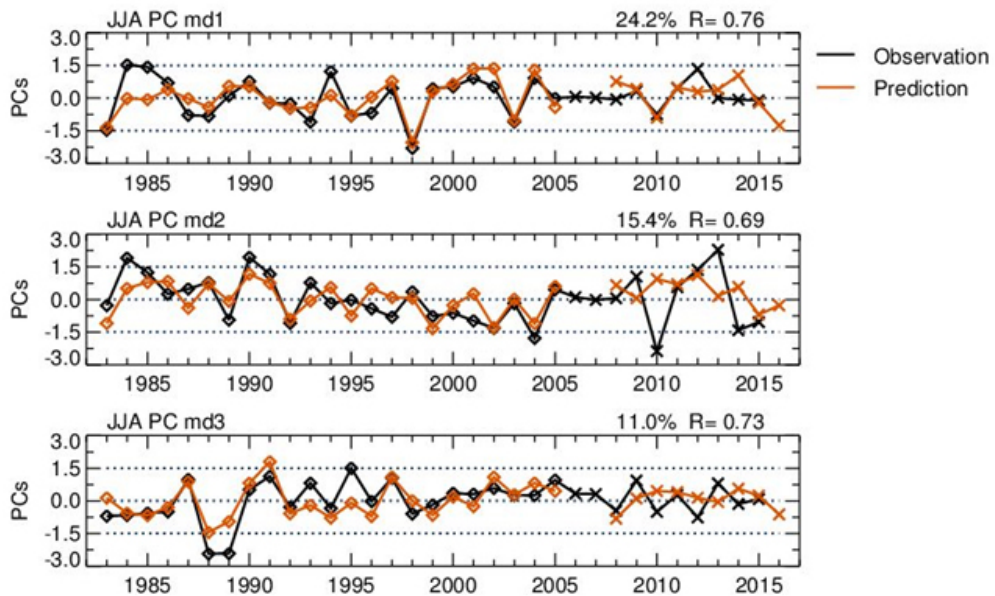


Figure 13 PCs from observation (black) and prediction (orange). The dependent period (1983–2005) from EOF analysis is represented by diamond symbol. This period has common hindcast among multiple APCC climate models. The hindcast data is 1-leave-out cross-validated. The independent period (2008–2016) from EOF analysis and regression is presented by asterisk symbol. The correlation coefficient skills of the PCs during 1983–2005 are 0.76 (1st), 0.69 (2nd), and 0.73 (3rd), respectively.

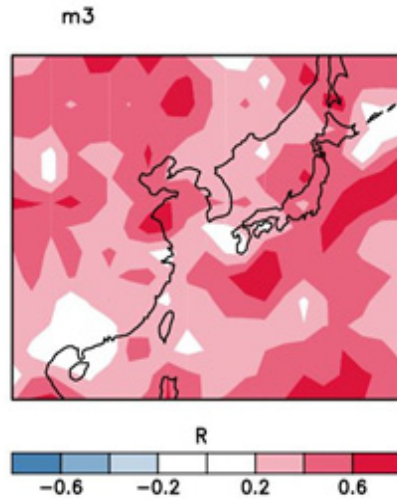


Figure 14 TCC of precipitation between observation (GPCP v.2) and prediction. predicted spatial pattern obtained from a reconstruction of MEOF loading vectors of precipitation and PCs.

(a) 기간에 예측된 PC와 MEOF 공간 패턴을 3번째 모드까지 reconstruction 하여 해당 지역 공간 패턴을 예측 할 수 있다. Fig. 14는 예측된 강수 예측장과 관측값을 비교하여 예측성능(TCC)를 표현한 그림이다. 이 지역 TCC 공간 평균값은 0.41로, 역학 모델만을 이용하여 예측하였을 때보다 예측성이 향상되었음을 알 수 있다. 현업 기관에서 통상적으로 쓰이는 통계 모델이나 역학 모델의 수준을 고려한다면 (a) 기간에 얻은 예측성은 합리적인 수준의 기대치를 만족시킨다.

하지만 많은 국가 기상청에서 실제로는 국가나 지역 단위, 월별로 계절예측 자료를 생산한다. 즉, 동북아시아 몬순에 의한 강수를 예측한다 하더라도 한 번의 가공을 더 거쳐야 한다. 실제로 한국 기상청에서도 계절 예측의 생산물은 한국 대상으로 매 달 3개월 선행하여 월별 강수, 온도이다. 이를 위해 역학 모델을 기반으로 통계적 후처리를 통해 계절 예측 자료를 보정하는 과정을 거친다.

본 연구의 결과물을 이에 적용하기 위해서는 한국 강수 자료와의 적합화를 거쳐야 한다. 그래서 이를 위해 한국 강수 자료와의 통계적 분석을 하였다. 먼저 (a) 기간에 대해 각 PC와 한반도 여름철 강수와 각 월별로 상관관계를 분석하였다(Table 4).

Table 4 Correlation coefficient of Korea precipitation between observation and each predicted PC during (a) 1983–2005. Asterisk means that the value is significant at 85% confidence level (0.32).

	6월	7월	8월
PC1	0.15	-0.13	-0.09
PC2	0.47*	-0.02	-0.54*
PC3	0.05	0.41*	0.36*

(a) 기간 동안 첫 번째 모드는 여름철 한국 강수와 유의미한 상관관계가 없다. 이 모드는 비록 동북아시아에서 여름 몬순에서 제일 큰 성분을 차지하지만 실제로 한국에 강수를 일으키는 역학적 과정은 이 모드와 연관이 없다. 이 모드는 역학 모델에서 유의미하게 예측할 수 있는 유일한 모드이지만 지역적으로 이를 적용할 때는 이처럼 효용성이 낮아지기 때문에 주의해야 한다. 첫 번째 모드와 한국 강수의 상관없음은 중위도 지역 강수 계절예측의 어려움을 반증하는 결과이기도 하다.

같은 기간 두 번째 모드는 6월과 8월에 상반되는 결과를 가져온다. 그래서 여름철 평균 강수와는 유의미한 상관관계가 나타나지 않는다. 두 번째 모드의 공간패턴은 동북아시아 남동쪽과 북동쪽에 상대적 고기압이 자리하고 이들 사이에 상대적으로 수렴이 일어나는 지역에 강수가 나타나는 구조이다. 6월말은 한국에서는 장마가 전선이 발생하는 기간으로 남쪽의 북서태평양 고기압과 북쪽의 오호츠크해 고기압의 사이에서 전선이 발달하고 장마가 발생하는 메커니즘과 일치한다. 즉 두 번째 모드는 6월 중순-하순 한국에서 장마 전선이 발생하는 현상을 설명할 수 있다. 반면 8월은 장마 전선이 북상하고 약해지는데 이 때 한반도는 장마 전선의 남쪽에 위치한다. 북쪽에 장마 전선이 발달할 때 남쪽에서는 온도가 상승하고 건조한데 8월에 두 번째 모드가 이런 현상을 설명할 수 있다. 다만 이 모드는 장마가 활성화되었을 때보다 형성과 소멸 시기 메커니즘을 설명하여 7월 한국 강수에 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다.

(a) 기간 세 번째 모드는 일본 남부의 고기압이 발달하면서 한반도에 남풍을 유입시킨다. 따라서 이 모드는 7월, 8월에 안정적으로 한국 강수 발생에 긍정적으로 기여한다.

real-time forecast 기간인 (b) 기간은 (a) 기간과 동북아시아 여름 몬순의 특징이 달라지고 예측성이 낮아지기도 하여 이 기간 한국 강수와의 상관관계는 (a) 기간과는 달라진다. 이를 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Correlation coefficient of Korea precipitation between observation and each predicted PC during (b) 2008–2015. Asterisk means that the value is significant at 85% confidence level (0.58).

	6월	7월	8월
PC1	0.44	0.03	0.28
PC2	0.17	0.09	0.87*
PC3	-0.06	0.04	0.59*

여전히 첫 번째 모드는 한국 강수에 기여하는 바가 없다. 두 번째 모드는 decadal change를 많이 겪는 모드로서, 이는 장마의 장기 변동성과도 관련있다. 실제로 한국 강수의 intra-seasonal variation는 장기적으로 변동을 겪었는데, 최근 들어 장마에 의한 1차 강수, 휴지기, 2차 강수의 구분이 예전보다 모호해졌다(Roh and Kim 2012). 두 번째 모드는 한국 장마 전선의 형성과 소멸에 미치는 영향이 줄어들고 8월 중국 내륙에 위치하는 저기압의 발달 여부가 한국 강수에 영향을 미치는지의 여부가 더욱 중요해져서 8월 강수와의 상관관계가 커졌다. 이 두 번째 모드에 대해서는 더욱 분석이 필요한 것으로 보이는데 이에 대한 분석이 한국 강수 예측에 기여할 수 있을 것이다.

세 번째 모드는 7월 강수에 미치는 영향은 없어지고 8월 강수에 미치는 영향은 더욱 커졌다. 이는 일본 남부와 오키나와 지역 지위 고도의 dipole 패턴이 8월 한국 강수에서의 역할이 더 커졌음을 의미한다.

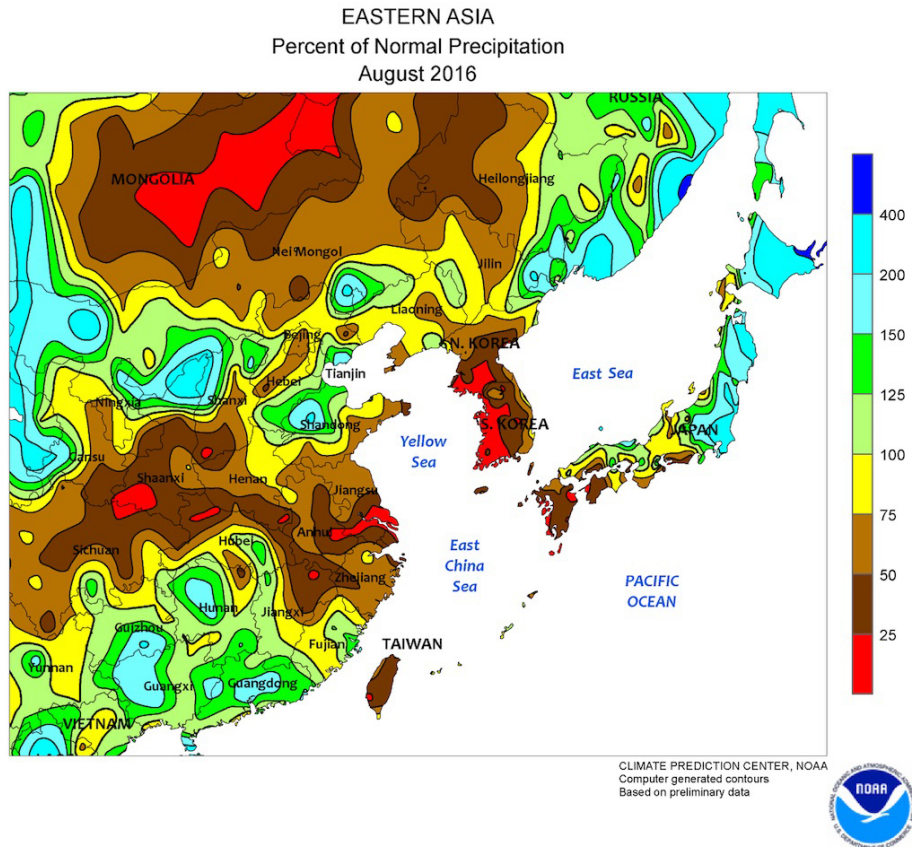


Table 15 Precipitation ratio to normal precipitation at August 2016. Korea peninsula precipitation ratio was below 50% at this time.

real-time forecast 기간인 (b) 기간은 회귀 예측식을 찾는 기간과는 독립적이기 때문에 (a) 기간에 비해 예측성이 떨어질 수밖에 없다. 이것은 과거의 예측성이 미래에 그대로 적용될 수 없다는 예측의 한계 때문인데 그래서 많은 훌륭한 통계 계절예측 모델을 현업에 적용하였을 때 실패를 겪게 된다. 따라서 본 연구에서는 독립적 예측 구간을 길게 구성하여 최대한 한국 강수 현업에 쓰일 수 있는 정보를 추출하고자 하였다. Table 5가 그 결과라 할 수 있는데, 본 연구에서 정의된 2, 3번째 모드가 8월 한국 강수 발달에 긍정적인 영향을 미치기 때문에 7월에 이 모델을 통해 PC의 예측값을 얻게 되면 이를 통해 8월 한국 강수 예측에 활용할 수 있을 것이다. 실제로 한국은 2016년 8월에 매우 건조했는데(Fig. 15), PC 2, 3은 2016년에 음의 값을 예측하였고 이를 8월 한국 강수에 적용하면 일치한다.

5. 결론

본 연구에서는 동북아시아 여름 몬순을 예측하는 모델을 개발하였다. 이를 위해 중위도 지역 물리적 과정을 주요하게 포함할 수 있도록 동북아시아 여름 몬순을 MEOF 분석을 통해 정의하였다. 첫 번째 모드는 동아시아 지역 전역에 큰 영향력을 미치는 북서태평양 고기압의 변동성에 의해 설명된다. 북서태평양 고기압은 아열대와 중위도에 dipole pattern을 유도하는데 이는 대기와 해양의 상호교환으로 인해 유지된다. 이와 별개로 두 번째 모드는 동아시아 중위도 파동 전파로 설명되는 모드로서, 유라시아 대륙의 중위도에서 동서방향으로 전파되는 지위 고도와 표면 온도 파동의 풍하층에 동북아시아가 위치하여 이 지역 강수와 지위 고도가 큰 영향을 받는다. 세 번째 모드는 오호츠크해 저기압과 일본 남부 고기압의 dipole pattern의 변동성이 설명한다. 일본 남부 고기압은 특히 동북아시아에 습윤한 남풍을 유도하여 강수를 일으키는 호조건을 충족한다. 동북아시아 여름 몬순은 이들의 합이라 할 수 있다.

각 모드는 고유의 물리적 과정이 있고 이들의 물리적 과정을 고려해 예측함으로써 예측성을 높이하고자 하였다. 이를 위해 각 PC를 타겟으로 삼아 예측 모델을 개발하였는데 예측 인자는 관측장과의 지연-선행 상관관계, APCC-MME 역학 모델과의 동시 상관관계를 분석하여 선택하였다. 관측장과의 지연-상관관계는 대기 변동에서 느리게 변동하는 성분인 표면 온도, 해면 기압장과 여름 몬순의 관계를 규명한 것이다. 봄철 혹은 여름철부터 축적되는 표면 온도나 해면 기압장의 변동성이 여름철 몬순의 변동성에 주는 영향을 측정하여 이를 예측에 활용한 것이다. 이에 더해 APCC-MME와 같은 역학 모델에서 동북아시아 여름 몬순의 어떤 성분을 정확하게 예측할 수 있는 부분이 있다면 이를 적극적으로 수용하여 동북아시아 몬순과의 동시 상관관계까지 활용하여 예측 인자의 범위를 넓히고자 하였다.

첫 번째 모드는 역학 모델에서 북서태평양 고기압의 변동성에 의해 유도되는 동아시아 지역 강수, 봄철 PNA 변동성이 예측 인자이다. 첫 번째 모드는 특히 겨울철에 발달하고 이듬해 소멸하는 엘니뇨와 매우 큰 상관관계를 지니는데 이는 선행 연구들에서도 잘 밝혀진 메커니즘이다(Wang et al. 2013). 겨울철에 발달하는 동태평양 엘니뇨는 이듬해 봄철, 여름철에 인도양, 북서태평양에 영향을 끼쳐 북서태평양 고기압을 발달시키고 이로 인해 동북아시아 지역에는 강수가 발달하는 경향이 있다. 두 번

째 모드는 중위도 유라시아 파동 전파를 유도하는 표면 온도장과 해면 기압장이 예측 인자이다. 유라시아 대륙의 동쪽에서는 겨울부터 냉각화가 진행되고 봄철에 유라시아 대륙의 중앙에서는 온난 이류에 의해 온난화가 진행된다면 여름철에 유라시아 대륙에서는 지위 고도와 온도장의 동서방향 파동이 형성되고 풍하측인 동북아시아 지역이 영향을 받게 된다. 세 번째 모드는 봄철부터 발달하는 오호츠크해 저기압과 여름철 중앙 태평양 엘니뇨 발달 여부이다. 봄철부터 발달하는 오호츠크해 저기압은 여름이 되면 일본 남쪽에 고기압을 형성시킨다.

김유진(2015) 기술 보고서에서는 관측 자료만을 이용하여 예측 인자를 찾았는데, 본 연구에서는 이에 더해 역학 모델인 APCC-MME의 예측장도 예측 인자를 찾는 데 포함하였다. 이를 통해 현업에서 활용 가능한 안정적인 예측 인자를 얻을 수 있었다. 예측 인자를 선정할 때 중요한 요인 중 하나는 예측 인자들 간의 독립성이다. 관측 자료만을 이용하였을 때는 서로 독립적인 인자를 찾기 위해 해빙, 적설량까지 관측 변수를 넓혔어야 했는데 실제로 해빙과 적설량은 관측 데이터의 업데이트가 빠르지 않기 때문에 현업에서는 활용할 수 없다. 따라서 본 연구에서 매달 예보 자료를 생산하는 APCC-MME까지 포함하여 잠재적 예측 인자의 범위를 넓힌 것은 안정적이고 활용 가능한 예측 인자를 찾는 데 큰 역할을 하고 현업 활용의 가능성을 높였다

예측된 PC와 이에 대응하는 공간 패턴을 reconstruction하여 예측 공간장을 얻었다. 과거 예측 인자를 활용해 과거 자료를 재현하고 이를 검증하였는데 1983-2005년 기간에 대해 동북아시아 지역 강수는 0.41 정도의 TCC 스킵을 가진다. 역학 모델만을 이용했을 때 동북아시아 지역 강수의 TCC 스킵은 0.21인데 이보다 유의미한 수준으로 향상되었다.

2008-2016년 기간에 대해서는 독립적 예측을 수행하고 이 구간에 대한 예측 정보를 활용해 국가나 지역 단위로 활용할 수 있는 가이던스를 마련하고자 한국 강수 예측에 활용하는 예를 소개하였다. 즉 동북아시아 몬순 예측을 국가나 지역 단위로 적합화하는 과정을 보였다. 월별로 생산하는 여름철 한국 강수 현업 예보에 동북아시아 몬순 예측 정보를 활용할 수 있는데 특히 8월 강수 예측에 유의미한 정보를 더해 줄 수 있다. 두 번째 그리고 세 번째 모드가 8월 한국 강수량과 큰 상관관계가 보였는데 이를 현업 예보에 활용할 수 있을 것이다. 이들 두 모드는 역학 모델에서는 예측이 불가능한 성분이라 더욱 유용한 정보라 할 수 있다.

REFERENCE

- 김유진, 2015: 통계계절예측 시스템을 이용한 중위도 동아시아 여름몬순 예측성 향상. APEC 기후센터
- Branstator, G., 2002: Circumglobal teleconnections, the jet stream wave guide, and the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, 15, 1893–1910.
- Barnston A.G. and R.E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115, 1083–1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *Journal of Climate*, 18, 3483–3505.
- Huffman, G.J., D.T. Bolvin, and R.F. Adler, 2011: Last updated GPCP Version 2.2 combined precipitation data set. WDC-A, NCDC, Asheville, NC (2011).
- 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, 1631–1643.
- Krishnamurthy, V. and J. Shukla, 2007: Intraseasonal and seasonally persisting patterns of Indian monsoon rainfall. *Journal of Climate*, 20, 3–20, doi:10.1175/JCLI3981.1.
- Kwon, M. and K.-J. Lee, 2014: A prediction of Northeast Asian summer precipitation using the NCEP climate forecast system and canonical correlation analysis. *Journal of Korean Earth Science Society*, 35, 88–94.
- Lee, D.Y., J.-B. Ahn, and J.-H. Yoo, 2015: Enhancement of seasonal prediction of East Asian summer rainfall related to western tropical Pacific convection. *Climate Dynamics*, 45, 1025–1042.
- Lee, S.-E., and K.-H. Seo, 2013: The development of a statistical forecast model for Changma. *Weather and Forecasting*, 28, 1304–1321.
- Michaelsen, J., 1987: Cross-validation in statistical climate forecast model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, 1589–1600.
- 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). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (21), 12132–12150.
- Miyasaka, T., and H. Nakamura, 2005: Structure and formation mechanisms of the

- Northern Hemisphere summertime subtropical highs. *Journal of Climate*, 17(9), 1767–1776.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. *Earth's Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction*, Geophys. Monogr., Vol. 147, Amer. Geophys. Union, 329–345.
- Roh, J.-W., K.-Y. Kim, and J.-G. Jhun, 2012: Decadal changes in the physical mechanisms of the seasonal cycle of summer time precipitation variability in Korea. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 117, D07115, doi:10.1029/2011JD017268.
- Sato, N. and M. Takahishi, 2007: Dynamical processes related to the appearance of the Okhotsk high during early midsummer. *Journal of Climate*, 20, 4982–4994, doi: 10.1175/JCLI4285.1.
- Sung, M.-K., W.-T. Kwon, H.-J. Baek, K.-O. Boo, G.-H. Lim, and J.-S. Kug, 2006: A possible impact of the North Atlantic Oscillation on the east Asian summer monsoon precipitation. *Geophysical Research Letters*, 33, L21713, doi:10.1029/2006GL027253.
- Wang, B., B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2013: Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 2718–2722.
- _____, R. Wu and X. Fu, 2000: Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?, *Journal of Climate*, 13, 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- _____, J.-Y. Lee, and B. Xiang, 2015: Asian summer monsoon rainfall predictability: a predictable mode analysis. *Climate Dynamics*, 44, 61–74.
- _____, Z. Wu, J. Li, J. Liu, C.-P. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 21, 4449–4463.
- Wilks, D.S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Academic Press, 630 pp.
- Yang, J., Q. Liu, S.-P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 34, L02708, doi:10.1029/2006GL028571.
- Zhou, T.-J., and R.-C. Yu, 2005: Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *Journal of Geophysical Research*, 110, D081104.

연구보고서 2016-12

**APCC-MME를 이용한 동북아시아 여름몬순
물리-경험 계절 예측 모형 개발**

Development of a physical-empirical seasonal forecast model for the
northeastern Asian summer monsoon using APCC-MME

김유진



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-163-3