

APCC MME 계절 예측 자료 특성 분석: 기후변동모드, 영향, 그리고 다중 모형 비교

Analysis of Seasonal Forecast Data:
Climate Variability, Its Impacts, and Inter-Model Comparison

김선태 기후분석팀

이윤영, 오지현 예측기술팀

임아영 예측운영팀

발간사

이상 기후 현상의 사회적, 환경적 영향 때문에 정확한 계절 예측에 대한 요구가 증가하고 있습니다. 이에 부응하기 위하여 APCC는 아시아 태평양 국가들에 계절 예측 정보를 제공하기 위해서 매월 전세계 기후관련 기관들의 계절 예측 정보를 이용하여 전지구 다중 모델 앙상블 예측 시스템을 운영하고 있습니다. 다중 모델 앙상블 예측성 향상에 기여하고, 예측 자료의 활용성을 극대화하고자 다양한 시각에서 개별 모델들의 예측 성능 및 오류들을 분석하는 연구들이 매년 제안·수행되고 있습니다.

일반적으로 기후 예측 모델의 예측성 분석은 결정론적 혹은 확률적 측면에서 이루어지지만, 실제 계절 예측 모델의 기후 예측 정보 활용을 위한 예측 성능 정보로서는 충분하지 않습니다. 예측 정보가 좀 더 포괄적이며, 활용성이 높아지기 위해서는 지역 기후에 영향을 미치는 순환장 오류 분석 등 다양한 측면에서 예측성 분석이 필요합니다. 특히, 주요 대기/해양 변동 모드는 전세계 기후에 영향을 미치고, 중요한 예측 인자로서 역할을 하기 때문에 예측성 분석은 중요합니다. 기후 모드들의 전 세계 기후 영향은 원격 상관 역학과 관련되어 있기 때문에, 기후 모드들의 원격상관에 대한 오류분석은 필수적입니다.

그러므로 이 연구보고서는 지역 기온/강수 예측에서 주요 기후 변동 모드들의 원격상관과 관련된 특징 및 오류 분석들을 수행하여, 예측 자료 활용을 극대화하고자 하였습니다. 특히 이 연구에서 제공된 전구 기온/강수에 대한 기후 변동 모드들 영향의 통합 정보는, 현업 예측의 보조 자료로 이용 가능하고, 기후모드 지역 영향에 대한 추가 연구를 시작하는 중요한 동기가 될 수 있을 것으로 생각합니다.

이 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었습니다. 무엇보다도 자문위원으로서 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 예상욱 교수와 서경환 교수에게 감사드립니다. 이 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 기후 예측 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권원태

ABSTRACT

The study presents the ability of seasonal forecast models to represent the observed teleconnection associated with the major climate variability modes including the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), North Atlantic Oscillation (NAO), and Western Pacific (WP) pattern. The prediction skill of the two ocean modes (ENSO and IOD) is much better, in terms of temporal variation, than that of the atmospheric modes (NAO and WP) in seven individual model reforecasts, although the indices for all four modes are mostly well represented in their dominant season.

Firstly, many of the features seen in observations are generally well reproduced in terms of the remote teleconnection associated with the ENSO. However, in some regions, the models simulate air temperature/precipitation responses that are too strong. The errors in temperature/precipitation response for North America, in particular, increase significantly during the ENSO peak season. This leads to temperature/precipitation forecast errors during the development of the ENSO. In most models, a strong linear relationship is maintained between the temperature/precipitation anomalies associated with both the El Niño and the La Niña phases of the ENSO; however, this relationship is weak in observations. One possible reason for the strong linearity in the models is that the remote atmospheric teleconnection pattern between the phases is too linear. Another is that the models cannot realistically simulate the impact of the Arctic variability on the mid-latitude climate, which may be because of the cold bias of the Arctic Ocean in models.

Secondly, the models tend to predict the response of temperature and precipitation to the IOD well over regions adjacent to Indian Ocean. Countries west (east) of the Indian Ocean become warm and wet (cold and dry) during the positive phase of the IOD, while its impact on mid-latitude regions is less distinct. Furthermore, the teleconnection pattern over the Pacific Ocean is similar to that of the ENSO. The variability of sea surface temperature (SST) over the Indian Ocean is predominated by two main modes: the Indian Ocean Basin (IOB) and the IOD modes. Models in which the ENSO variability is stronger than the observation show a larger variance in the IOB and IOD modes. The spatial air-sea coupled pattern associated with the developing phase of the IOD is well represented in models despite a slight difference among them. By excluding the ENSO effect, the influence of the IOD over East Asia becomes stronger, but the models fail to show this increased impact.

Third, the impact of the NAO is observed broadly over the region from eastern North America across the north Atlantic to far eastern parts of Asia, and a significant temperature/precipitation impact area is well represented in many of the models and ensembles. In some cases, however, there is a clear inter-model diversity for the impact of the NAO. For instance, in April the NAO temperature response over Europe and the Asian continent varies from model to model, and it seems to be associated with the mean bias of the SST in the North Atlantic. Interestingly, the models tend to show a one-month delayed regional response in the NAO during spring (e.g., the model response in March is more similar to observed responses in February than in March) and the NAO peak season is also delayed to March in the model simulations. This delayed response seems to be associated with the exaggerated relationship between the ENSO and NAO during spring.

Fourth, the temperature response to the WP mode is very pronounced during the boreal spring and winter seasons in East Asia, the Bering Sea, and North America. Interestingly, the model's skill score is relatively high during the transitions between

seasons in September and October. However, there are large errors in the remote temperature response in October. The precipitation response in the tropical Pacific and over the North American continent is also simulated adequately by climate models. However, most of the models have errors where the positive temperature and precipitation response in tropical regions in December is maintained until the spring of the following year.

Lastly, this study presents a map of climate mode impacts that collectively displays all significant modes (from the ENSO, IOD, NAO, and WP) that affect temperature/precipitation at individual grids for 12 months. The statistical summary of this map is also given for six verification regions. The map will provide supplementary information for monthly consensus predictions in the APCC and a tangible guide to the researches of tailoring multi-model ensemble forecasts.

목 차

1. 서론	1
2. 자료 및 분석 방법	4
2.1 계절 예측 모형과 과거 재현 자료	4
2.2 관측 자료	4
2.3 기후모드 정의	5
2.4 모형 검증 지역 및 지수	6
3. 기후모드 지수변동성 및 지역반응	8
3.1 기후모드 지수 예측성	8
3.2 기후모드의 지역반응 모의 특성	11
3.2.1 다중모형/양상별 간의 일관성 및 관측 대비 오차	11
3.2.2 기후모드 지역반응에 대한 다중모형간 모의 성능 비교	50
4. 기후모드 영향에 대한 전지구 통합 가이던스맵	55
5. 결론	62
▮ REFERENCES	66

1. 서론

앞으로 일어날 기후 현상에 대해서 예측을 하기 위해서는 여러가지 성분 모형들(즉 대기, 해양, 빙권, 지면 등)이 접합된 예측 모형이 필요하다. 이를 위해 수십 년 동안 상당한 기후 접합 모형 개발 노력 및 향상이 이루어졌다. 특히 물리적 모수화의 향상, 모형 해상도의 상당한 증가, 고품질의 관측자료, 고성능 초기화 기법 등으로 인하여, 기후 접합 모형의 예측성능은 한층 증가했다(Luo et al. 2005; Guilyardi et al. 2009; Bellenger 2013; Watterson 2015). 그러나 여전히 기후장을 모의하는데 있어서 상당한 오류와 예측 자료의 불확실성이 존재하며, 그것을 고려하면서 모형 예측 자료들을 활용해야 한다. 그러므로 예측 모형이 지닌 고유의 장점과 단점을 파악하기 위해서는 다양한 시각에서 예측 자료들의 특성을 분석 하는 것이 필요하다.

APEC 기후센터(APEC Climate Center, 이하 APCC)는 다양한 기관의 기후 모형으로부터 생산된 기후 예측 자료들을 보유하고 있다. 또한 차세대 APCC 현업 모형인 SCoPS가 다년간의 검증을 거쳐 2017년 11월부터 APCC Multi-Model Ensemble(MME, Min et al. 2017) 계절 예측 시스템에 편입되어 계절 전망에 활용됨에 따라 SCoPS의 과거 예측 자료들이 온전히 갖추어진 상태이다. 이렇듯 풍부한 모형 자료들이 준비되어 있기에, 그 자료들을 활용한 연구 또한 다양하게 수행될 수 있겠다. 그럼에도 불구하고 그동안의 다수의 연구들은 현업 활용성 측면에서 단편적인 예측성 평가 위주로 이루어져 왔기에, 모형들의 예측성을 역학적 측면에서 연결 짓는 연구는 다소 부족하였다. 모형 내 역학적 과정에 대한 분석은 모형 개선이나 편이 보정된 예측 정보 생산에 활용될 가능성이 있으므로 그 의미가 크다.

특히, 주요 대기/해양 변동 모드는 전세계 기후에 영향을 미치고, 예측 모형의 predictability source로서 역할을 하기 때문에 그들의 예측성 분석은 중요하다. 더욱이 기후 모드들의 전 세계 기후 영향은 원격 상관 역학과 관련되어 있기 때문에, 기후 모드들의 원격상관에 대한 오류분석들은 필수적이다.

적도 동태평양의 해수면 온도(sea surface temperature, 이하 SST) 변동과 관련되며, 북반구 겨울철에 강도가 최고치에 이르는 가장 주요한 대기-해양 결합 지배 기후 변

동 모드인 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)은 태평양 도서국들을 포함하는 근거리의 적도 지역뿐만 아니라 먼 거리의 중위도 지역 등의 기상/기후에 영향을 미치며, 그로 인한 사회, 경제적인 피해를 유발할 수 있다(McPhaden 1999; McPhaden et al. 2006; Cai et al. 2015). 그리고 ENSO의 강제력은 전지구 계절 예측 결과를 결정한다고 해도 무방하기 때문에 계절 예측 모형에서 ENSO의 예측성능은 상당히 중요하다(예, Peng et al. 2011; Kim et al. 2012; Jia et al. 2015).

또 하나의 SST 변동성이 중요한 지역은 전세계 대부분의 몬순 지역에 의해 둘러 쌓여 있는 인도양이며, 인도양의 SST 변동성은 ENSO처럼 전지구 역학 모형의 계절 예측성에 영향을 미친다. 아울러 인도양 해수면 온도는 인접 국가의 강수량과 기온 변동성에 많은 영향을 미치기 때문에(Saji and Yamagata 2003) 인도양의 SST 변동성 및 그것과 관련된 원격상관을 잘 예측하는 것은 매우 중요하다. 특히 2년의 주기를 갖는 Indian Ocean Dipole(IOD) 관련 SST 변동은 동아프리카와 인도네시아 같은 주변 지역 혹은 인도양에서 떨어져 있는 동아시아의 강수에 지대한 영향을 미친다고 알려져 있다(Saji et al. 1999; Ashok et al. 2004; Behara et al. 2005; Cai et al. 2011a).

북반구 중위도의 대기 순환장은 여러 개의 저주파 자연 변동 모드들에 의해 지배된다(Barnston and Livezey 1987; Hsu and Wallace 1985; Mo and Livezey 1986; Thompson and Wallace 1998; Wallace and Gutzler 1981). 그 중, North Atlantic Oscillation(NAO)과 Western Pacific(WP) 원격상관 패턴은 북반구의 주요한 변동 모드로서, 그 위상과 강도가 북반구 중위도 지역 날씨에 강하게 영향을 끼친다(Archambault et al. 2008; Baxter and Nigam 2015; Cellitti et al. 2006; Kenyon and Hegerl 2010; Leathers et al. 1991; Linkin and Nigam 2008; Notaro et al. 2006; Scaife et al. 2008; Westby et al. 2013).

그러므로 이 연구에서는 전 지구 해양 및 대기의 주요 기후 변동 모드들인 ENSO, IOD, WP, NAO 변동 모드들의 지역 기후 영향 측면에서 원격 상관의 특징 및 오류들을 분석하여 기후 변동 모드들과 관련된 영향들에 대한 APCC MME 개별 모형들의 예측성능 정보들을 제공하여 예측 정보 생산에 활용 될 수 있도록 하고자 한다.

본 연구는 섹션 2에서 자료 및 분석 방법 등이 기술되었으며, 섹션 3에서는 주요 기후

모드들의 변동성과 그들과 관련된 지역 기온/강수의 반응 즉 원격상관에 대한 예측성을 분석하였으며, 아울러 예측 모형 오류들에 대한 가능한 원인들에 대하여 기술하였다. 네 번째 섹션에서는 주요 기후 모드들의 관측에서 전 지구 강수/기온 영향에 대한 통합 가이던스를 제공하였다. 마지막 섹션에서는 본 연구의 주요 결과를 정리하였으며, 아울러 본 연구에서 시사하는 점등을 기술하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 계절 예측 모형과 과거 재현 자료

본 연구에서는 APCC MME 참여 모형 들 중 공통으로 과거 예측 자료 기간을 최대한 길게 확보할 수 있는 7개의 모형들이 선택되었다. Table 1에서 연구에 사용된 모형들과 모형들의 해상도, 개별 모형의 앙상블 멤버 개수, 성분모형들 그리고 모형에 대한 자세한 설명을 위한 참고문헌들이 나열 되어있다. 과거 예측 자료의 공통기간 즉 1982년에서 2010년에서, 특히 1개월 예측선행시간에서 예측 자료들을 사용하여 예측성 분석들이 수행되었다.

Table 1. Lists of 7 APCC MME Seasonal Forecast Models.

Acronym	Model	Institute	Ens.	Atmosphere (resolution)	Ocean (resolution)	References
APCC	SCoPS	APEC Climate Center	10	ECHAMv5.3 (T159L31)	POPv2.0.1 (1°x0.5°)	Ham et al. (2018)
CWB	CWB	Central Weather Bureau of Chinese Taipei	30	CWB (T119L40)	N/A	Liou et al. (1997)
MSC	CanCM	Meteorological Service of Canada	20	CanAM4 (T63L35)	CanOM4 (1.41°x0.94°,L40)	Merryfield et al. (2013)
NASA	GMAO	National Aeronautics and Space Administration	10	GEOS-5 (288x181, L72)	MOM4 (720x410,L40)	Molod et al. (2012)
NCEP	CFSv2	National Center for Environmental Prediction	10	GFS (T126L64)	GDFL MOM4	Saha et al. (2014)
PNU	PNU CGCM	Pusan National University	5	CCM3 (T42L18)	MOM3 (2.8125°x0.7~2.8°, L29)	Ahn and Kim (2013)
POAMA	POAMA	Australian Bureau of Meteorology	33	BAMv3.0d (T47L17)	ACOM2 (2°x0.5~1.5°,L25)	Lim et al. (2012)

2.2 관측 자료

관측장 대응으로 NCEP/Department of Energy Atmospheric Model Intercomparison Project II 재분석장(NCEP-DOE, Kanamitsu et al. 2002)을 이용하였다. 이는 2.5°×2.5°의 수평 해상도를 가지며 APCC MME 계절 예측 현업에서 사용되는 재분석장이기도 하다. 해수면 온도 자료로 Optimum interpolation SST version 2(OISSTv2; Reynolds et al. 2007)를, 강수량 자료로 Global Precipitation

Climatology Project(GPCP; Adler et al. 2003)의 관측자료를 이용하였다. 자료 분석은 7개 모형의 과거재현자료 공통기간인 1983년부터 2010년에서 이루어졌다. 기후 모드들의 지역 영향 분석에는 월평균 2m 지상 기온과 월누적 강수량이 이용되었다.

2.3 기후모드 정의

태평양의 주요 SST 변동 모드인 ENSO는 Niño3.4(170°W-120°W, 5°S-5°N) 지역에서 평균된 SST 편차로 정의하였다. ENSO 발달과 관련된 기온, 강수, 지위고도를 분석하기 위해서 합성장 분석을 수행하였는데, 이때 월 Niño 3.4 지수가 0.5°C(-0.5°C) 보다 클 때 엘니뇨(라니냐) 이벤트를 정의하였다.

인도양의 주요 모드인 IOD는 Saji et al.(1999)의 Dipole Mode Index(이하 DMI)로 정의하였으며, DMI는 서인도양(50°E-70°E, 10°S-10°N)과 동인도양(90°E-110°E, 10°S-Equator) SST 편차의 차이로 구해진다. DMI가 양의 값을 가질 때, 서인도양의 해수면 온도 편차가 양의 값을, 동인도양의 해수면 온도 편차가 음의 값을 갖는다.

북반구 전체 주요 대기모드의 분리 특성은 대류권 중층 지위고도 편차 장(Z500)에 회전 주성분 분석법(Rotated principal component analysis, 이하 RPCA) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>)을 적용하여 파악할 수 있다(Lee and Black 2013; Westby et al. 2013). 전 계절에 걸쳐 가장 큰 변동성(10.7%)을 설명하는 모드는 북대서양 상공에서 남북방향 쌍극자 패턴을 가지는데, 이는 통상적으로 NAO로 정의된다(Figure 1). 동아시아에 근접한 북서태평양에서 남북방향 쌍극자 패턴을 갖는 WP는 5번째 모드로 정의되며 6.7%의 변동성을 설명한다. NAO/WP의 시계열 지수는 관측 모드의 공간 패턴을 모형 500hPa 지위고도 편차에 투영하는 방법을 통해 얻어진다.

6 | APCC MME 계절 예측 자료 특성 분석: 기후변동모드, 영향, 그리고 다중 모형 비교

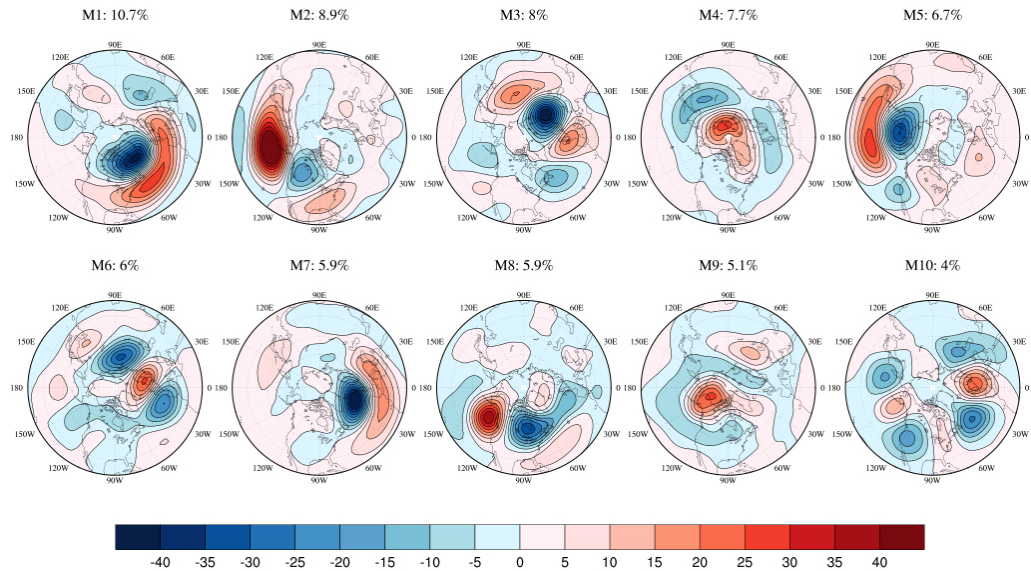


Figure 1. Loading patterns of ten atmospheric modes resolved in NCEP-NCAR Reanalysis dataset for the period from 1983 to 2010. Spatial patterns are defined as top ten rotated loading vectors from RPCA analysis onto standardized 500 hPa geopotential height over Northern Hemisphere [20°N-87.5°N].

2.4 모형 검증 지역 및 지수

기후 변동 모드들의 기온/강수 원격상관 관계를 분석하기 위해서 Figure 2와 같이 전구를 6개의 지역으로 나누었다. 즉 동아시아 지역(E.Asia, 75°E-150°E, 15°N-60°N), 남아시아 지역(S.Asia, 60°E-140°E, 10°S-35°N), 호주 지역(Australia, 110°E-180°E, 50°S-0°N), 호주와 일부 남태평양 포함하는 지역(Aus+S.Pac: 110°E-260°E, 50°S-20°N), 북 아메리카 지역(N.Ame, 190°E-310°E, 10°N-75°N), 남아메리카 지역(S.Ame, 270°E-330°E, 60°S-10°N)으로 분류하였다.

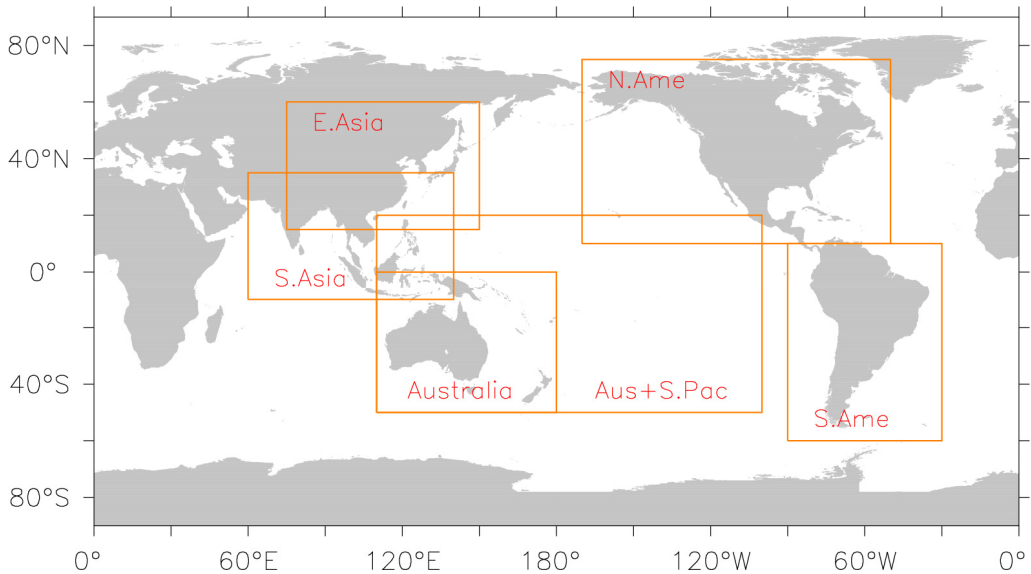


Figure 2. Regional domains for monitoring and analyzing extreme climates. East Asia (E.Asia, 75°E-150°E, 15°N-60°N), South Asia (S.Asia, 60°E-140°E, 10°S-35°N), North America (N.Ame, 190°E-310°E, 10°N-75°N), South America (S.Ame, 270°E-330°E, 60°S-10°N), Australia (Aus, 110°E-180°E, 50°S-0°N), and Australia with some regions of South Pacific (Aus+S.Pac: 110°E-260°E, 50°S-20°N).

모의된 기후 모드의 지수 검증을 위해, 시계열 상관계수(Temporal Correlation Coefficient, 이하 TCC) 검증법을 적용하였다. 기후 모드가 하층 기온/강수에 미치는 영향은 기후 모드 지수와 각 격자 기온/강수값 사이의 상관관계지도로 판단할 수 있다. 관측에서의 기후 모드의 영향이 개별 모형에서 얼마나 유사하게 재현이 되는지는 상관관계지도 사이의 공간 상관계수(Pattern Correlation Coefficient, 이하 PCC)로 정량화하였다. 이 때, 관련성의 절대적인 오차를 함께 고려하기 위해서 도메인 평균값을 제거하지 않고 PCC 계산을 수행하였다.

각 기후 모드의 지역 반응이 계절 예측 모형들에서 얼마나 일관되고 안정적인지를 확인하기 위해서 7개 모형중에서 유의미한(95% 신뢰도 기준) 상관계수를 보인 모형의 개수를 격자별로 나타내었다. 양의 부호와 음의 부호 각각에 대해서 따로 유의한 모형 개수를 세고 이를 부호를 적용하여 합치는 과정을 거쳐 최종 개수를 선정하며, -7에서 7의 분포를 갖는다. 절대값이 클수록 모형들이 일관되게 한쪽 방향의 지역반응을 모의하지만, 0에 가까울수록 모형들이 제각각 다른 반응성을 보여 일관성이 없음을 의미한다.

3. 기후모드 지수변동성 및 지역반응

3.1 기후모드 지수 예측성

각 기후 변동과 관련된 원격상관 분석을 하기 전에 각 변동 모드에 대한 1 개월 선행시간에서 계절 예측 모형의 예측 성능을 분석하였다. 알려진 것처럼 ENSO예측은 분석된 다른 기후 모드 예측 보다 예측성이 우월하였다. Niño3.4 지수의 1개월 선행 시간에서 예측은 모든 달에서 CWB를 제외하고 TCC값이 0.7 이상이었다. CWB는 5월에서 7월에 Niño3.4 지수 예측에서 다른 모형 보다 예측 성능이 떨어졌는데, 1개월 선행 시간에서 6월 Niño 3.4 지수의 예측에서 TCC 값이 0.6 이하였다. 3개의 모형 즉 MSC, NASA, POAMA가 예측성이 가장 좋았으며, 특히 POAMA는 모든 달에서 0.9 이상의 TCC 값을 보였다. APCC와 PNU는 ENSO 전이와 발달 시기 즉 4월에서 9월에 0.8 이하로 떨어지지만 나머지 달들은 0.9이상의 예측성능을 보였다. NCEP은 3월을 제외하고 모든 달에서 TCC가 0.7에서 0.8사이의 값을 가졌다.

IOD의 계절예측 모형의 성능은 대기모드 예측에 비해 좋은 편이지만, ENSO 예측 성능에 비교하였을 때 TCC값이 줄어드는 경향을 보인다. IOD의 최성기(9-11월)에는 모든 모형에서 통계적으로 유의미한 DMI 예측성능을 보이는 것으로 나타났다. ENSO에서와 마찬가지로 POAMA는 모든 달에서 유의미한 예측성능을 보인 반면에, 대기 모형인 CWB는 IOD의 최성기 및 12월에만 통계적으로 유의미한 예측성능을 보였다. 상대적으로 저해상도를 가지는 PNU 또한 다른 모형에 비해 TCC 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. CWB를 제외한 다른 모형에서 IOD의 발달 단계에 해당하는 여름철(6-8월) 중에 유의미한 상관 값을 보였다.

NAO의 경우 두 해양모드에 비해서 시계열 모의 성능이 현저하게 떨어진다. 하지만 그 최성기인 겨울철 특히 1-2월에서의 상관계수값은 상대적으로 높고 많은 모형에서 통계적으로 유의하다. POAMA의 경우 전 계절에서 타모형에 비해 성능이 우월하고, 10, 12, 1-3월에서는 통계적으로 유의한 상관계수값을 보인다. 모형들의 전반적인 성능에서 (맨 우측 테이블) NAO의 활동성이 다소 약한 북반구 여름철 성능이 겨울철 다음으로 높은 것을 확인할 수 있고, 특히 APCC와 CWB는 6월에서 통계적으로 유의한 성능을

보인다. 하지만 봄, 가을에는 예측성을 전혀 찾아 볼 수 없는데, 계절이 전이되는 시기의 전반적인 모형 성능 약화와 일관된 모습이다.

WP 또한 두 해양모드에 비해서 지수의 시계열 모의 성능이 현저하게 떨어진다. WP의 최성기인 겨울철을 지나 봄철에 예측성능이 가장 높게 나타나고 특히 4월에는 가장 많은 모형, 즉 4개의 모형(APCC, MSC, NASA, NCEP)에서 통계적으로 유의한 수준을 보인다. 또한 계절이 전이되는 시기인 9, 10월에 모형의 TCC가 상대적으로 높고 특히 9월은 MSC, NASA, NCEP 모형에서 통계적으로 유의한 수준을 가진다. 하지만 관측에서의 WP 활동성이 약한 북반구 여름철에는 각 모형들에서 다른 계절에 비해서 예측 성능이 아주 낮게 나타나는 특징이 있다. 다른 모드들 즉 ENSO, IOD, NAO 에서 가장 좋은 성능을 보였던, POAMA 는 3월에만 유의한 상관계수 값을 가졌다.

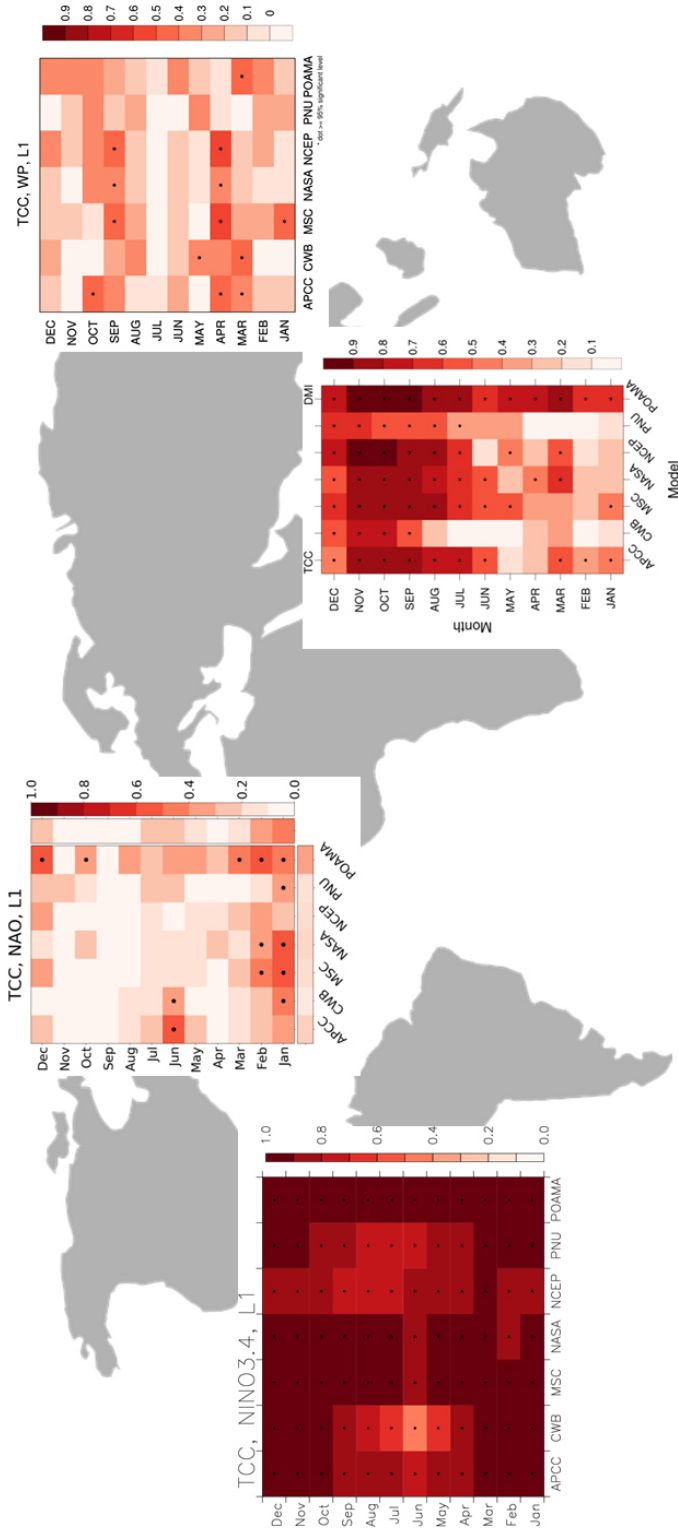


Figure 3. TCC of 4 climate mode indices for each of 12 months and 7 models.

3.2 기후모드의 지역반응 모의 특성

3.2.1 다중모형/양상블 간의 일관성 및 관측 대비 오차

a. ENSO

ENSO와 관련된 전 지구 기온(Figure 4)과 강수(Figure 6) 반응은 ENSO가 발달하는 가을철(9-11월)에서 최성기 시즌인 겨울철(12-2월)까지 분석 되었다. 먼저 Figure 4 첫 번째 열의 해양 지역에서 95%이상 유의한 관계가 있는 지역을 살펴보면 전 달에 대하여 기온은 열대 동 태평양에서 양의 상관관계, 워폴을 중심으로 남북으로 horse shoe-like 모양의 음의 상관관계를 보였다. 인도양에서는 9월에 유의한 상관관계를 보이지 않다가, 10월부터 IOD-like 상관관계 구조 즉 동인도양에서 양의 상관관계, 서인도양에서 음의 상관관계를 보였고, 시간이 지남에 따라 서인도양에서의 음의 상관관계가 사라지고, 2월에는 거의 전인도양에서 양의 상관관계를 보였다. 이는 ENSO 발달 이후 봄철 Indian Ocean Basin(IOB) 모드 발달과 관계가 있다(Klein et al. 1999; Xie et al. 2009). 이러한 관측에서 기온 반응은 대부분의 예측 모형에서 잘 재현되고 있는 것으로 보인다(Figure 4, 2열).

육지 쪽으로 살펴보면 동아시아의 일부 지역에서 9월과 10월 기온과 유의한 상관관계를 가지고, 그 이후로는 상관관계 값이 작았다. 특히 한반도의 기온은 9월만 유의한 상관관계를 보였다. 북미 지역은 10월과 12월에 일부 지역에서 유의한 상관관계를 보였는데, 즉 10월 캐나다 북쪽 지역의 기온과 음의 상관관계, 12월 기온 편차와 양의 상관관계를 가졌다. 남미의 북쪽 지역에서 11월 기온부터 양의 상관관계를 가졌으며, 이후 계속 상관계수 값이 증가하였다. 남아시아지역의 인도 차이나 반도의 11월, 12월, 2월의 기온은 ENSO와 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 호주에서 ENSO와 유의한 양의 상관관계를 보이는 곳은 11월 동부와 12월 서부 지역의 기온 변동이다. 위와 같은 관측에서 ENSO에 대한 기온 반응은 50%의 이상의 모형들에서 잘 재현하였다. 하지만 모형들이 일관되게(7개 중 6개 이상 모형들) 반응에서 오류들을 보이는 지역들이 있었다. 즉 대부분의 모형들에서 10월부터 2월까지 계속 이어지는 인도차이나 반도에서 양의 상관관계, 남미의 북쪽 지역에서 9월과 10월 기온과 ENSO와 유의한 상관관계를 보였는데, 이는 관측에서 나타

나지 않는 원격상관 특징이다. 그리고, 12월부터 2월까지 호주 동부와 서부에서 대부분의 모형에서 유의한 양의 상관관계를, 1월과 2월에 캐나다 부근과 미국 남부 지역에서 대부분의 모형들에서 각각 양과 음의 상관관계들을 갖는 오류를 보였다.

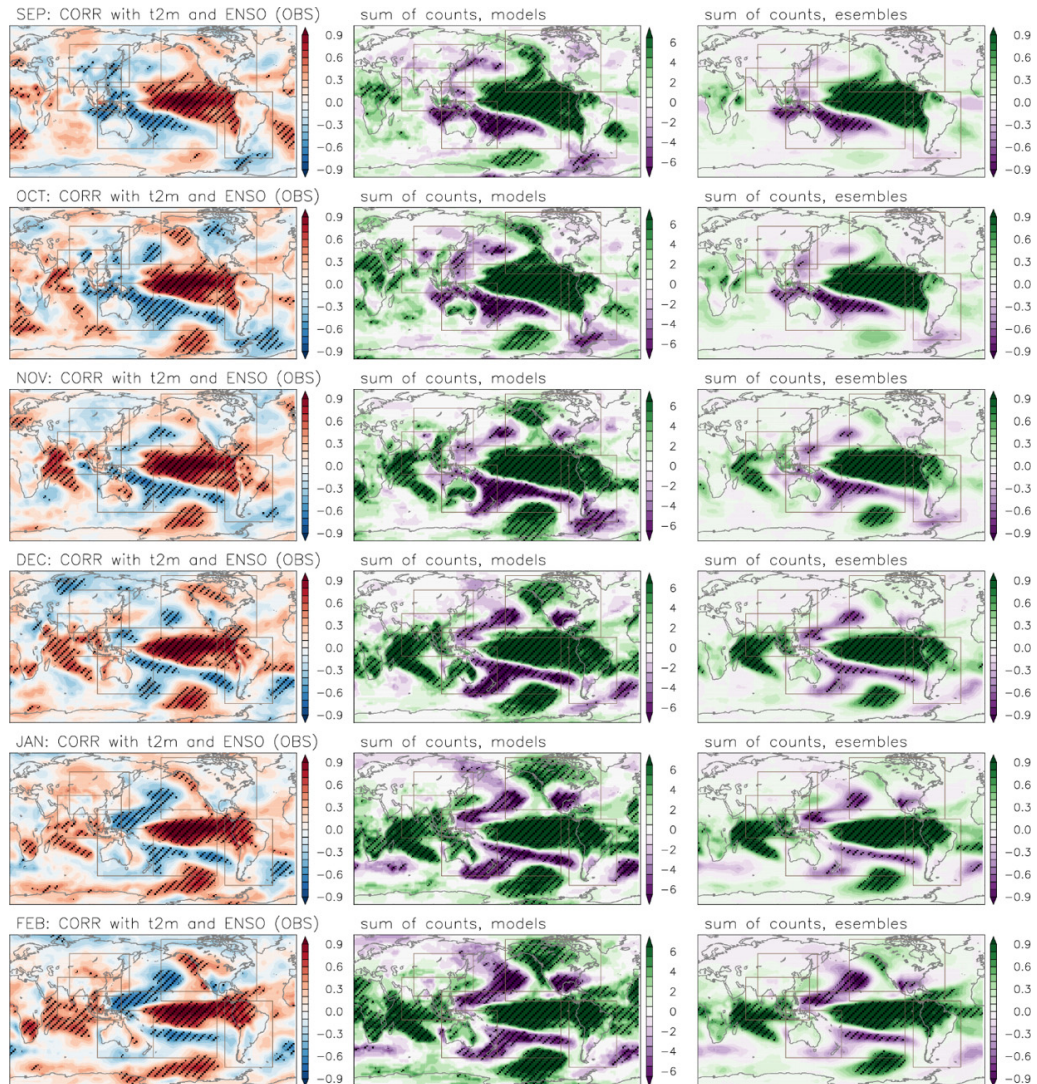


Figure 4. Spatial patterns of (left panels) correlation coefficients of T2M with Niño3.4 index from observations, and (middle panels) model consensus and (right panels) grand-ensemble member consensus in terms of the correlation coefficients. In the middle panels, shades indicate the number of models that the correlation coefficient at each grid point is significant at 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test. In the right panels, shades indicate the percentage of all the ensemble members.

지금까지 ENSO에 대한 기온 반응을 선형적인 관계에서만 살펴보았다. 그리고 그 선형적인 관계에서 북미에서 특히 기온 반응에 대하여 모형들이 오류가 있음을 보였다. 그런데 기온 반응에서 비선형적인 관계가 존재할 수 있기 때문에 비선형적 상관성을 살펴보는 것도 중요하다. 즉 ENSO phase별로 기온 반응에서 모형들의 오류들을 살펴보기 위해서 특히 반응에서 오류가 컸던 1월달의 엘니뇨와 라니냐 시기에 기온 편차에 대하여 합성장 분석을 시도하였다(Figure 5). 모형들을 보면 엘니뇨 시기 동안 남쪽 지역에 음의 편차, 북쪽 지역에 양의 편차가 뚜렷하다. 라니냐 시기 동안은 거의 부호만 바뀐 대칭적인 특징을 보였다. 그러나 관측에서는 엘니뇨 시기 동안 모형에서의 북미기온 합성장 패턴과 상당히 유사하였으나, 라니냐 시기에는 알래스카를 제외하고 부호가 바뀐 대칭적인 특징이 뚜렷하지 않았다. 이 때문에 선형성의 강도를 평가하기 위해서 엘니뇨 시기의 합성장과 라니냐 시기의 기온 편차 합성장의 차이를 계산한 Figure 5 (c)에서 확인할 수 있듯이, 관측에서는 모형보다도 선형성이 상당히 약하였다. 관측에서 북미 기온 반응의 비선형적인 상관성은 ENSO phase별로 구분하여 모형 예측 정보를 활용해야 함을 의미한다. 즉 엘니뇨 시기의 북미 기온 예측은 어느 정도 신뢰할 수 있고, 라니냐 동안 기온 예측 정보 활용은 주의하여 사용되어야 함을 의미한다. 모형에서 기온 및 강수 반응의 강한 선형성의 오류는 이번 절 마지막 부분에서 좀더 토의 될 것이다.

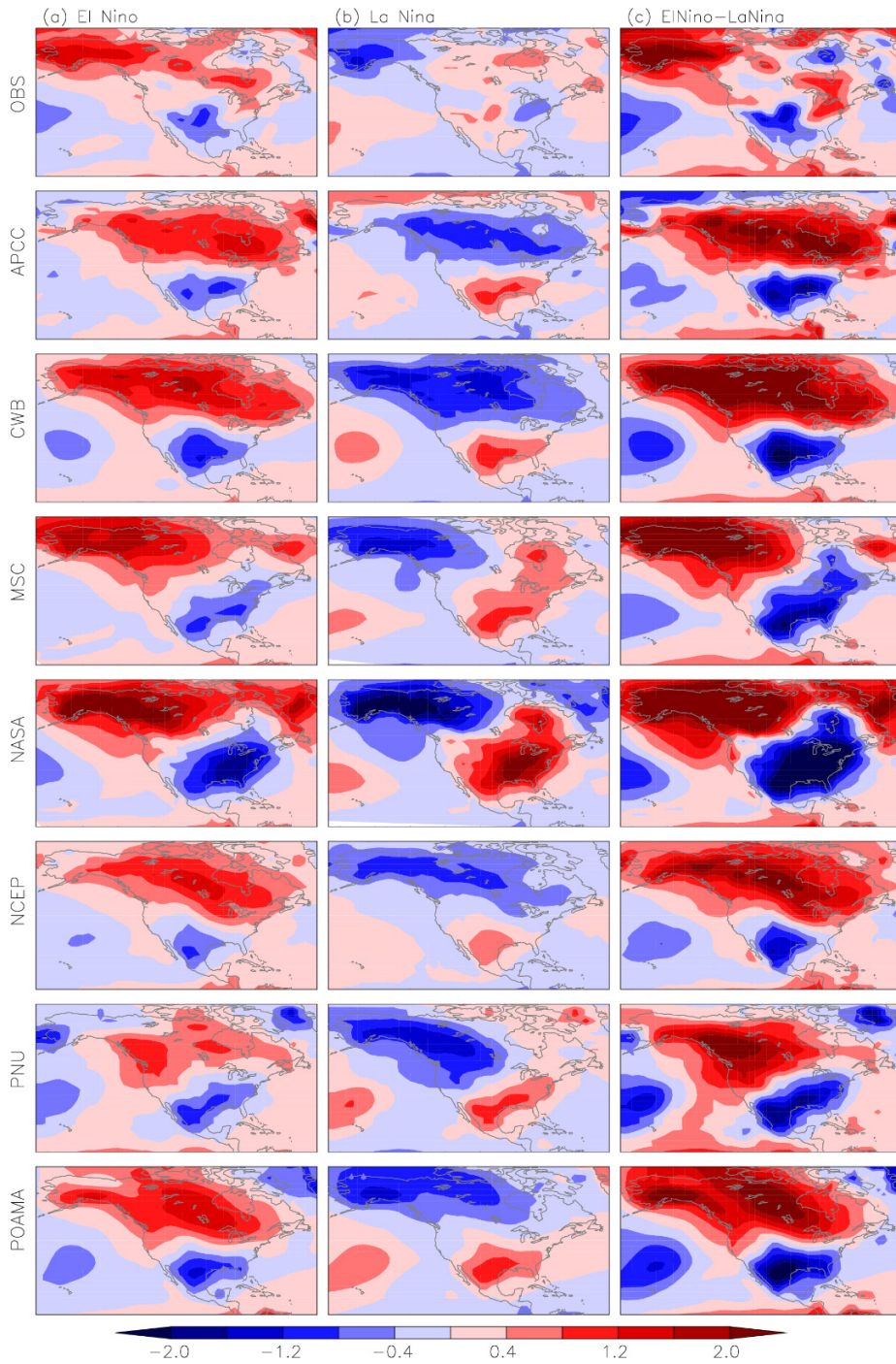


Figure 5. Composite patterns of SST anomalies on January in (a) El Niño and (b) La Niña years, and (c) difference between El Niño and La Niña composites from observations and models.

관측에서 ENSO와 관련된 전지구 강수 반응은 중앙-동 적도 태평양에서 양의 상관관계, 월풀 지역에서 음의 상관관계를 보였다(Figure 6, 1열). 그리고 9월에서 2월까지 필리핀 지역의 강수는 ENSO와 음의 상관관계를 보였다. 이 같은 관계는 대부분의 모형들에서 잘 재현하였다. 관측에서 10월과 11월 인도양에서 IOD-like 강수 반응 패턴 즉, 동 인도양 부근에서 음의 상관관계, 서 인도양 부근 동 아프리카와 중동 사우디까지 확장된 지역에서 양의 상관관계가 있었다. 10월에 대하여 서 인도양의 부근에서 강수 반응을 50% 정도의 모형들이 잘 재현하였지만, 11월의 동일 지역의 강수 반응은 거의 모든 모형에서 잘 재현하지 못하였다. 관측에서는 인도의 서부 지역의 강수와 9월 유의한 음의 상관관계, 11월 양의 상관관계를 보이는데, 예측 모형 7개 중 4개 이상이 관측처럼 9월의 강수 반응을 잘 모의한 반면, 11월 양의 상관관계를 잘 재현하지 못하였고, 10월에는 관측에서 보이지 않는 양의 상관관계의 오류를 보였다. 동아시아에서는 한반도와 중국 동부 지역에서 유의한 상관관계수 값을 갖는데, 즉 9월 ENSO는 한반도의 강수와 음의 상관관계, 11월과 12월에 중국 동부 및 한반도의 강수와 양의 상관관계를 관측에서 보였다. 이와 같은 관측에서 관계는 APCC MME 7개 모형 중 50%에서 잘 재현 하였다. 북미에서는 미국 남부 지역의 강수와 12월과 1월에 유의한 상관관계를 갖는데 반하여, 대부분의 모형들이(즉 7개 중 5개 이상) 10월부터 2월까지 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 관측에서는 보이지 않는, 12월부터 2월까지 약 70% 이상의 모형들에서 북미의 북쪽 부근에 ENSO와 강수의 양의 상관관계를 예측 하였다.

결국 본 연구에서 다중 모형에서 ENSO에 대한 기온/강수의 반응에 대한 오류들은 특히 동 적도 태평양에서 SST 편차가 증가하고 있을 때 다중 모형 앙상블 평균 예측 정보의 활용에서 지극히 주의해야 함을 의미한다. 예를 들면, 북미 지역에서 12월 이후 강수/기온 예측 정보에서 일반적인 모형들의 과도한 기온/강수 반응 오류들에 대한 적절한 correction 방법들이 제안되어야 한다. 모형들의 ENSO반응에 대한 오류들이 개별 예측 모형의 모든 앙상블 멤버들의 일관성 분석에서도 나타나는지 살펴 보았다(각각 Figure 4와 Figure 6의 3열). 먼저 육지에서 기온은 분석된 모든 달에서 ENSO와 상관관계에 대한 앙상블 멤버간 일관성이 상당히 줄어들고(거의 10% 이하), 열대 해양들에서만 50% 이상 멤버들에서 유의한 상관관계가 있는 곳이 존재하였다. 강수 반응에 관해서는 거의 열대 태평양에서만 앙상블 멤버 50% 이상의 일관성이 존재하였다. 육지에서 일관성의

감소는 개별 모형들의 앙상블 멤버들을 고려하는 예측 방법(즉 다중 앙상블 멤버 확률 예측 방법)으로 ENSO 반응오류들을 완화시킬 수 있다는 것을 의미하고, 한편으로는 관측에서 보이는 ENSO 반응(예, 한반도 9월 기온/강수와 음의 상관관계)도 사라져 버리는 단점이 있다. 그러므로 단순 다중 모형 앙상블 평균 방법과 다중 앙상블 멤버 확률 예측 방법에 의한 결과들을 적절히 혼합하여 계절 예측 모형의 예측 정보를 활용해야 할 것으로 사료된다.

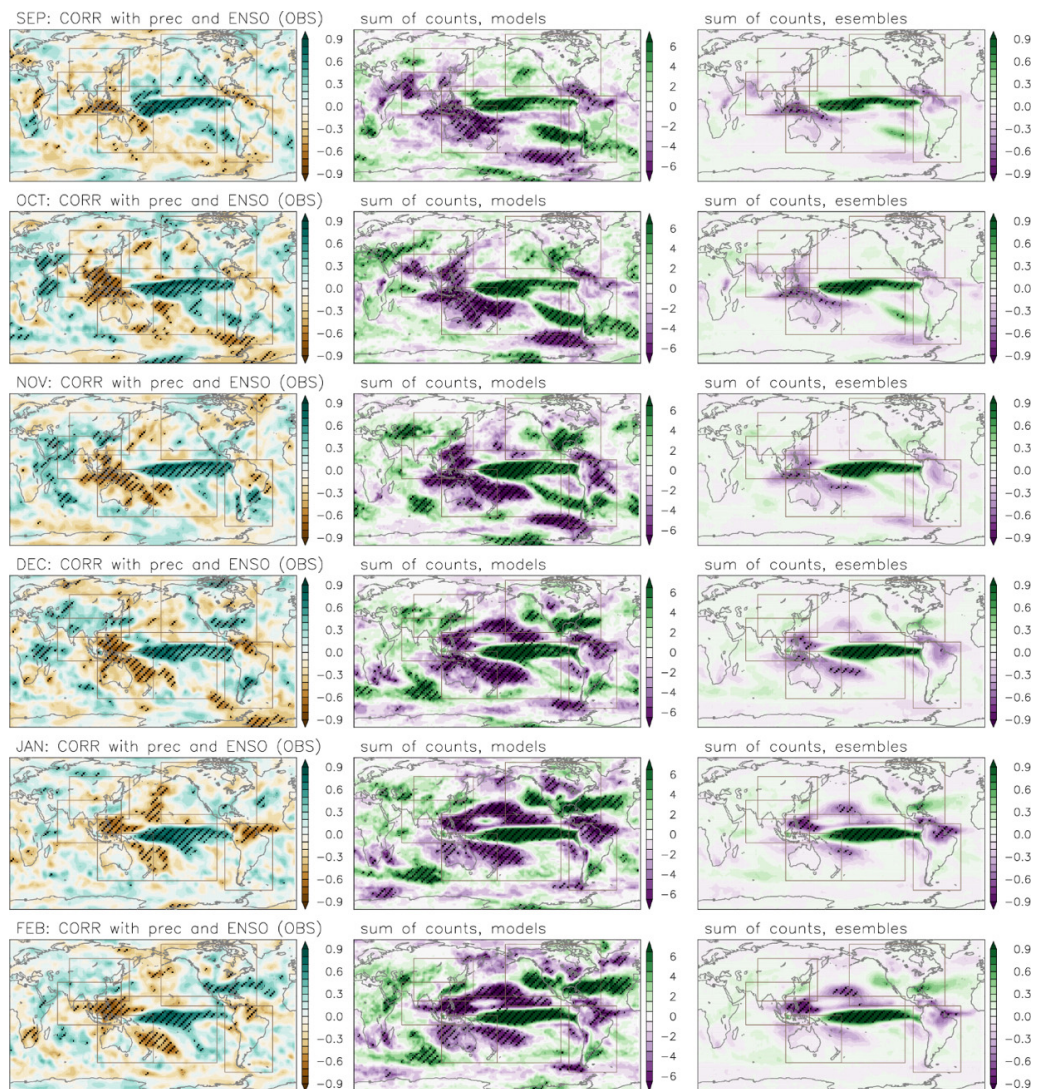


Figure 6. Same as Figure 4 except for precipitation anomalies.

지금까지 기온/강수의 ENSO 반응에 대한 예측 모형들의 오류들을 분석하였다. 특히 뚜렷한 오류들이 북미 지역에서 보였는데, 즉, 대부분의 예측 모형들이 북미 지역에서 ENSO가 최성기에 도달하는 겨울철동안 기온과 강수의 ENSO 반응을 과도하게 모의하고 있다는 것이다. 북미 지역에서 ENSO 반응의 강도를 정량적으로 평가하기 위해서 북미의 박스 영역(Figure 2)에서 상관계수의 절대값을 영역 평균하였다. 그 결과는 Figure 7 (a)와 (b)에서 보여준다. 관측에서는 북미의 기온/강수에 대한 ENSO 반응 강도의 계절 변동이 작았다. 그러나 모든 모형에서 그 반응강도가 관측 보다 컸고, 모형 평균값은 북미 기온 반응에 대하여 11월부터 3월까지 반응 강도가 대폭 증가하고, 이후 감소하였으며, 강수 반응은 1월에서 3월 동안 상대적으로 큰 값을 가졌다. 즉 ENSO 최성기 시즌에 북미 기온/강수 반응강도 오류가 상당히 증가한다는 의미이다.

Figure 7 (c)와 (d)는 특히 모형들에서 ENSO와 기온/강수의 상관계수가 관측보다 큰 값을 가졌던 지역, 즉 북미 북서부 지역(135°W-95°W, 45°N-75°N)에서 영역 평균된 기온과 강수의 Niño 3.4 지수와 상관계수값의 관측과 모형들에서 계절 변화를 보여준다. 관측에서는 12월 기온에 대하여 Niño 3.4지수와 유의한 상관관계를 갖지만, 대부분 APCC MME 참여 모형들은 12월 뿐만 아니라, 4월까지 95%에서 유의한 상관관계를 유지하고 있다. 3월에 모형에서 상관계수 값은 최대치에 이르며, 모형 평균은 약 0.7이상이었다. 특히 CWB가 12월에서 4월까지 상관계수 값이 약 0.8 정도를 유지하였다. 강수는 관측에서 유의한 상관관계를 갖는 달은 없었다. 하지만 모형에서는 1월부터 4월까지 관측보다 상당히 큰 음의 상관관계를 유지하였으며, 3월과 4월에는 95% 유의수준을 넘겼다. 특히 NCEP 모형은 10월부터 5월까지 ENSO와 북미 북부 지역에서 유의한 상관계수 값을 유지하였고, 2월에는 상관계수값이 -0.8까지 이르렀다.

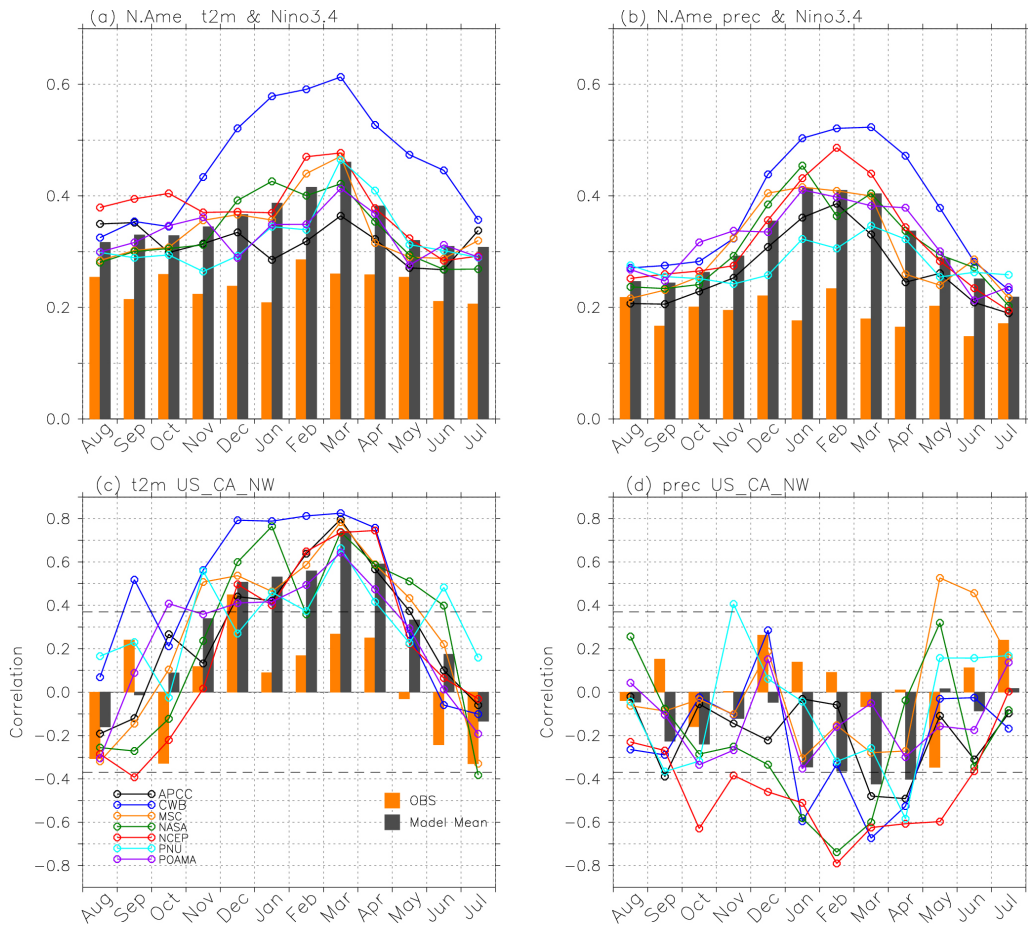


Figure 7. The average of the absolute values of the temporal correlation coefficients in the North America region (see Figure 2) for (a) air temperatures and precipitation from observations (orange bars) and models (colored lines for each model and gray bars for model mean); The correlation coefficients of (c) air temperatures and (d) precipitation area-averaged over the Northwestern America region (135°W-95°W, 45°N-75°N) with Niño3.4 index. In (c, d), gray dashed lines indicate the correlation coefficients that are significant at 95% level.

ENSO 관련된 기온/강수 반응의 오류들의 실제 기온/강수 편차 예측에 영향을 자세히 보기 위해서, 북미 북부 지역 기온/강수의 ENSO와 상관관계에서 오류가 있는 시점 즉 12월부터 3월까지 엘니뇨, 중립, 라니냐 시기로 나누어서 기온, 강수 편차에 대한 box-and-whiskers 분석을 수행하였다(Figure 8). 먼저 12월부터 3월 기온에 대해서 대부분의 모형들이 엘니뇨 동안 양의 편차, 라니냐 동안 음의 편차가 우세하였다. 즉 엘니뇨/라니냐에 대한 기온 반응에서 강한 선형 관계가 유지되었다. 그러나 관측에서는 12월에

그러한 선형 관계가 존재하였으나, 1월과 2월에는 선형 관계가 약하였다. 즉, 엘니뇨 때는 기온 상승의 경향이 있으나, 라니냐 때 기온 하강의 경향은 약하였다. 3월에는 관측에서 약한 선형관계가 형성이 되고, 모든 모형에서 엘니뇨와 라니냐 시기의 기온변화 분리가 아주 강하였다. 더군다나 PNU를 제외하고 모든 엘니뇨때 기온이 상승하고, 모든 라니냐 때 기온이 하강하는 경향을 모형 들에서 보였다. 강수량에 대해서는 관측에서 12월 엘니뇨 시기에 양의 강수 편차 경향, 라니냐 시기에 음의 강수 편차 경향을 보여주지만, 나머지 1월부터 3월에는 엘니뇨 때 약한 양의 강수 편차 경향을 보였다. 라니냐 시기에 1월은 양 혹은 음의 강수 편차의 경향을 분명하게 말할 수 없었고, 2월과 3월은 약하게 음의 강수 편차 경향을 보였다. 그런데 대다수의 모형들에서는 관측과는 반대로 엘니뇨 때 음의 강수 편차 경향을 라니냐 때 양의 강수 편차를 예측하였다. 즉 관측에서는 기온 상승과 강수 증가의 관계가 성립하지만, 모형에서는 반대로 기온상승과 강수 감소의 관계가 성립하고 있다.

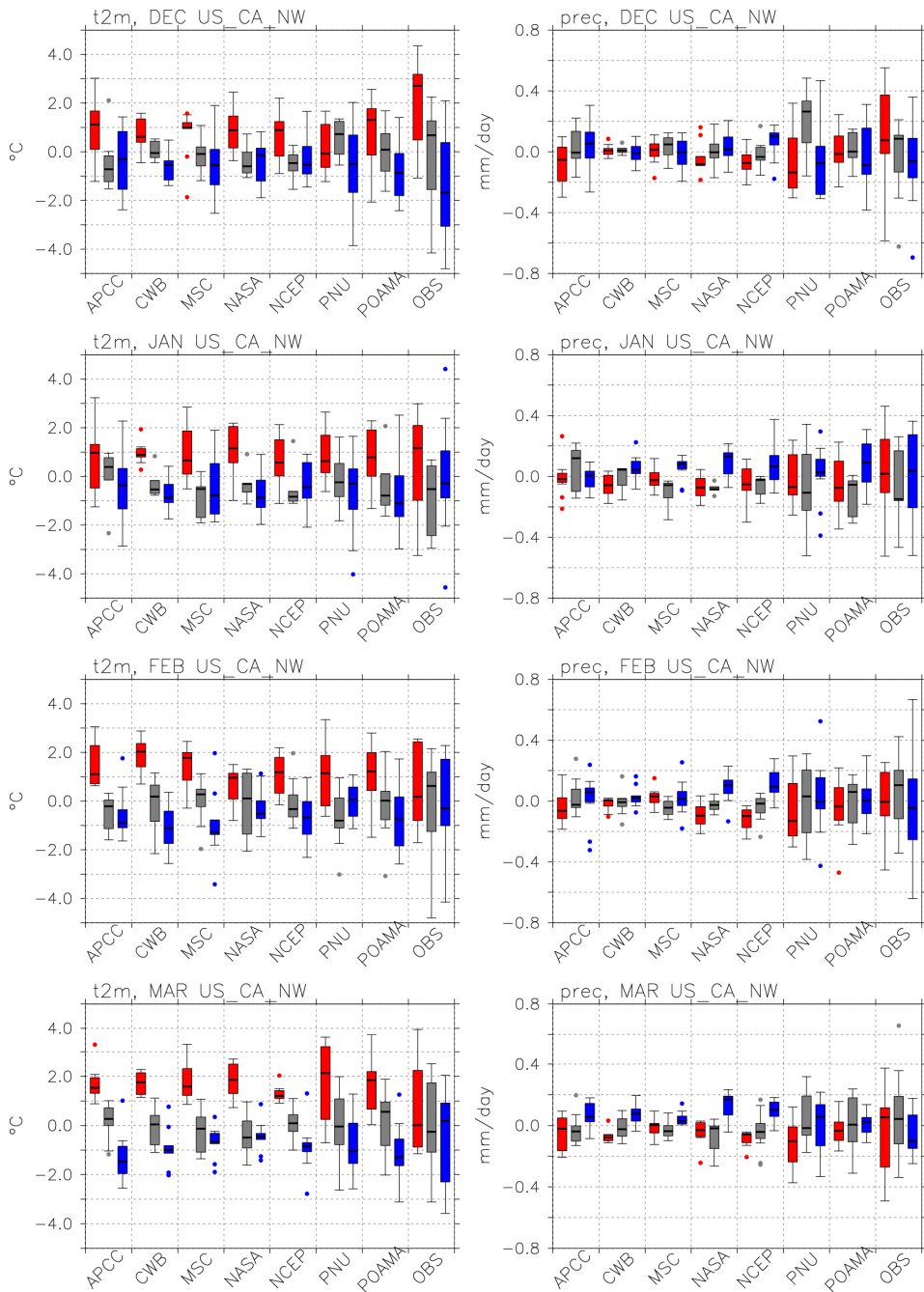


Figure 8. Box-and-whiskers plot for (left panels) air temperatures and (right panels) precipitation area-averaged over the Northwestern America region (135°W-95°W, 45°N-75°N) from 6 individual models and observations in December, January, February and March of the El Niño (red), neutral (gray), and La Niña (blue) events(see section 2.3 for the definition of the El Niño/ La Niña events).

결론적으로 모형에서는 기온 혹은 강수의 ENSO의 두 위상에 대한 반응이 강한 선형 관계를 갖지만, 관측에서는 비선형 관계를 갖는다는 것을 의미한다. 모형에서 선형성의 큰 원인들은 여러가지가 있겠으나 가능한 한가지로서 엘니뇨와 라니냐와 관련된 대기 순환장의 선형성이 모형에서 너무 크다는 것이다. 일반적으로 엘니뇨와 라니냐의 북미 기후의 원격상관 역학은 로스비 파동 형태를 생각할 수 있으며, Z500 편차의 공간 패턴으로서 확인될 수 있다(Horel and Wallace 1982; Alexander et al. 2002). 이전 연구에 의하면 관측에서는 열대 태평양에서 엘니뇨 때 비해서 라니냐 때 상대적으로 대기 대류 활동이 서쪽으로 이동하기 때문에 ENSO 위상과 관련된 중위도 원격상관 패턴에서 비선형성이 존재 한다고 밝힌 바 있다(Hoerling et al. 1997; Lin and Derome 2004). 본 연구에서는 관측과 모형에서 선형성의 평가로서 단순히 엘니뇨와 라니냐 기간동안 Z500 편차의 합성장들의 PCC를 계산하였다. 여기서 라니냐 관련 Z500 편차 합성장에 (-1)을 곱하였다. 관측은 12월 이후 봄으로 가면서 엘니뇨와 라니냐 관련된 Z500 패턴의 PCC가 상당히 감소함을 보여준다. 하지만 모형들은 PCC 값의 감소의 폭이 상당히 작다(Figure 9 (a)). 즉 관측에서는 비선형성이 증가하는 대신, 모형에서는 강한 선형성이 ENSO 최성기를 지나 쇠퇴기에도 유지하고 있다는 의미이다.

모형에서 강한 선형성에 추가하여, 최성기 즉 겨울철 엘니뇨와 라니냐 반응이 봄철까지 계속 유지되는 가능성이 있다. Figure 9 (b)와 (c)를 보면 관측에서 12월 북미 근처에서 Z500 편차 반응이 그 이후 유사성이 상당히 감소하는데, 대부분의 모형들에서 그 유사성이 엘니뇨/라니냐 최성기 이후 봄철까지도 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 모형 들에서 중위도 대기 순환장의 ENSO 영향이 너무 강하고, 이 때문에 다른 기후 인자들의 영향이 상쇄되어, 오래 유지되는 것일 수도 있다. 특히 1월 달에 그 유사성이 현저히 관측에서 감소하는데, 1월은 극에서 영향도 중요하다고 알려져 있다(Cohen et al. 2014; Kug et al. 2015). 그러므로 또 한가지 가능한 원인은 모형들에서 해빙 초기화 문제, 극에서의 영향과 관련된 역학 등을 제대로 재현하지 못하기 때문일 수도 있다.

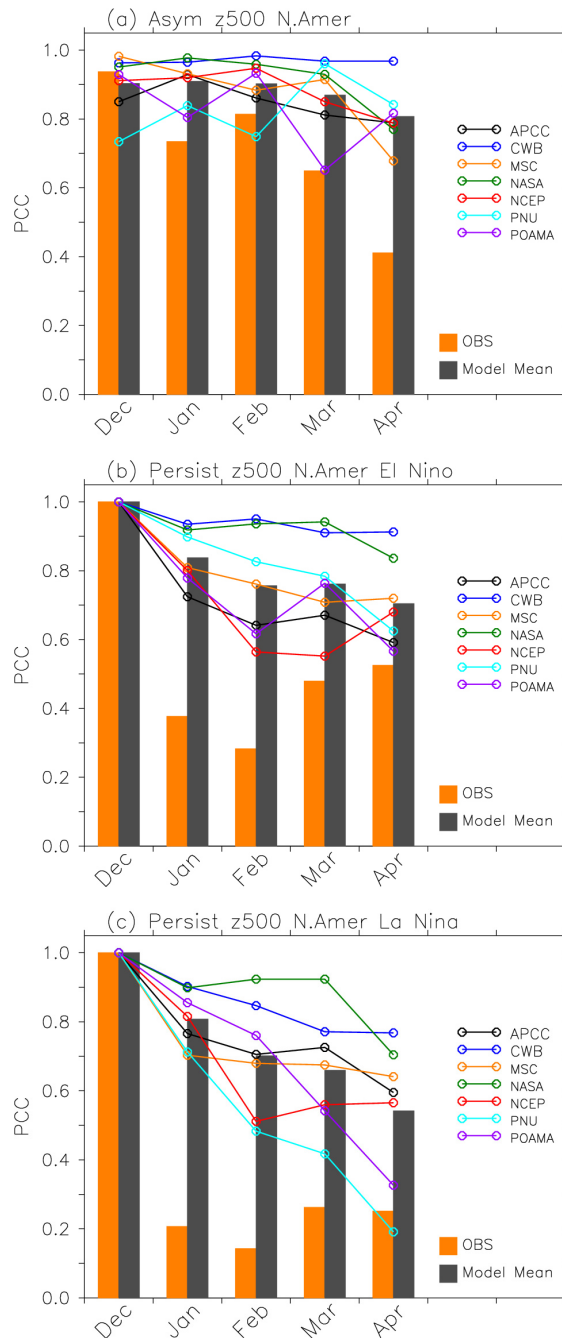


Figure 9. (a) The PCC between the composite of Z500 anomalies for the El Niño and La Niña events occurred in December to April from observations(orange bars) and models(colored lines for individual models and gray bars for model means). The PCC between the Z500 anomaly composite in December and that in the coming January to April for (b) El Niño and (c) La Niña events.

APCC MME 예측 모형들의 기온/강수의 ENSO 반응에 대한 강한 선형 상관성 오류의 원인들을 규명하기 위해서 모형간 다양성의 정도를 정량화하고 관련된 지수들과 모형 내의 다양한 역학적/물리적 변수들과의 관계 분석을 통해서 반응 오류의 원인을 모형의 바이어스와 연결 지을 수 있다. 기온/강수의 반응에 대한 모형간 다양성의 정량화는 주성분 분석으로 가능하다. 반응 오류가 뚜렷한 겨울철 기온 반응에 대하여 주성분 분석을 적용하면, Figure 10 (a)와 (b)에서 보여주는 것처럼 모형들과 관측에서 기온 반응에 대한 첫번째 주요 패턴과, 모형간 다양성 및 오류의 정도를 평가할 수 있는 각 모형들과 관측에 대한 PC(Principal Component) 값을 얻을 수 있다. 주성분 패턴은 12월부터 2월까지 북미의 북쪽에서 양의 상관관계, 남쪽에서 음의 상관관계를 특징으로 한다. 이는 앞서 Figure 4에서 보여주는 모형들의 기온 반응오류의 패턴과 상당히 유사하다. 즉 주성분 패턴은 모형들에서 기온 반응오류들을 보여주고 있으며, 모형들의 PC 값들과 관측에서 PC 값들과의 비교를 통해서 어느 모형이 반응 오류가 상대적으로 더 큰가를 확인할 수 있다. 12월 기온 반응에 대하여 CWB와 PNU를 제외하고 모형들의 PC값은 관측과 가까웠다. 그리고 1월, 2월에는 관측의 PC 값이 점점 더 음의 값이 증가하였고, 모형들은 양의 값을 갖거나, 관측 보다 작은 음의 값을 가졌다. 이는 관측에서 주성분에서 보여지는 남북 방향의 기온 반응의 dipole-like 패턴은 2월달로 갈수록 점점 더 약해짐을 의미하고, 아울러 1월과 2월에 모형들의 기온 반응 오류가 더 커진다는 것을 의미한다. 이러한 기온 반응 오류들을 야기하는 인자들을 살펴보기 위해서, 대기순환장 변화와 밀접한 관련이 있는 해수면 온도(1982-2010 평균장)와 PC와 상관관계를 계산하였다(Figure 10 (c)). 12월에서는 90% 이상 유의한 상관관계수 값(0.6)을 가지는 지역들을 살펴보면, 동적도 태평양과 열대 대서양 해수면 온도와 양의 상관관계, 북극해에서 해수면온도와 음의 상관관계를 보였다. 1월과 2월에서는 열대 지역에서 해수면 온도의 유의한 상관관계는 없어지고, 북극해 지역에서만 12월 보다 더 증가한 상태로 유의한 상관관계를 보였다. 12월의 동적도 태평양에서 양의 상관관계는 모형에서 관측과 상대적으로 warm bias를 의미하며, 특히 CWB가 강하다는 것을 의미한다. 동적도 태평양에서 해수면 온도 bias가 어떻게 12월 기온반응 오류와 관계가 있는지는 좀더 분석이 필요하다. 그리고 북극해에서 해수면 온도와 음의 상관관계는 모형들이 cold bias가 있는 것으로 해석 할 수 있다. 북극해 해수면 온도가 북극해에서 대기-해양 상호작용에 중요한 역할을 한다면(Jun et al.

2014), 이러한 모형의 북극해에서 bias는 중위도 기후에 영향을 미치는 대기 순환장에 영향을 미칠 것이므로, ENSO의 북미 지역의 기후 반응 오류들 즉 강한 선형 상관관계는 모형들의 북극 지역에서 오류들과 연결 지을 수 있겠다. 좀 더 robust한 결론에 이르기 위해서 더 많은 모형 샘플과 다른 해수면 온도 관측 자료들과도 비슷한 분석이 필요하다. 아울러 ENSO 발달 동안 극 지방의 역할이 예측 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

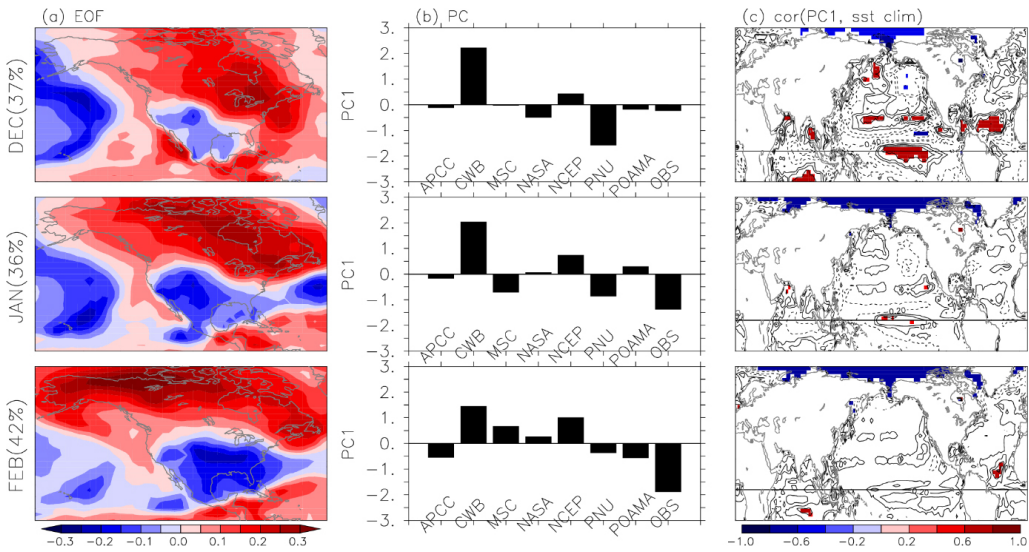


Figure 10. (a) The first EOF mode for the TCC patterns of surface air temperatures with Niño 3.4 index from 7 models and one observation and their associated (b) principal component (PC) for individual models and observations. (c) Spatial patterns of TCCs between PCs and SST climatologies from models and observation. EOF analysis is performed with TCCs of winter season (December to February). In (a) the explained variance with the first EOF is shown and in (c) the TCCs that are significant at the 90% level according to the two-tailed student's t-test are color-shaded.

본 절에서 주요 결과는 엘니뇨/라니냐가 발달하는 시기에 기후 접합 모형 예측성 향상에 대해 기존 연구들이 제시하고 있지만(Peng et al. 2009; Kim et al. 2012; Jia et al. 2015), 예를 들면 북미 지역에서 엘니뇨 혹은 라니냐 때 기온 및 강수의 과도한 반응 오류들이 모형들에서 보이고 있기 때문에 오히려 엘니뇨/라니냐 발달 시 모형 예측성을 떨어뜨릴 수도 있다는 점을 시사한다. 그러므로 엘니뇨/라니냐 발달하는 시기에 기후 모형들의 예측성 영향에 대한 단점 및 장점을 파악해야, 좀 더 효율적인 기후 모형들의 예측 정보 활용이 가능할 것으로 보인다.

b. IOD

IOD는 인도양 주변 국가들의 기온과 강수에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이는 Figure 11과 Figure 12에서도 잘 나타나고 있다. 인도양의 서쪽 주변 국가들은 IOD의 영향으로 인해 상대적으로 고온/다습한 경향을 나타내고 인도양의 동쪽 주변 국가들은 저온/건조한 경향을 나타낸다. 다만 열대 태평양에서의 IOD의 영향이 Figure 4와 Figure 6에서 보인 ENSO에 의한 기온과 강수의 반응 패턴과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. IOD와 ENSO의 상호작용이 아직 명확하게 규명되지는 않았지만, 이 두 모드의 접합이 전구에 미치는 영향은 계절예보에 있어 매우 중요하다. IOD와 ENSO의 상호작용은 다음 단락들에서 더욱 논의가 될 것이다.

IOD와 같은 해양모드의 경우 Figure 11과 Figure 12의 오른쪽 열과 같이 개별 모형의 모든 앙상블을 고려하면 개별 모형 별 앙상블 평균을 고려할 경우인 Figure 11과 Figure 12의 가운데 열에 비해 중위도 및 대륙의 반응이 사라지는 경향을 보인다. 이러한 결과는 다중모형 단순평균의 경우 앙상블의 개수가 상대적으로 적은 모형이라도 각 모형의 예측 성능이 반영될 수 있는 반면, 많은 앙상블을 생산하는 모형의 이점은 확률 예측 방법을 통해 반영될 수 있음을 시사한다.

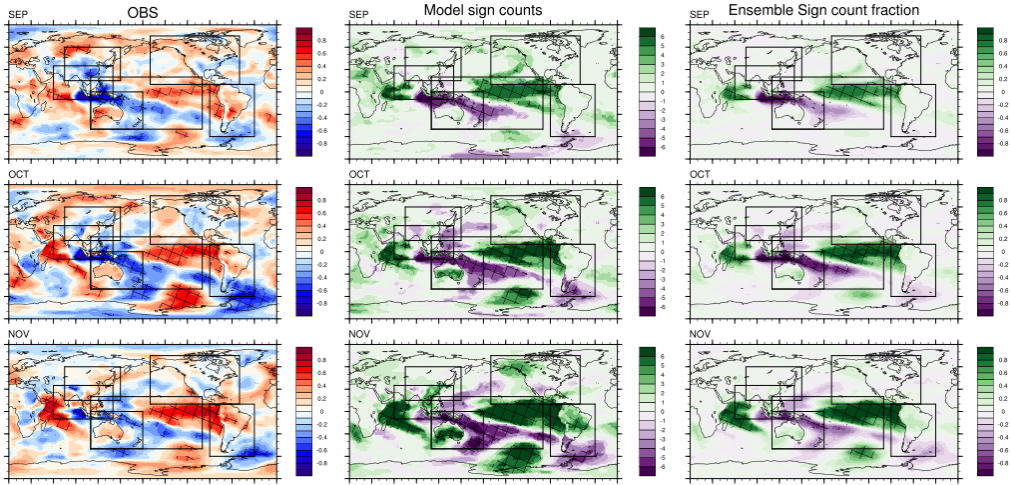


Figure 11. Same as Figure 4 but for DMI.

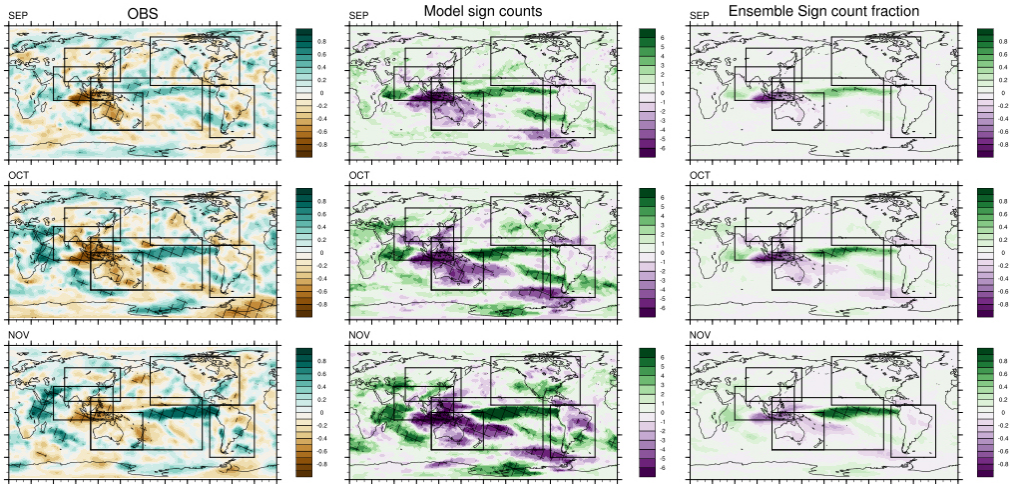


Figure 12. Same as Figure 6 but for DMI.

호주의 경우 IOD는 계절예측에 있어서 주요한 인자 중 하나이다. Figure 13 (a)는 관측을 포함한 7개의 모형에서 10월의 IOD에 대한 기온의 상관계수맵에 EOF 분석을 적용하여 도출된 첫 번째 모드로서 전체 변동성의 52.8%를 차지한다. Figure 11의 10월의 경우 관측에서 통계적으로 유의미한 관련성이 호주 북부 해양에서만 나타나는 것에

비해 IOD에 대한 호주 내륙지역에서 기온의 반응은 통계적으로 유의미하지 않으나 모형에서는 이 두지역 모두에서 과반수 이상의 모형에서 유의미한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향이 Figure 13 (a)에서 호주 북부 해양과 호주 남쪽 지역에서 서로 다른 부호를 가지며 IOD에 대한 기온의 반응을 두드러지게 보임으로써 나타나고 있다. Figure 13 (b)를 통해 이러한 반응의 강도를 모형간 얼마나 다양하게 혹은 일관되게 재현하는가를 알아볼 수 있는데, 10월의 경우 PNU가 관측을 비롯한 나머지 6개의 모형과 다른 반응 양상을 두드러지게 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 CWB와 NCEP에서 관측에 비해 상대적으로 반응의 강도가 크게 모의되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Figure 14의 관측과 모형에서 DMI와 기온간의 상관관계맵을 통해 보다 직관적으로 확인할 수 있다. Figure 13 (b)의 PC값이 관측에 비해 클수록 EOF 패턴에서 나타나는 dipole 패턴이 호주 지역에서 더욱 통계적으로 유의미한 상관관계를 갖는 것으로 나타나는 반면, PNU의 경우 IOD에 대한 기온의 반응이 미미하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 모형간 보이는 다양성은 월별로 상이하며(not shown) 이에 대한 심도 깊은 연구가 추후 수행되어야 할 것으로 보인다.

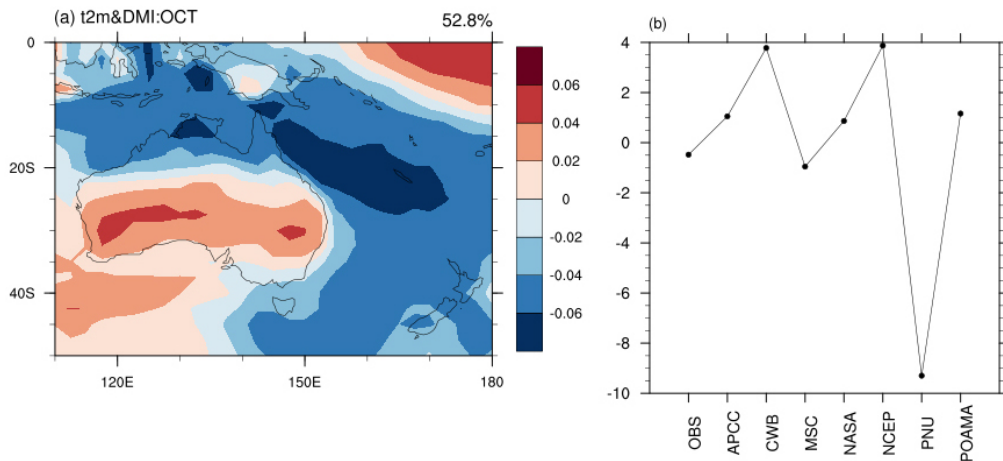


Figure 13. The 1st EOF mode of (a) t2m response of IOD in Australia and (b) its corresponding principal component of individual models including observation.

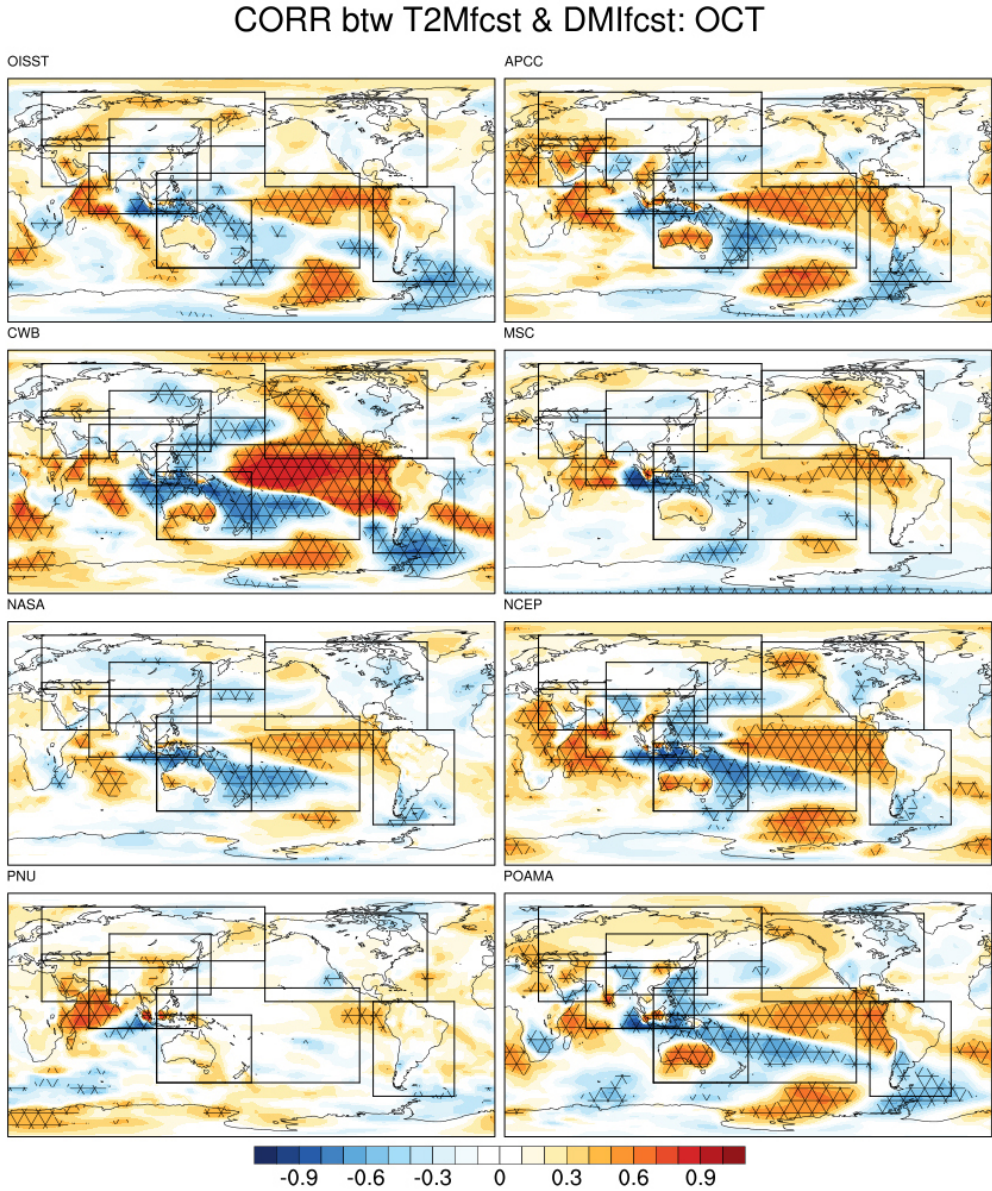


Figure 14 . Spatial patterns of correlation coefficients of T2M with DMI from observation and 7 models.

DMI를 통해서 IOD의 상태를 간단하게 가늠해볼 수 있지만, 인도양 해수면 온도의 EOF 분석을 통해서도 IOD 모드를 추출해낼 수 있다. 인도양 해수면 온도의 EOF 첫 번째 모드는 IOB 모드를 잡아 내고, 두 번째 모드의 경우 IOD 모드를 탐지해 낸다.

본 연구에서는 이러한 관측에서 나타난 인도양 해수면 온도의 변동성이 개별 모형의 예측장에서도 재현이 되는지를 평가하였다(Figure 15). 그 결과 7개의 모형 모두에서 첫 번째, 두 번째 모드로 각각 IOB 모드와 IOD 모드를 잡아내고 있으나, 모형에 따라 각 모드가 설명하는 변동성의 크기가 다름을 확인할 수 있다. 관측의 경우, 첫째, 둘째 모드가 차지하는 총 변동성은 39.3%이지만, 모형의 경우 이 두 모드에 의해 설명되는 총 변동성의 합이 거의 50%에 육박하거나 이를 초과하는 경우가 대부분이다. 이러한 경향은 Figure 16에서 볼 수 있듯이 태평양에서도 두드러진다. 태평양 해수면 온도 EOF의 첫 번째 모드는 ENSO 모드로서(not shown) 관측의 경우 태평양 해수면 전체 변동성의 약 50%를 설명하고 있다. 그러나 모든 모형에서 태평양 해수면 온도의 EOF 첫 번째 모드는 관측보다 더 큰 변동성을 차지하는 것으로 나타나고 있다. 특히 APCC MME 참여 모형 중 유일한 대기 모형인 CWB의 경우 태평양 해수면 온도의 첫 번째 모드의 변동성은 전체의 85%이상을 차지하는 것으로 나타난다.

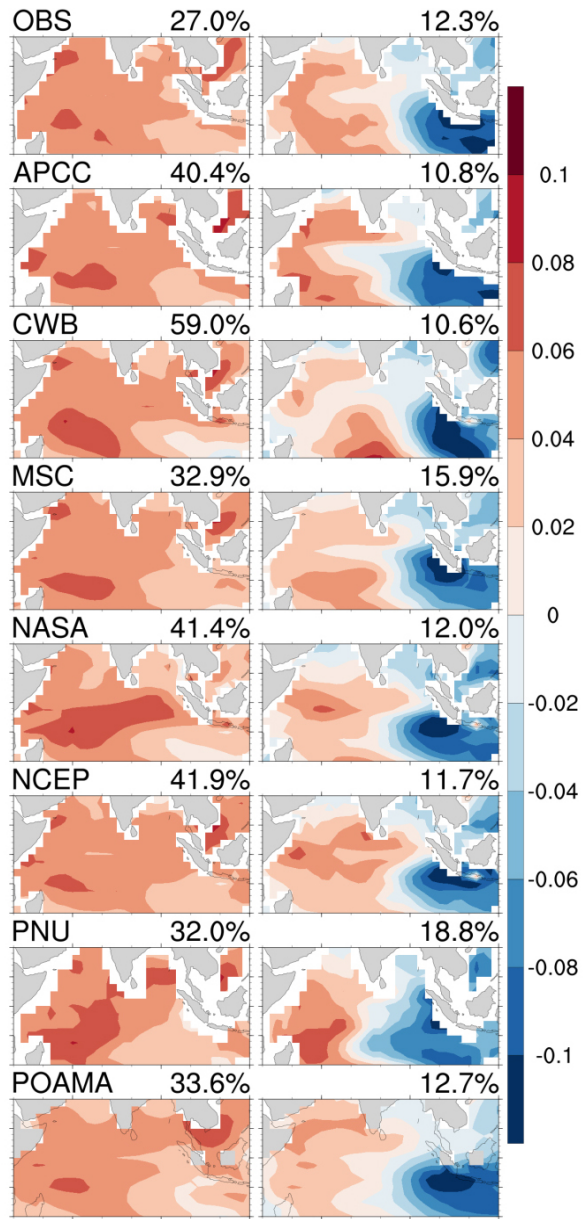


Figure 15. First (left column) and second (right column) modes of monthly detrended SST anomalies over tropical Indian Ocean. Percentage variance explained by each mode is give at right top corner.

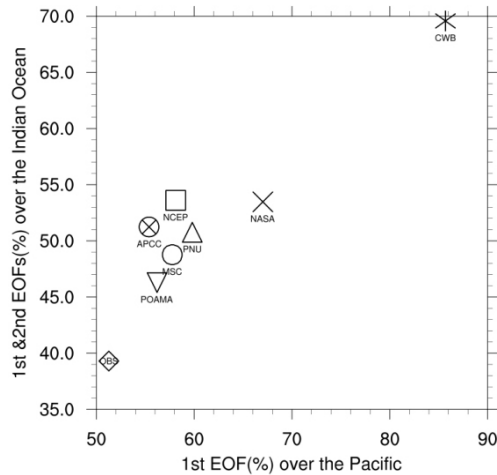


Figure 16. Scatter plot of percent variance explained by 1st EOF mode over the tropical Pacific (20°S–20°N, 120°E–90°W) versus percent variance explained by 1st and 2nd EOF modes over the tropical Indian Ocean.

인도양의 SST 변동성의 경우 ENSO에 의해 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Klein et al. 1999; Xie et al. 2009; Saji et al. 2006). 특히, IOB의 경우 ENSO의 영향을 받아 ENSO 최성기 후 4-6개월 후에 최성기에 이르는 것으로 알려져 있다(Klein et al. 1999). Figure 17 (a)에서 관측 및 개별모형에서 나타나는 IOB와 ENSO와의 관계를 확인할 수 있다. 관측의 경우 ENSO와 IOB 사이에 약 4개월의 지연상관관계가 존재하고 있으며 이러한 경향을 대부분의 모형에서도 잘 모의하고 있으나 CWB의 경우 이른 지연상관관계를, PNU의 경우 늦은 지연상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

IOD 경우, ENSO와의 관련성은 여전히 명확하게 규명되고 있지 않지만(Webster et al. 1999; Allan et al. 2001), 양의 IOD는 El Niño해에 발생하는 경향이 있다. Figure 17 (b)와 같이 IOD는 ENSO 보다 약 2개월 선행하는 경향을 보이며, 이러한 특징은 대부분의 모형에서도 찾아볼 수 있다. 그러나 CWB나 NCEP의 경우 관측과 다른 IOD-ENSO 지연 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

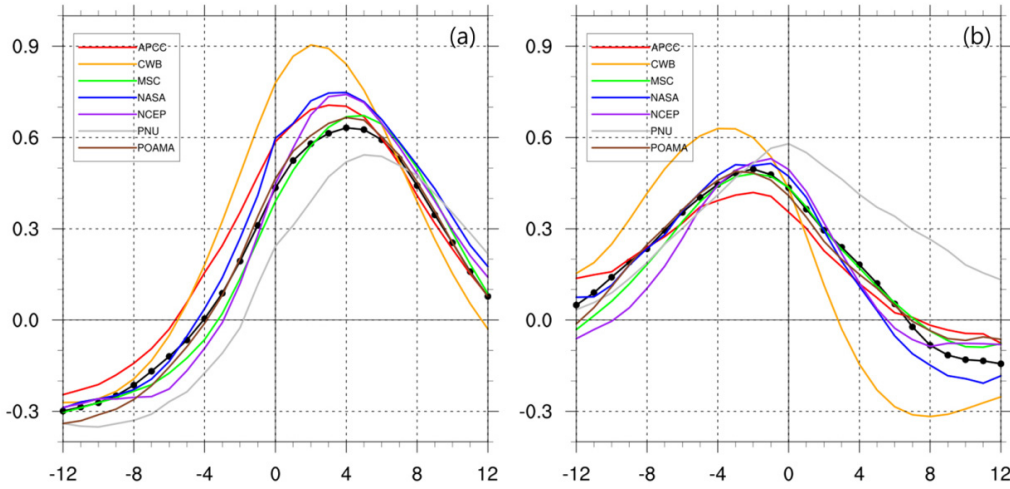


Figure 17. Lead-lag correlation of monthly PC time series of EOF1 of tropical Pacific SST anomalies and PC time series of (a) EOF1, and (b) EOF2 of tropical Indian Ocean SST anomalies.

Figure 18 좌측 최상단의 관측 패턴에서 볼 수 있듯이, IOD의 발달은 기후학적으로 6월부터 시작되는 Java 해 연안에서 깊은 해양의 찬 해수를 해수면으로 가져오는 용승류의 발달과 함께 시작되며, 이 때 인도네시아 해안을 따라 부는 남동풍은 인근 해안의 수온 약층의 깊이를 얇게 하여 IOD 발달에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Li et al. 2003; Iizuka et al. 2000). 이러한 남동풍을 인도양 남동쪽의 해수면의 증발을 촉진시켜 동인도양 해수면을 더욱 차갑게 만든다. 개별 모형에서도 IOD 발달 초기의 관측의 공간 패턴이 비교적 잘 나타나고 있으나, 상세한 패턴에는 모형 별로 차이가 존재한다(Figure 18). 또한 JJA에 이미 인도양 SST의 동서방향 편차가 관측에서 두드러지기 시작하는데 반하여, NASA와 CWB의 경우 이러한 동서방향 SST 편차가 잘 발달하지 않는다.

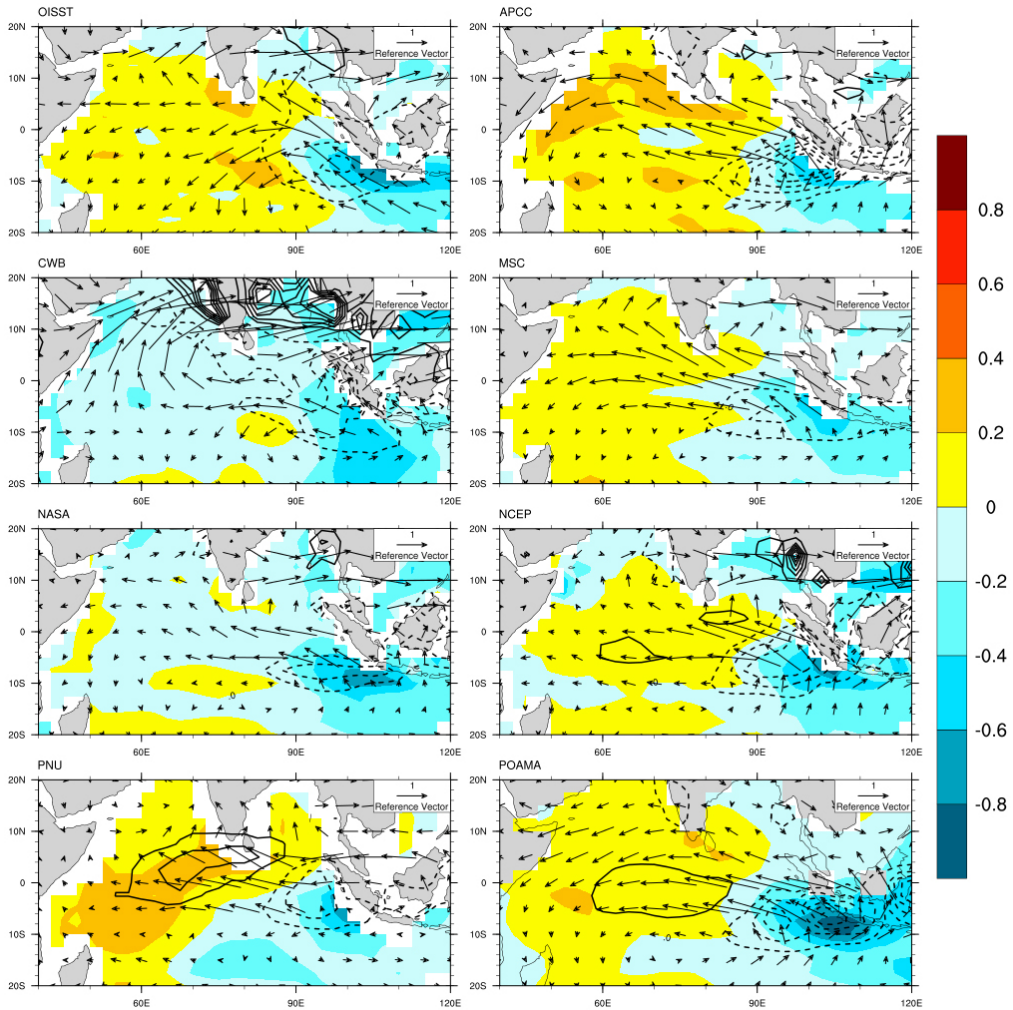


Figure 18. Regressed JJA 850 hPa wind (vectors, m/sec), SST (shaded, °C), precipitation (contour, mm/day) onto SON DMI.

Figure 4와 Figure 11, Figure 6와 Figure 12를 통해 ENSO에 의한 기온과 강수의 원격상관 패턴과 IOD에 의한 기온과 강수의 원격상관 패턴이 상당히 유사한 것을 알 수 있다. Saji and Yamagata(2003)는 ENSO 영향을 제외한 IOD의 지역적인 반응이 그렇지 않은 경우와 현격히 다른 점을 보인 바 있다. 특히 동아시아 여름철(6-9월) 기온의 경우, ENSO와 독립적인 IOD의 해의 기온 합성도의 경우 양의 편차가 우세한 반면, IOD와 독립적인 ENSO 해의 기온 합성도와 반대 패턴인 음의 편차가 우세한 경향을 보이는

것으로 나타났다. 그러므로 ENSO와 IOD 영향을 동시에 고려할 경우 각각의 모드의 반응이 상쇄됨에 따라 상대적으로 작은 기온반응을 나타냄을 보였다. 따라서 본 과제에서도 ENSO반응을 제거한 IOD의 원격상관을 알아보기 위하여 편 상관관계(partial correlation)를 구하였다. 편 상관관계는 특정 두 변수 사이의 상관관계를 평가할 때, 제 3의 변수의 효과를 제거하고자 하는데 사용되며, 편 상관관계는 아래의 식과 같이 구해진다.

$$pr_1 = \frac{r_{y1} - r_{y2}r_{12}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{y2}^2)}}$$

r_{y1} 은 종속변수와 x_1 사이의 상관계수를, r_{y2} 는 종속변수와 x_2 사이의 상관계수를, r_{12} 는 x_1 과 x_2 사이의 상관계수를 각각 나타낸다. 만약 편 상관관계 (pr_1)의 결과가 r_{y1} 보다 작게 나타나면, Y는 대부분 x_2 의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 각 모형에서 ENSO 영향(r_{y2})을 제외한 IOD의 강수와 기온에 대한 영향을 알아보기 위해 편 상관관계 계수를 계산하여 비교하였다. 먼저 관측의 상관계수와 편 상관계수를 6개의 권역에 대해 영역 평균하여 비교한 결과, Table 2에서와 같이 동아시아 영역에서 그 차이가 가장 두드러지게 나타났다. 특히 기온의 경우 ENSO의 영향을 제외한 IOD와의 관계를 구하였을 때 ENSO 효과를 제외하지 않은 때보다 상관 계수 값이 증가하는 경우가 6달, 상관계수의 부호가 뒤바뀌는 경우가 3달로 나타났다.

Table 2. The number of months with increased magnitude and reversed sign comparing partial correlation of observed DMI and atmospheric variables (T2m, precipitation) removing ENSO effect to correlation of DMI and atmospheric variable over each region.

		East Asia	South Asia	North America	South America	Australia	Australia + South Pacific
T2M	Increased magnitude	6	4	2	0	4	4
	Sign change	3	2	3	4	2	5
PRCP	Increased magnitude	4	3	5	5	2	4
	Sign change	2	2	2	2	1	2

Figure 19는 관측과 개별 모형에서 나타나는 동아시아 기온과 IOD의 상관관계의 월별 변화를 보인 것이다. 관측의 경우, ENSO 영향을 제거한 편 상관계수 결과에 따르면 동아시아 기온은 1, 4, 5월을 제외하고 모두 IOD와 양의 상관관계를 보인다. 관측에서 보인 특징을 일관되게 잘 모의하는 모형은 없는 것으로 판단된다. 단, 2월과 3월에 관측에서 양의 편 상관계수가 증가하는 경향을, 2월의 경우는 7개 중 4개의 모형이, 3월의 경우는 7개 중 6개의 모형이 보였다. 전반적으로 모형에서는 관측에 비하여 ENSO 영향을 제거하였을 때 IOD의 반응이 커지는 경향이 잘 나타나지 않는 것으로 판단된다.

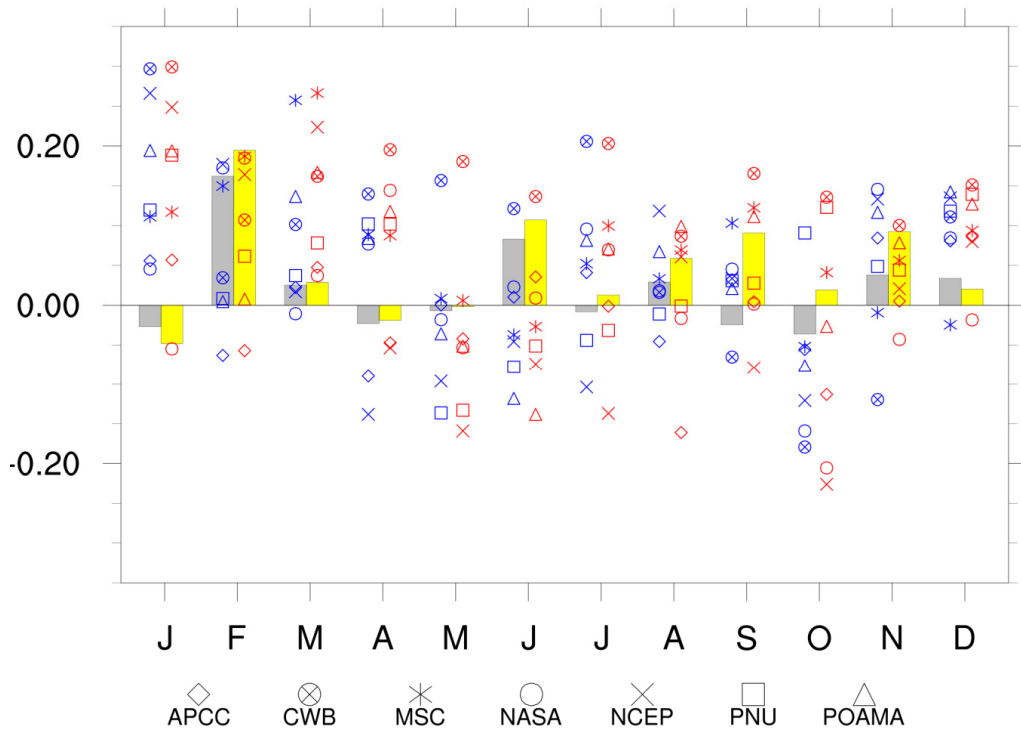


Figure 19. Correlation of DMI and T2m averaged over EA (grey bar: observed, blue markers: models) and EA-averaged partial correlation of DMI and T2m removing ENSO (yellow bar: observed, red markers: model).

c. NAO

NAO 최성기인 북반구 겨울철(12월-2월) 하층 기온의 지역 반응은 북미 대륙을 거쳐 유럽/아프리카를 아우르는 북대서양 주변지역에서 매우 강하게 나타난다(Figure 20, 1열). 12월에 북대서양에서 남북방향으로 한랭-온난-한랭 편차의 트라이폴 구조가, 지중해와 유럽에서 한랭-온난 편차의 쌍극자 구조가 뚜렷하다. 또한, 러시아 북부에서 캅카스를 거쳐 북서 아메리카 앞바다에 이르는 지역에서는 웨이브 패턴의 기온 반응이 나타난다. 1월의 경우, 미국 남동부의 온난 패턴이 확장하면서 북대서양의 트라이폴 구조가 어그러지고, 고위도 태평양에서는 웨이브 구조 대신 알래스카에서부터 북캘리포니아 태평양 연안까지 한랭 패턴이 나타난다. 이는 NAO가 북미지역 극한 기온 현상에 미치는 영향에 대한 연구들과 일부 연관지어 해석할 수 있겠다(Cellitti et al. 2006; Walsh et al. 2001). 유럽/아프리카 지역에서의 쌍극자 패턴은 특히 아프리카 대륙에서 매우 뚜렷해졌다. 2월은 1월과 그 양상이 유사하지만, 유럽/아프리카 지역의 패턴이 아시아 대륙과 인도양쪽으로 광범위하게 확장하고 북아메리카 북서해안의 한랭 패턴이 사라진다. 3월에는 아시아지역으로 확장된 패턴이 한반도를 포함한 북서태평양에까지 미치는 것을 확인할 수 있다. 캘리포니아에서는 매우 강한 온난 패턴이 나타나고 이는 4월까지 강화되는 모습이다. 유럽/아프리카부터 아시아에 걸쳐 나타난 기온 반응은 4월에는 거의 사라지고 대신 남인도양, 남태평양 그리고 남대서양 일부에서 유의미한 기온 반응이 나타난다.

앞서 언급한 NAO의 기온 반응은 개별 모형들에서 어느정도 일관되게 나타난다(Figure 20, 2열). 특히 북미 지역과 유럽/아프리카를 거친 아시아 지역 패턴은 매우 일관된다. 하지만 인도양과 대서양의 반응은 매우 과장되어 있고, 특히 태평양에서는 관측에 존재하지 않는 라니냐 타입의 기온 반응이 매우 뚜렷하고 지속적으로 나타난다. 기후 모형 내에서, 중위도 예측은 ENSO에 대한 반응으로 거의 설명되고 NAO역시 ENSO와 관련성이 크기 때문으로 해석된다. 기온 반응의 오차가 큰 지역에서는 모형들이 일관된 결과를 보인다고 해서 이를 신뢰할 수 없고, 따라서 모형에 대해서 동일 가중치를 주어 평균하는 SCM 다중 모형 합성 결과를 활용할 시에는 적절한 오차 보정이 반드시 필요하다고 판단된다.

7개 모형의 모든 앙상블들을 독립된 모형이라 가정하고 그들간의 일관성을 살펴본 결과, NAO의 기온 반응은 북반구 지역에만 나타나는 것을 확인할 수 있다(Figure 20, 3 열). 북아메리카 동부와 유럽/아프리카 지역에서 매우 일관된 패턴을 보이지만 열대 대서양과 인도양에서의 유의미한 패턴은 사라졌다. 즉 해양 지역에서의 기온 반응은 개별 앙상블들이 매우 다른 모습을 보이고 일관성이 낮다. 하지만 동아시아까지 확장했다가 4월에 사라지는 기온 반응은 앙상블간에 매우 일관되게 나타나고 이는 관측과도 일관된다. Figure 20의 2-3열 결과를 비교해 보면, 모든 모형에 같은 가중치를 준 경우에 비해서 앙상블 개수가 많은 모형에 높은 가중치를 줄 경우에 해양에서의 오차를 줄일 수 있다고 판단된다. 따라서, 센터에서 생산하는 확률 다중 모형 합성 예보(PMME)는 이러한 오차가 어느 정도 보정된 결과이며 대기 모드 반응성 연구에 적절하다고 판단된다. 하지만 이 방법에서도 일부 유의미한 해양에서의 기온 반응이 모두 사라져 버리기 때문에, 해석에 주의가 필요하다.

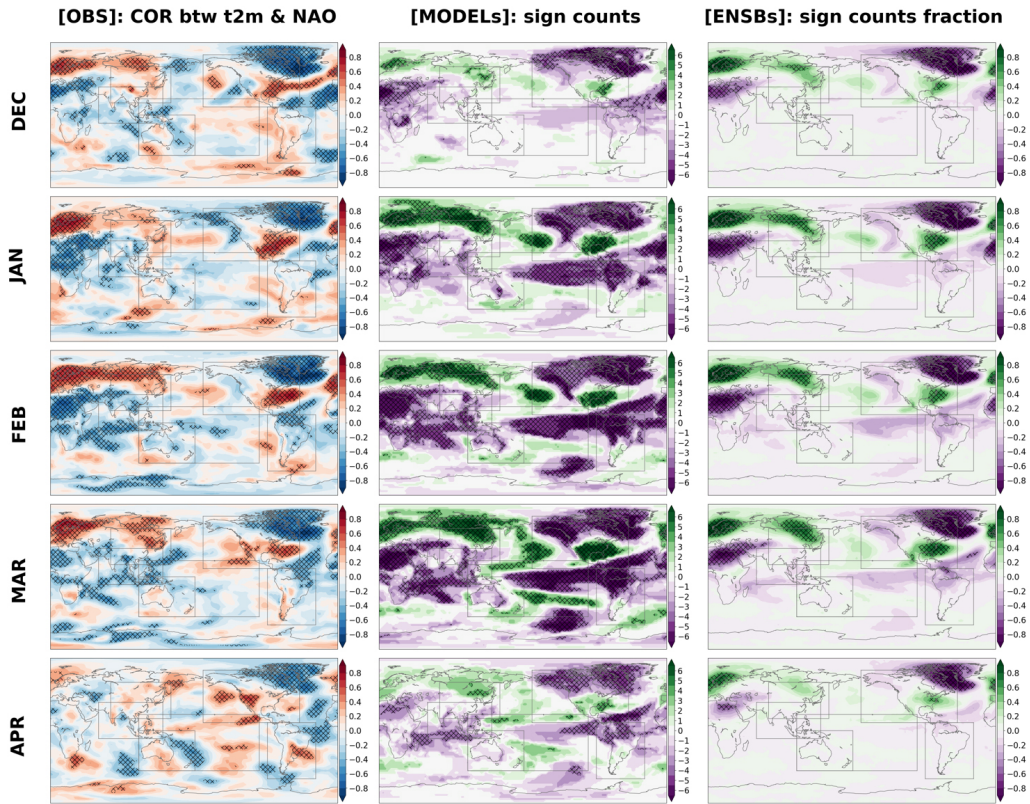


Figure 20. Spatial patterns of (left panels) correlation coefficients of T2M with NAO index from observations, and (middle panels) model consensus and (right panels) grand-ensemble member consensus in terms of the correlation coefficients. In the middle panels, shades indicate the number of models that the correlation coefficient at each grid point is significant at 95% confidence level according to the two-tailed student's t-test. In the right panels, shades indicate the percentage of all the ensemble members.

NAO에 대한 유의미한 강수 반응은 기온 반응과 유사한 지역에서 나타나지만 강도가 다소 약하고 국소적으로 나타난다(Figure 21). 12월에 북동대서양에서 남북방향 쌍극자 형태의 패턴이 나타나고, 이는 유럽/지중해 지역으로 확장해 3월까지 유지되다가 사라지고, 대신 4월에는 중동과 러시아 북부에서 반대 극성의 쌍극자 패턴 반응이 나타난다. 12월에 고위도 태평양 지역에서 웨이브 패턴이 기온 반응과 일관되게 나타나는데, 이 지역에서 상승 운동에 의한 강수현상과 그로 인한 잠열방출의 과정이 NAO와 관련되어 나타나는 것으로 판단된다. 북아메리카 대륙에서 강수 반응은 매우 유동적이고 전 기간에서 유지되는 반응은 나타나지 않지만, 2월의 캐나다 북동부 건조반응은 다소 유의하다.

대서양과 유럽을 아우르는 강수 쌍극자 반응은 기후 모형에서 일관되게 나타난다 (Figure 21, 2열). 하지만 북미대륙에서 관측과 다르게 유의미한 패턴이 나타나고 이는 기온 반응 패턴(Figure 20)과 유사하다. 이는 모형에서의 강수는 기온과 직접적인 역학관계를 가지기 때문으로 판단된다. 또한, 열대 태평양과 대서양에서 매우 강하게 라니냐 타입의 강수 반응이 나타나는데 이 역시 관측과 다르다. 따라서 기후 모형은 전반적으로 NAO 반응과 ENSO 반응을 구분하지 못하는 것으로 판단된다. 일반적으로 앙상블 개수가 적을수록 전반적인 성능이 낮고, 따라서 이러한 모형을 앙상블 개수가 많은 모형과 동일한 가중치로 합성하면 기후모드 반응성의 오차가 열대 해양에서 클 수 밖에 없다. 이와 대조적으로 전체 앙상블을 독립적이라고 가정한 분석에서는 해양에서의 유의미한 강수 반응이 전혀 나타나지 않는다(Figure 21, 3열). 앙상블 개수가 많은 모형에 많은 가중치를 부여하는 것이 기후 모드 반응을 해석하는 관점에서는 효과적이라고 판단된다. 하지만 그린란드 지역에서 관측과 다른 건조 반응이 나타나고 4월 중동/러시아 북부의 반응성 모의에 실패하는 등 이 방법 역시 불완전함으로 주의가 필요하다.

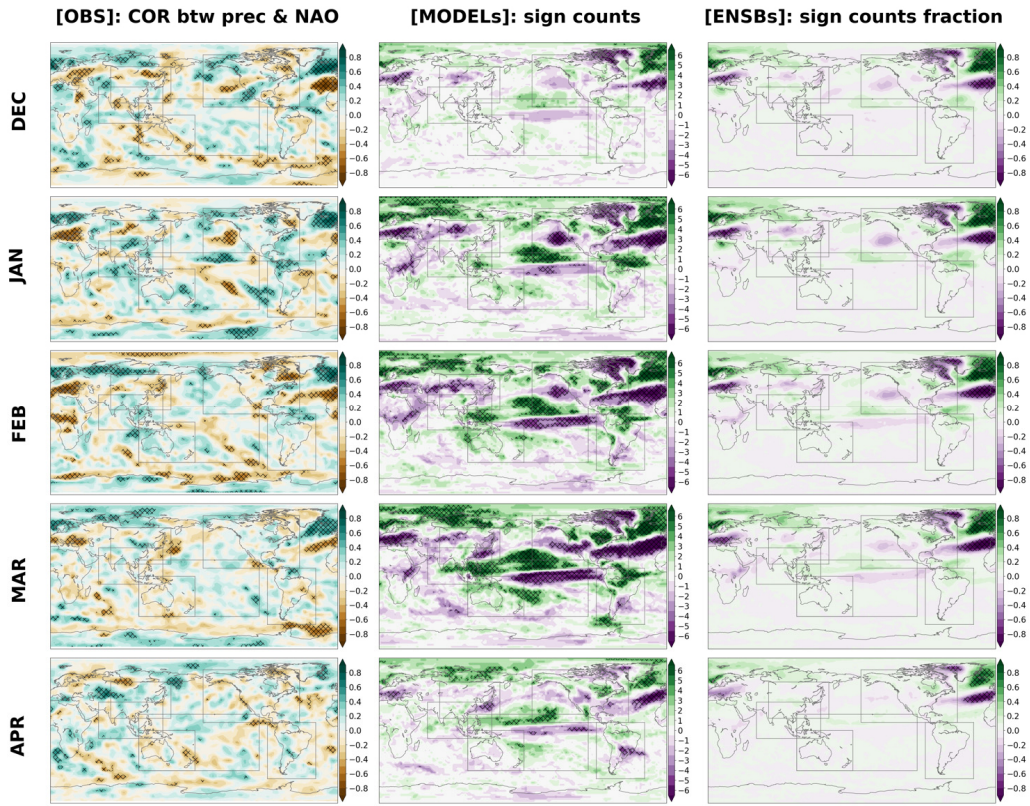


Figure 21. Same as Figure 20 except for precipitation anomalies.

앞선 상관관계맵 분석에서, 모형에서 기후 모드 반응은 관측에 비해 다소 지연되어 나타나는 경향을 보인다. 아프리카 기온 반응은 관측에서는 3월에 다소 약화되는데 모형에서는 여전히 일관성이 뚜렷하고 4월까지도 유지되는 모습이다(Figure 20). 미국 남동부 온난 패턴의 경우, 관측에서는 2월에 최대 강도를 보인 후 약화되는데 비해 모형의 일관성은 3월까지 강화되고 그 이후에 약화되는 모습을 보인다. 강수에서도 모형내 반응성 지연이 뚜렷한데, 유럽/지중해 지역의 반응이 모형에서 3월까지 일관성이 강하고 대서양 쌍극자 패턴은 4월까지도 유지되는 양상이다(Figure 21). 계절 예측 모형에서 나타나는 NAO 반응의 봄철 지연을 좀 더 정량적으로 파악하고 이를 설명하는 모형 내 역학을 제시하고자 한다.

NAO에 대한 기온 및 강수 반응이 얼마나 실제 세상과 유사하게 모의되는지 정량적으로 확인하기 위해 상관관계맵 간의 PCC 분석을 수행하였다(Figure 22). 동시점의 PCC

값과 1개월 전의 관측 반응성과의 PCC 값을 비교함으로써 NAO 반응 유지/지연 여부를 확인할 수 있다. 대부분의 월에서 동시점의 PCC가 1개월 앞선 관측과의 PCC보다 낮아 해당 시기의 반응을 적절하게 모의하는 것으로 보인다. 하지만, 3-4월의 경우 기온/강수 모두에서 1개월 앞선 시기 관측과의 PCC가 동시점의 PCC보다 크고, 그 차이가 관측에서의 평균적인 상관관계의 크기를 넘어설 만큼 유의미하다. 3-4월 외에도 지연된 관련성을 보이는 경우가 있으나 그 크기가 무시할 만한 수준으로 판단된다.

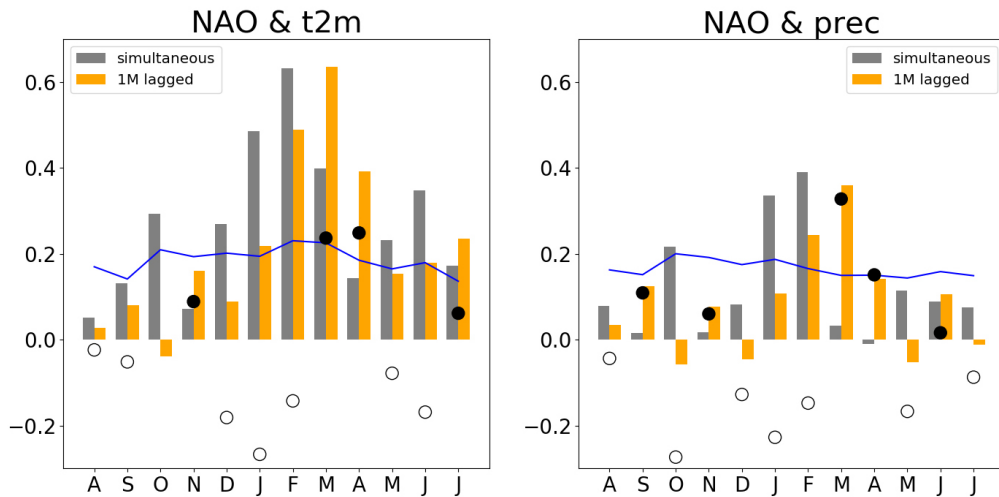


Figure 22. PCC of NAO regional response patterns (temporal correlation coefficients shown in Figure 20 and Figure 21) between NCEP-DOE and 7 models average for (a) T2M and (b) PREC. PCC is first calculated over individual 6 regional domains for each of models then they are averaged over all domains and all models. Dimgray and orange bars display simultaneous and 1-month model pattern lagging relationships, respectively. Circle indicates the difference between two bars thus closed circles denote the months where 1-month lagging value is larger than simultaneous ones while open circles denote the months where the opposite is the case. Blue lines indicate the mean amplitude of temporal correlation coefficients over domains.

ENSO-NAO의 관련성을 살펴보면, 봄철에 관측에서 뚜렷한 관련성을 찾기 어렵지만, 모형에서는 두 기후모드 사이의 관련성이 매우 높게 나타난다(Figure 23 (a)). ENSO와 의(음의) 관련성이 클수록 지연상관이 크게 나타나는 산포도를 통해서 3-4월의 NAO 반응 지연이 과도한 ENSO와의 관련성에 연관된 것으로 추측할 수 있다(Figure 23 (b)). NAO 지연반응이나 ENSO 관련성 과대 모의 정도는 모형마다 다른데, ENSO 관련성 과

대 모형은 POAMA에서 가장 크고, NAO 지연반응은 POAMA(강수)와 PNU(기온)에서 가장 큰 것으로 나타났다(Figure 23 (c)). 하지만 7개 모형 산포도에서는 ENSO 관련성 과대 모형과 NAO 지연반응 정도 사이의 유의미한 관련성을 찾을 수 없다.

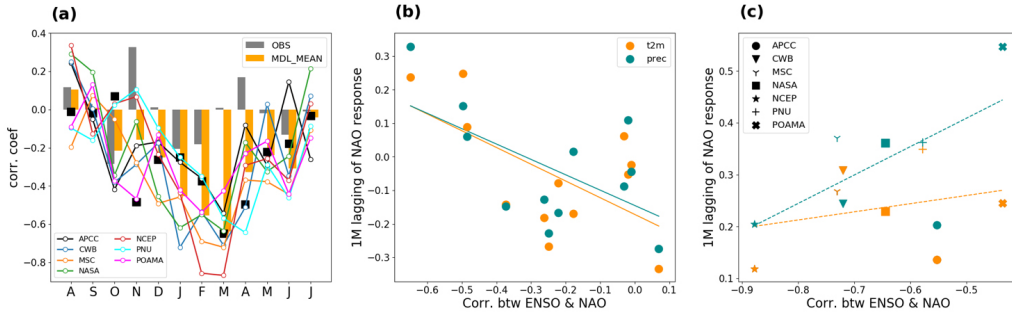


Figure 23. (a) Correlation coefficient between Niño3.4 and NAO indices for 12 months. Dimgray bars, color lines with white circles, orange and orange bars are for NCEP-DOE, 7 individual models and their average, respectively. Square indicates the difference between NCEP-DOE (dimgray bar) and 7 models average (orange bar). (b) Models average based scatter of ENSO-NAO correlation difference (squares in (a)) and ACC difference (circles in Figure 22) for 12 months and (c) the scatter for individual models during March.

NAO의 봄철 반응 지연에 대한 원인으로 ENSO 자체 활동성의 최성기 지연 모의를 의심해 볼 수 있었다. CWB(해양 접합이 없는 대기 모형)와 NCEP을 제외한 대부분의 모형은 Niño3.4의 활동성의 계절 흐름(즉 가을철 ENSO 발달, 겨울철 최성기, 봄철 쇠퇴기)을 관측과 매우 유사하게 모의하고 있어(Figure 24 (a)), ENSO 최성기 지연은 없는 것으로 확인된다. 하지만, NAO는 POAMA를 제외한 대부분의 모형이 그 최성기를 3월로 지연 모의하고 있다(Figure 24 (b)). 즉, NAO 최대 변동성 시기가 3월로 지연되어 나타나는 것은 ENSO 활동성 자체 보다는 ENSO-NAO 관련성이 3월에 과대모의되는 것(Figure 23 (a))과 연관된 것으로 보인다. 그리고 ENSO-NAO 관련성이 과대모의되면서 NAO 최성기가 3월에 나타나고 봄철 NAO 반응이 유지/지연되는 일련의 과정이 모두 연관된 것으로 파악된다. 예측성 대부분이 열대 태평양 변동성으로부터 나오는 기후 모형의 특성을 여실히 드러내는 결과로 보인다. ENSO 시그널이 강한 겨울철 SST를 초기장으로 처방할 경우 초기장이 관성적으로 유지되어 봄철 결과에 반영될 것이라는 합리적 의심이 가능하다. 즉, 강한 ENSO 시그널이 대기 로스비 웨이브 전파 형태로 봄철 북대서양 지역의 SST를 변화시킬 수 있는데(Sutton et al. 2000), 이런 북 대서양의 지연 반응이

모형에서 NAO 최성기 지연과 연관될 수 있다. 즉 NAO는 상대적으로 주변 SST의 영향으로부터 자유로운 대기모드로 알려져 있지만, 모형 세상에서는 지연된 대서양 SST의 영향을 강하게 받아 NAO의 최성기가 지연되어 나타나는 것으로 추측해 볼 수 있다. 하지만 추가적인 모형 분석 없이는 단정할 수 없다.

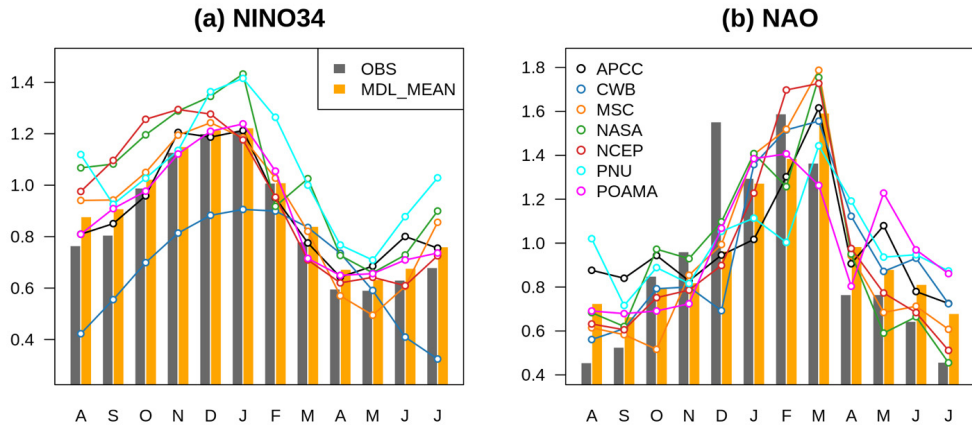


Figure 24. Standard deviation of (a) Nino3.4 and (b) NAO indices of NCEP-DOE (dimgray bars), individual models (color lines with white circles) and modes average (orange bars) for individual 12 months.

앞선 분석에서 살펴본 모형간의 일관성은 다르게 말하면 모형간의 다양성으로 해석할 수도 있고, 다양성에 대한 분석은 모형 개선을 위한 기초적인 근거가 되기에 매우 중요하다. Figure 20에서 대부분의 모형들이 관측의 하층 기온 반응을 적절히 모의하고 있으나, 4월의 경우 NAO의 풍하층 즉 유럽과 아시아 대륙 일부 지역(한반도 북부, 아프리카 북부와 아라비아 반도 등)에서 관측에서 나타나지 않는 기온 반응이 일부 모형에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. NAO 하층 기온 반응에 대한 모형간 다양성을 확인하기 위해, 관측과 7개 모형(총 8개)을 대상으로 유라시아 지역 상관관계맵에 대한 주성분 분석을 수행하였다. 그 결과 유럽과 러시아에 해당하는 북쪽의 양의 아노말리, 아프리카와 아라비아반도 남아시아, 인도양을 포함하는 남쪽의 음의 아노말리로 구성된 쌍극자 패턴이 33.5%의 변동성을 설명하는 주성분으로 나타났다(Figure 25 (a)). 이는 Figure 20의 NAO 하층 기온 반응 패턴 자체와 매우 유사해, 모형에 따라서 기본 패턴이 강화되거나 약화되는 양상을 보이는 것으로 해석할 수 있다.

앞서 봄철 북대서양 지역의 SST가 NAO 활동성에 영향을 끼칠 가능성에 언급한 것처럼, 모형에서 북대서양 SST의 mean bias가 NAO 하층 기온 반응에도 일정 부분 기여할 것으로 기대할 수 있다. 같은 방식으로 주성분 분석을 4월 SST 평균장에 대해 수행한 결과 북서대서양에서 패턴이 40.8%를 설명하는 것으로 나타났다(Figure 25 (b)). 즉, 북서대서양이 전체적으로 따뜻해지거나 전체적으로 차가워지는 형태의 모형간 다양성이 확인된다. 8개 샘플에 대한 두 주성분 크기의 분포(Figure 25 (c))에서 PNU, APCC 두 모형을 제외한 5개 모형이 관측대비 북서대서양 SST warm bias를 가짐을 알 수 있다. 또한 NAO의 하층 기온 반응은 APCC를 제외한 모형들에서 주성분 패턴이 강해지는 형태, 즉 유럽과 러시아에서 매우 큰 양의 반응성이 나타내는 것을 알 수 있다. 산포도에서 뚜렷한 선형 혹은 비선형 관계를 확인할 수는 없지만, (PNU를 제외 시) 모형에서 따뜻한 북서대서양 해수면 평균장이 NAO 풍하층 하층 대기 반응을 강하게 유지시키는 역할을 하는 것으로 추측해 볼 수 있다. 하지만 통계적으로 유의미하고 안정된 결과를 얻기 위해, 향후 다양한 모형을 추가한 깊이 있는 분석이 요구되며 이를 통해 계절 예측 모형 자체 성능 및 활용의 개선이 기대된다.

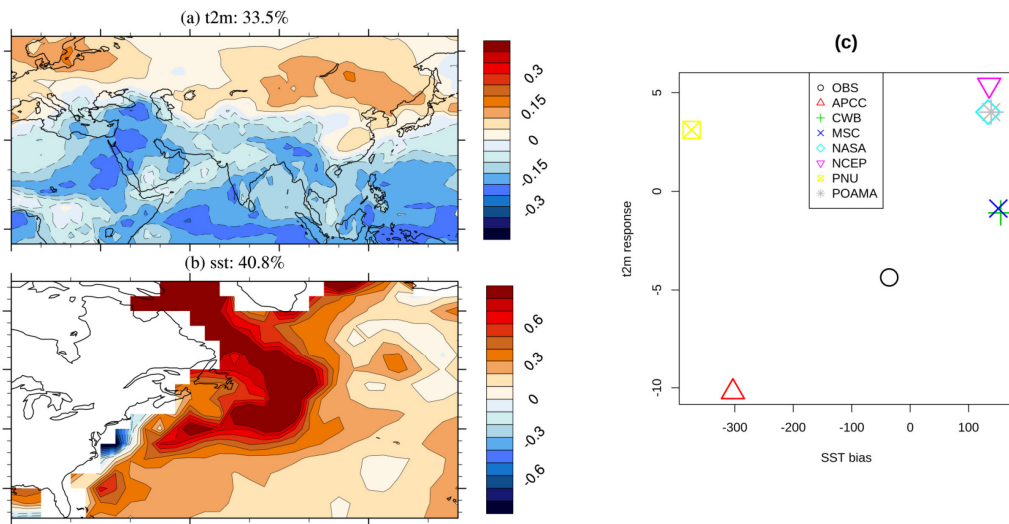


Figure 25. Leading mode of (a) t2m response of NAO over Europe and Asia continent and (b) mean SST over North Atlantic when conventional EOF analysis is applied to the patterns of observation and 7 models for April. Scatter plot of magnitude of two patterns are displayed in (c).

d. WP

WP 최성기인 북반구 겨울철(12-1월)에 기온 반응은 동아시아 지역과 베링해, 북미지역에서 매우 강하게 나타난다(Figure 26, 1열). 겨울철 캄차카 반도를 중심으로 북쪽으로 한랭 편차와 한반도와 일본 열도를 포함한 동아시아 지역부터 중위도 북서태평양까지 이르러 온난 편차 반응 구조가 남북으로 뚜렷하게 나타난다. 또한 미국 동부와 캐나다 일부 지역은 2월에 그 반응이 감소하긴 하지만 대체적으로 겨울철부터 봄철에 이르기까지 온난 편차의 반응 구조가 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 12월에는 열대 동태평양의 엘니뇨 구역에 WP에 대한 온난 편차반응이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 12월 엘니뇨 상태일 때, WP 원격 반응으로 인해 동아시아 및 북미지역의 온도가 상대적으로 온난해질 수 있음을 시사하고 있다. 1월부터는 엘니뇨 구역의 온난 편차 반응은 사라지고 캄차카 반도부터 알래스카를 거쳐 북미 태평양 연안을 잇는 한랭 패턴이 나타나다가 5월로 갈수록 패턴이 점점 약해진다. 4월의 경우, 인도양 및 열대 대서양에 온난 편차 반응이 나타나는 것도 특징이다.

앞서 언급한 관측에서 WP의 기온 반응을 각 모형 내에 WP의 기온 반응과 비교해보았다(Figure 26, 2열). 12월 특히 북미 지역 및 열대 동태평양 엘니뇨 구역, 동아시아 지역에서의 유의미한 양의 반응은 대부분의 모형이 관측과 유사하게 모의를 했지만 상대적으로 음의 반응은 일부 모형에서만 모의를 하고 있음이 나타났다. 또한 대부분의 모형들은 실제 관측에서 반응이 나타나지 않았던 인도양에서 양의 반응을 나타내고 있다. 인도양에서의 양의 오차반응은 5월까지 지속적으로 나타나고 있다. 또한 1월부터 관측에서는 나타나지 않은 태평양에서의 엘니뇨 타입의 기온반응은 그 강도는 다르지만 봄철까지 지속적으로 나타난다. 이는 NAO와 마찬가지로 중위도의 대기 모드가 ENSO와의 의존성을 높게 가지면서 모형 내에서 반응하는 것으로 해석된다.

각 모형들의 앙상블들과 WP의 기온반응은 북반구 지역에 국한되어 나타나는 것을 확인하였다(Figure 26, 3열). 동아시아, 캄차카반도와 알래스카, 북미지역과 그 앞바다에서는 매우 일관된 패턴을 보이고 비록 12월에 관측에서는 나타났던 ENSO 구역의 강한 기온의 양의 반응이 앙상블간 반응에서는 거의 나타나지 않았다. 즉 NAO 와 마찬가지로 해양 지역에서의 기온 반응은 개별 앙상블이 매우 다른 양상을 보임을 확인할 수 있다.

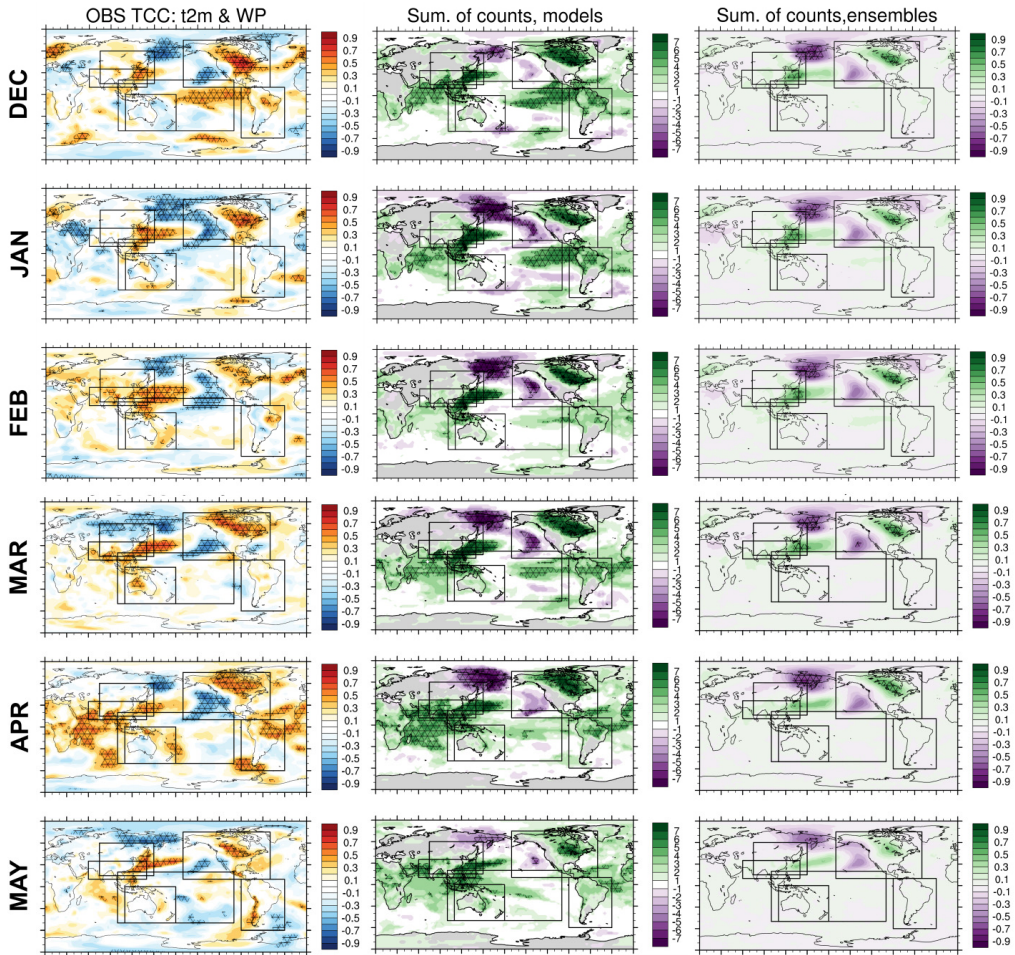


Figure 26. Same as Figure 4 except for t2m with WP index.

10월에 WP와 기온과의 반응은 봄철 반응과 유사하게 동아시아를 포함한 북태평양, 캄차카반도를 거쳐 북미지역까지 유의미하게 나타난다(Figure 27). 이는 예측이 어려운 동아시아 가을철 예측 인자로서 WP 지수를 활용할 수 있는 가능성을 제시할 수 있다. 그러나 개별 모형들의 반응 경향을 살펴보면 대부분의 모형들이 기온의 음의 반응을 거의 모사하지 못하고 대서양과 남아프리카, 북태평양부터 인도양, 남태평양까지 양의 반응을 과대 모의하는 특징이 나타났다. 반면 앙상블 멤버들의 반응 일관성을 살펴보면 겨울철과 봄철 반응과 유사하게 관측에서 나타난 북반구 일부 지역에서의 기온 반응을 적절하게 모사하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

10월 WP와 기온간의 상관반응에 대한 모형간 다양성을 살펴보기 위해 관측과 7개 각 모형을 대상으로 상관반응에 대한 주성분 분석을 수행하였다. 분석은 10월에 WP의 기온 반응이 뚜렷하게 나타나는 남위 30도 이북의 북반구로 수행하였다(Figure 28). 그 결과 주로 WP의 기온 반응에 대한 EOF 첫번째 모드는 대부분의 지역에서 전체적으로 따뜻해지거나 차가워지는 형태의 양의 기온 편차 반응이 나타났고, 이는 전체 변동성의 46.8%를 설명하였다. 특히 대서양, 인도양, 필리핀해, 중남미 지역에서 양의 기온 편차 변동이 과도하게 나타났다. 실제로 관측에서 나타나는 상관반응과는 달리(Figure 27) 각 개별 모형별 WP 지수와 기온과의 상관관계를 살펴보았을 때, 대부분의 개별 모형들이 기온과 WP의 양의 상관 반응을 과대 모의하는 경향이 있고 실제로 음의 상관 반응이 나타나는 지역을 모의해내지 못하는 것을 확인하였다(not shown). 따라서 EOF의 첫번째 모드는 각 모형에서 강하게 나타나는 WP와 기온의 양의 오차반응에 기인해서 나타난 변동 모드인 것으로 판단된다. PC에서(Figure 28 (b)) MSC, NASA, NCEP 세 모형은 뚜렷하게 관측과 반대부호의 변동성을 보였고, 반면 POAMA는 관측과 가장 유사한 변동성을 나타내는 것을 확인하였다. Figure 28 (c)는 관측 변동과 비교해 특징이 뚜렷하게 나타나는 두 모형의 상관 관계를 공간적으로 나타낸 그림이다. NASA 모형은 전구 대부분의 지역에서 WP와 기온의 음의 반응을 전혀 모의하지 못하고 있고 중위도 대부분의 지역에서 통계적으로 유의미한 수준으로 양의 오차 상관 반응이 높게 나타나는 것을 보인다. 반면, POAMA은 앞서 언급했던 관측과 WP의 반응(Figure 27)과 유사한 반응패턴이 나타나고 있다. 10월 기온 예측을 위해 모형의 WP 지수를 예측인자로 활용할 경우 모형간 다양성이 매우 크다는 것을 인지할 필요성이 있고, 모형이 대기 모드에 대한 지수는 적절히 모의할 지라도 그와 관련된 모형 내 대기 패턴이나 기온 반응은 실제 관측과는 다른 역학적 관계에 의해 계산되고 있음을 알려준다. 따라서 향후 예측력 향상을 위한 모형 활용 측면에서는 오차 반응의 원인 파악을 위한 다양한 역학적 분석이 요구된다.

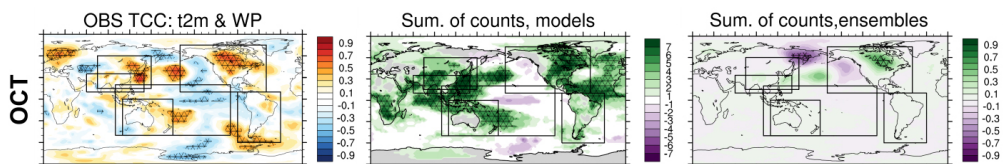


Figure 27. Same as Figure 26 except for October.

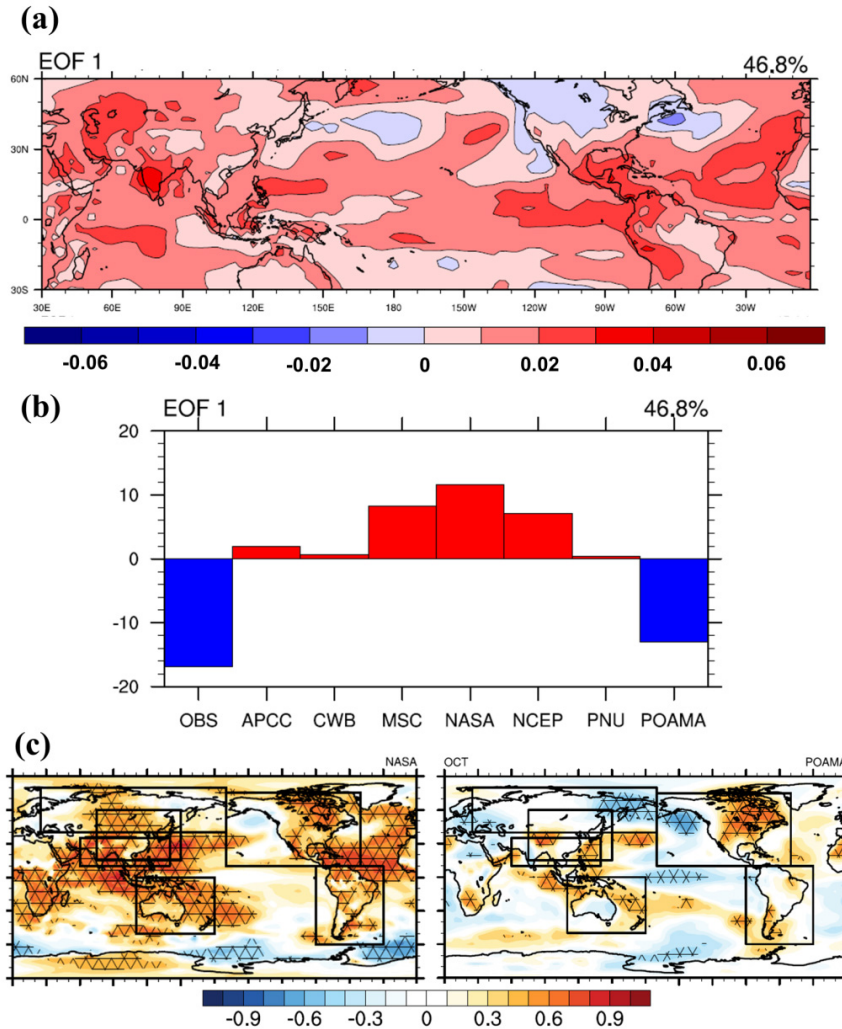


Figure 28. The 1st EOF mode of (a) t2m response of WP over Northern Hemisphere and tropical region [30° E-60° W, 30° S-60° N] and (b) its corresponding principal component of individual models including NCEP-DOE and the spatial pattern of correlation coefficients with predicted T2m and WP index from NASA (left panels) and POAMA (right panels) is displayed in (c). Marked areas represent the confidence levels of 95% according to the two-tailed student t-test.

WP에 대한 강수 반응은 기온 반응과 비교해 강도가 매우 낮고 유의미한 지역이 다소 국소적으로 나타난다(Figure 29). 12월에 열대 태평양에 남북방향으로 습윤하고 건조한 편차 반응이 나타나고 이는 2월로 갈수록 감소한다. 또한 북미 대륙에서 국소적으로 유의

미한 강수 반응이 나타나고 있다. 3월에는 북태평양에서 밴드 형태로 남북방향의 습윤하고 건조한 반응이 나타나고 5월로 갈수록 점점 그 반응이 줄어든다.

열대태평양에서 남북으로 얇게 나타나는 강수 반응과 북미 대륙에서의 강수 반응은 기후 모형에서도 일관되게 나타난다(Figure 29, 2열). 12월 이후 열대태평양의 습윤 반응은 관측에서는 나타나지 않지만 대부분의 모형은 3월까지 이 같은 반응을 유지하고 있다. 전반적으로 관측에서 북반구에 국소적으로 나타났던 강수 반응 중 그 강도가 약한 반응들은 일부 몇 개의 모형에서만 그 반응이 일치되어 나타나는 것을 확인하였다.

양상블럼버간 분석에서도 기온 반응과 마찬가지로 강수반응이 북반구에 국한되어 나타나지만 열대 태평양에서의 반응오차가 전혀 나타나지 않는다(Figure 29, 3열).

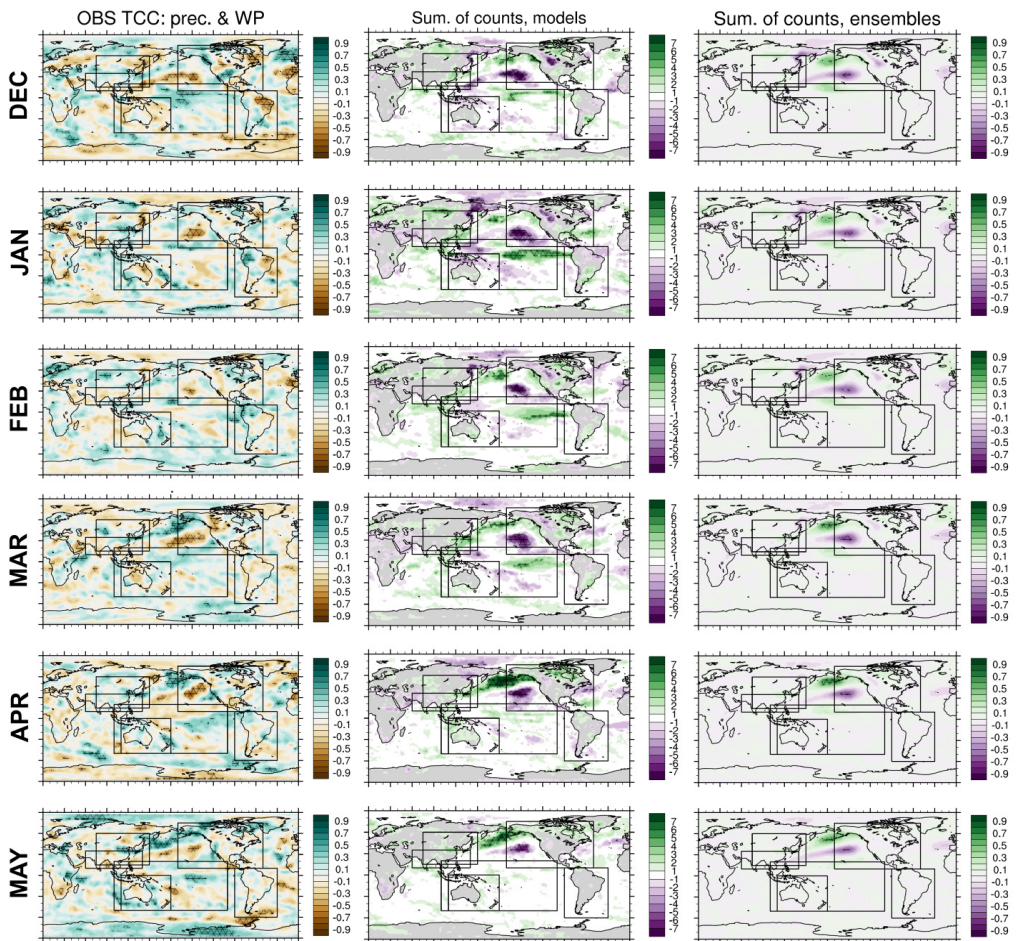


Figure 29. Same as Figure 4 except for precipitation with WP index.

앞서 NAO의 기후 반응은 관측에 비해 지연반응이 있음을 설명하였다. 반면 WP는 남태평양 포함 호주 지역에서 가을철 약한 지연상관이 보이는 것을 제외하고, 대부분의 지역에서 지연 상관이 나타나지 않았다(Figure 30).

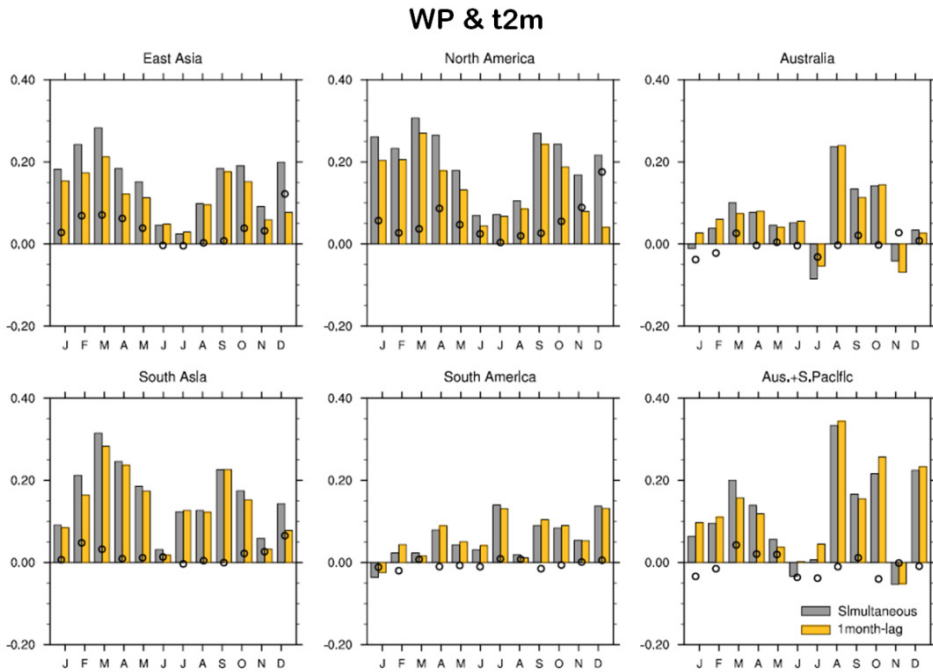


Figure 30. PCC of WP regional response patterns (temporal correlation coefficients shown in Figure 26) between NCEP-DOE and 7 models average for T2M. PCC is first calculated over individual 6 regional domains for each of models then they are averaged over all models. Dimgray and orange bars display simultaneous and 1-month model pattern lagging relationships, respectively. Closed circle indicates the difference between two bars.

3.2.2 기후모드 지역반응에 대한 다중모형간 모의 성능 비교

본 절에서는 기후 모드 반응에 대한 PCC 성능을 월별 지역별로 요약한 결과를 제시하였다.

a. 6개 권역 기온 반응 예측성

전반적으로 계절에 따른 ENSO의 지역 반응의 성능은 다른 변동 모드들 보다 높았다

(Figure 31, 1열). ENSO가 발달하고 최성기에 도달하는 시기인 10월부터 1월까지 ENSO의 지역 반응 성능이 다른 시기 보다 더 컸으며, 이 시기에 모형 간의 성능 차이도 작았다. ENSO onset 시기인 2월, 5월에 모형 간의 성능차이가 가장 컸다. 전 계절에 대해서 균일하게 최고의 성능을 보이는 것은 POAMA이고, 그 다음으로는 CWB와 MSC가 가장 좋은 성능을 보였다. 12월에서 4월까지 PNU가 가장 낮은 성능을 보였다. 지역별로 비교를 하면, 호주와 남태평양 일부를 포함한 지역에서 당연히 모든 모형들이 높은 성능을 보였고, 다음으로는 북미와 남미 지역에서 기온 반응에 대한 모형 성능이 좋았다. 이들 지역에서 모형 간의 성능 차이도 적었다. 이들 지역에서의 높은 기온 반응 성능은 ENSO와 관련된 로스비 파동전파라는 확실한 역학이 존재하고, 어느정도 로스비 파동과 관련된 역할들을 잘 재현하고 있음을 의미한다. 동아시아 지역의 기온 반응 성능이 다른 지역들 보다도 상당히 작았으며, 모형 간의 성능 차이도 컸다. 남아시아와 호주 지역에서는 워플 부근에 위치해 있는 것 때문인지, 지역 반응 모형 성능이 비슷하였다. 전반적으로 POAMA와 CWB가 성능이 가장 좋았으며, APCC는 지역별, 계절별 모두 중간 정도의 성능을 보였다.

IOD에 대한 각 지역의 반응은 IOD가 발달하기 시작하는 북반구 여름철부터 IOD의 최성기에 해당하는 북반구 가을철에 증가하는 경향을 보인다(Figure 31, 2열). 6개의 권역 중 동아시아 지역에서 IOD와 기온과의 상관성이 모형에서 잘 재현되지 않는 것으로 나타났다. Figure 3의 DMI TCC에서 12개월 내내 통계적으로 유의한 상관관계를 보여 주던 POAMA의 경우 IOD에 의한 기온의 반응에 대한 재현성이 비교적 좋은 것을 확인할 수 있다.

NAO 기온 반응은 NAO 활동성이 최대인 북반구 겨울철에 성능이 전반적으로 높고 2월에 그 값이 최대이다(Figure 31, 3열). 모형간 성능차가 다소 있지만 이러한 계절별 추이는 일관되게 나타난다. 겨울에서 초여름까지는 전반적으로 POAMA 모형이 최대 성능을 보이고, 늦여름부터 초겨울까지는 NCEP/NASA/MSM 등 북미권 모형의 성능이 상대적으로 높게 나타난다. 안타깝게도 APCC는 2-6월 사이에서 성능이 매우 저조한 것으로 나타났다. 6개 검증 지역별 성능은 전반적으로 북아메리카 대륙에서 가장 높고 모형간의 차이도 적는데, 이는 NAO의 관측 반응이 뚜렷한 지역이기 때문으로 판단된다. 동아시아와 호주를 포함하는 태평양에서의 성능은 모형별 격차가 뚜렷하고 전반적으로 낮다.

이들 지역은 NAO에 대한 뚜렷한 기온 반응이 없는 지역임에도 불구하고 일부 모형에서 ENSO 관련성을 크게 고려해 기온 반응을 과대 모의하기 때문이다. 전체적으로 가장 높은 성능을 보이는 모형은 남미를 제외하고 POAMA이다.

WP에 대한 월별 기온 반응은 다른 모드에 비해 현저하게 성능이 떨어지지만 WP의 최성기인 겨울철부터 봄철까지 전반적으로 높게 나타난다(Figure 31, 4열). 특히 대부분의 모형이 12월, 3-4월에 예측성능이 가장 높게 나타나며 모형간 차이가 많은 1월은 MSC에서 최대성능이 나타난다. 또한 계절이 전이되는 시기인 9-10월에 모형들의 예측 성능이 상대적으로 높게 나타나고 반면 WP의 반응이 미미한 여름철은 모든 모형에서 성능이 매우 저조하다. 지역별 성능은 상대적으로 남반구보다는 WP의 관측 반응이 나타나는 북반구에서 주로 높고 특히 POAMA는 북미지역에서 최대 성능이 나타난다.

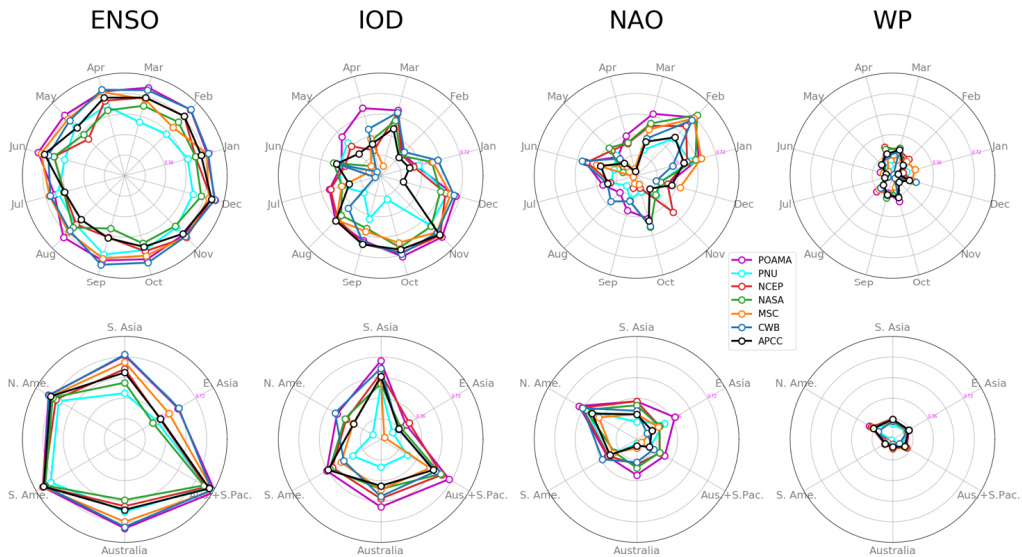


Figure 31. PCC of T2M regional response patterns of 4 climate modes (shown in Figure 4, Figure 11, Figure 20, Figure 26) between NCEP-DOE and 7 individual models. PCC is first calculated over individual 6 regional domains for each of 12 months, then they are averaged over either (upper panels) all domains and (lower panels) all months.

b. 6개 권역 강수 반응 예측성

강수 반응 예측 성능은 기후 모드 전체에서 기온 반응 예측 성능에 비해 낮았다. 먼저 ENSO 모드에 대한 강수 반응은 기온 반응처럼 다른 기후 모드들 보다 더 나은 성능을 보였다. 또한 기온 반응처럼 다른 시기 보다 ENSO발달과 최성기 시기인 10월에서 2월에 모형 성능이 더 좋다. 기온과는 달리 강수 반응에서 전 계절에 대해서 균일하게 최고의 성능을 보이는 것은 NCEP이다. 모형 간의 성능차이가 기온 반응 보다 다소 작았으며, 강수 반응에 대한 모형간 성능차이가 있는 계절은 여름철(7-9월)이었다. ENSO에 대한 강수 반응의 지역별 성능을 비교해 보면, 남아시아, 호주, 남태평양과 호주 지역에서 비슷한 좋은 성능을 보였다. 그 다음으로는 남미, 북미, 동아시아 순으로 성능이 낮았다. 기온 반응 성능에 비해 북미에서 낮고, 남아시아에서는 높은 것은 흥미로운 결과이다. 좀더 추후에 연구가 필요하다. CWB와 PNU가 전반적으로 성능이 안 좋았다. APCC는 기온반응 성능과는 달리 강수 반응 성능에서는 상위 모형 그룹에 속하였다.

IOD에 대한 강수의 반응 또한 IOD가 최성기에 접어드는 계절(9-11월)에 보다 높은 성능을 보인다. 기온반응에서와 마찬가지로 APCC의 경우 12-1월에 그 성능이 급격히 떨어진다. 모든 모형이 1월의 강수 반응 모의 성능이 좋지 않음을 확인할 수 있다. 모형들의 기온 반응 모의에 비해 강수 반응 모의가 전반적으로 떨어지는 경향이 있으나 호주 영역에서의 성능이 다소 기온반응에 비해 증가하는 경향이 있다. 동아시아나 북미와 같이 인도양으로부터 멀리 떨어진 고위도 지역에서 반응이 잘 모의되지 않는 경향을 보인다.

NAO 강수 반응은 10월, 1-2월에 높은 성능을 보이거나 봄부터 초가을까지는 예측성을 찾아볼 수 없다. 모형간 비교에서 뚜렷한 승자를 찾을 순 없지만, POAMA의 성능이 일부 월에서 미미하게 높다. 기온 반응에서 확연하게 저성능을 보인 APCC 모형은 강수 반응에서는 타 모형과 유사한 성능을 보이는 것으로 나타났다. 검증 지역별로 살펴보면 북미 지역의 성능이 상대적으로 높으나, 지역차이가 기온에 비해 뚜렷하지 않다. 최대 성능을 보이는(가장 바깥쪽에 위치하는) 모형은 북미/남미에서는 APCC, 남아시아 호주 남태평양 지역에서는 NASA이고, 동아시아 지역에서는 우열을 가리기 힘든 모습이다.

WP에 대한 강수 반응은 두 해양모드 및 NAO에 비해 전반적으로 지역별, 계절별로 매우 미미하게 나타난다.

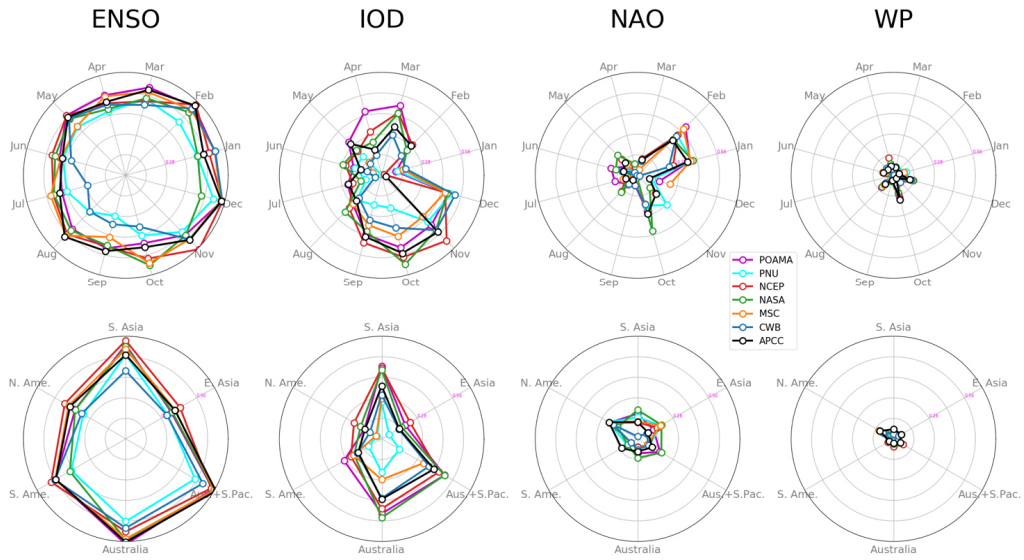


Figure 32. PCC of precipitation regional response patterns of 4 climate modes (shown in Figure 6, Figure 12, Figure 21, Figure 29) between NCEP-DOE and 7 individual models.

4. 기후모드 영향에 대한 전지구 통합 가이드스맵

실질적인 월/계절 전망을 생산하는 과정에서 역학모형 예측결과가 매우 중요한 원천 정보이긴 하지만, 모형 성능의 지역별/시기별 한계를 인지하고 있기 때문에 관측 자료 기반의 통계들이 보조 자료로 매우 활발하게 활용되고 있다. 특히 기후모드의 영향은 역학 예측을 보정하여 매뉴얼 예보를 낼 때 매우 중요한 과학적 근거이다. 매해 매계절 예보자의 주관과 당시 기후 상태에 따라 즉흥적으로 분석되는 기후모드 관련 정보들은 산재해 있지만, 각 지점에 유의미한 영향을 주는 기후모드들이 무엇인지에 대해 체계적으로 정리된 자료를 찾기는 힘들다. 이러한 자료는 센터 내 장기예보 전담팀에서 한반도 예보를 보완하거나 향후 지역별 맞춤형 연구 및 서비스를 개발을 계획하는데 매우 유용한 정보가 될 것이다. 따라서, 본 연구에서 살펴 본 네 개의 기후모드들 중 기온/강수에 유의미한 영향을 주는 기후 모드들을 한눈에 알아보기 쉽게 지점/월별로 도식화한 영향모드지도도를 제공하고자 한다.

그 예로서 Figure 33의 상단 지도는 각 지점별로 10월 강수와 유의미한 상관계수를 갖는 15개 기후모드 조합을 독립적인 색깔로 표시한 것이다. ENSO, IOD, NAO, WP가 단독으로 유의미한 영향을 주는 경우는 옅은 색으로, 두 모드가 동시에 유의미한 영향을 주는 경우는 좀 더 짙은 색으로 표출하였다. 세 모드가 동시에 영향을 주면 색깔 동그라미로, 모든 모드가 영향을 주는 경우는 검정색으로 채운 동그라미로 나타냈다. 유의미한 영향을 판단하는 근거인 각 기후모드의 상관관계지도를 하단에 표출하였다.

10월 강수에 대한 지역적인 영향을 분석하면, 열대 지역으로 갈수록 다수의 모드가 동시에 영향을 주는 경향이 있다. 아프리카 근방 서인도양과 Maritime continent 지역의 대부분은 WP를 제외한 세 모드의 영향을 동시에 받고, 태평양 적도 지역은 NAO를 제외한 세 모드의 영향을 동시에 받는다. IOD와 ENSO는 인도양과 태평양에서 매우 뚜렷한 해양 모드로서 각 지역에서 강수에 주는 영향은 예상가능하다. 하지만, 두 대양을 아우르는 전체 지역에서 두 모드가 동시에 영향을 준다는 점이 주목할 만한데, 이는 10월의 경우 IOD 최성기이고 ENSO 발달시기이기 때문으로 해석할 수 있다. 엘니뇨를 선행하는 인자로서의 IOD 역할 등, 둘 사이의 밀접한 관련성이 많은 연구에서 제시되어 있다 (예; Behera et al. 2006; Izumo et al. 2010 ; Cai et al. 2011b; Wang et al. 2016).

대기모드의 경우 NAO와 WP가 동시에 영향을 주는 지역이 동유럽, 칠레 남쪽 등에서 국소적으로 나타나는데, 이는 이들이 해양모드처럼 전구로 광범위한 영향을 주는 모드가 아닐 뿐만 아니라 RPCA를 적용한 모드 정의 자체에서 둘 사이에 독립성(orthonomal)을 가정했기 때문으로 풀이된다. 해양모드의 경우는 도메인 평균값으로 정의하기에 독립성에 대한 검토가 이루어지지 않아, 동시적 영향이 높게 나타날 수 있겠다. 간간히 모든 모드가 동시에 영향을 주는 격자도 존재하는데, 아프리카 케냐, 탄자니아 근방과 인도네시아 파푸아섬 인근이 대표적이다.

열대 인도양 및 Maritime continent에서의 NAO에 대한 강수반응은 원격 상관 측면에서 매우 주목할만하다. 대서양 대기모드가 멀리 열대 지역의 강수와 상관성을 보인다는 것은 간단하게는 ENSO와 NAO의 동시상관성 때문으로 해석할 수 있겠다. NAO가 일부 ENSO의 영향을 받는다는 기존 연구(Ineson and Scaife 2009; Smith et al. 2010, 2014)가 존재하기 때문이다. 하지만 성층권 극소용돌이와 연결된 NAO가 하부 성층권에서 상호작용을 통해 우회적으로 열대 인도양과 Maritime Continent 등에 영향을 준다는 합리적 의심도 가능하며, 깊이 있는 분석을 한다면 성층권-대류권 상호작용 뿐만 아니라 열대-중위도 상호작용의 역학적 이해를 발전시킬 수 있을 것이다. 이렇듯, 본 연구가 제공하는 영향모드지도가 다양한 역학 연구의 시작점이 될 수 있을 것으로 기대된다.

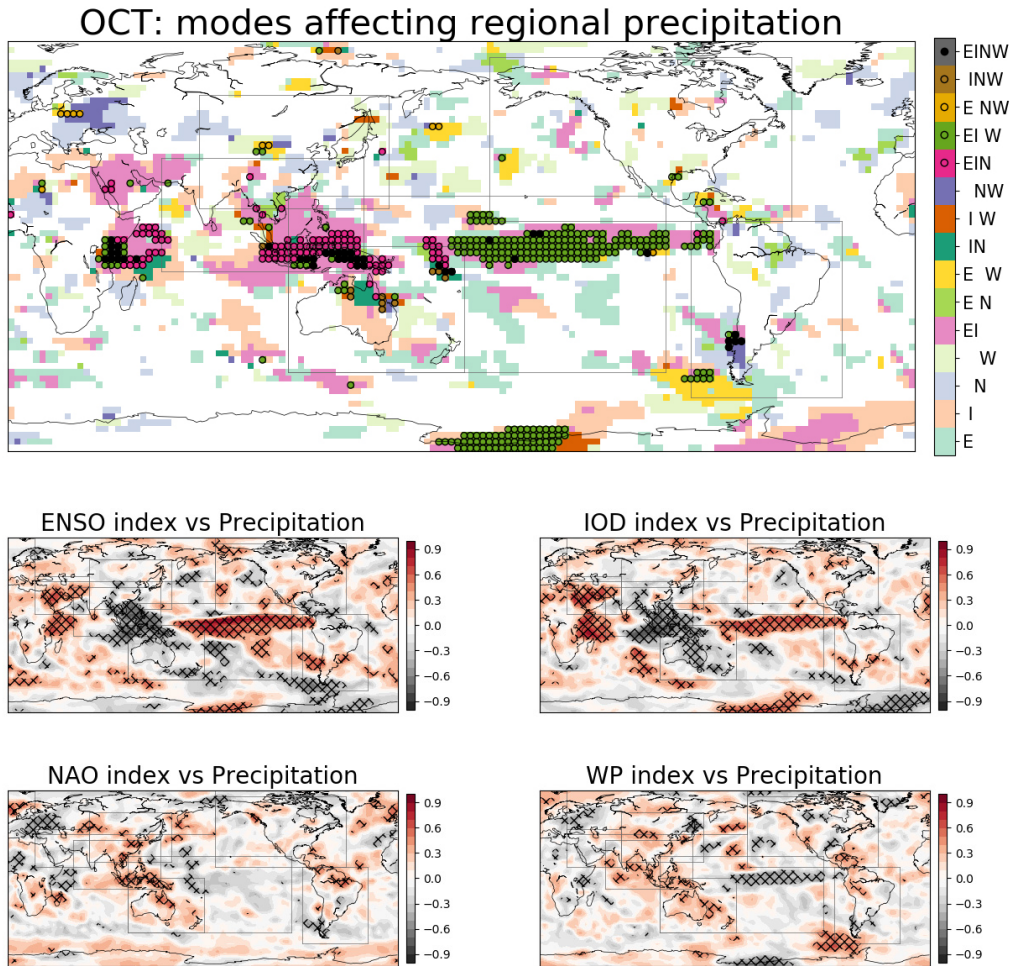


Figure 33. (Lower four panels) correlation coefficients between climate index of four climate modes and precipitation at each grid and (top panel) a graphic altogether showing climate modes having 95% confidence level correlations for october.

Figure 34는 12월 하층기온에 영향을 주는 대기 모드를 정리한 그래픽이다. 12월은 ENSO 최성기로서 아열대지역까지 확장된 중동태평양과 인도양 전체에서 ENSO 반응을 확인할 수 있다. 매우 넓은 열대 태평양 지역에서 ENSO, IOD와 함께 WP도 영향을 주는 것으로 나타나는데, 겨울철 제트의 강도가 ENSO에 의존적인 것을 감안하면 이해할 수 있다. 북반구 아적도 지역에서 하층 기온은 대기모드의 영향이 강하다. 북아메리카 동부와 유럽을 포함한 대서양 지역은 NAO 영향, 태평양 제트기류의 남북방향 경계지역과 풍하측에서는 WP의 영향을 확인할 수 있다. 한반도를 포함한 북서태평양 지역에서 WP

영향이 뚜렷한데 이는 한반도 예보에 보조 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 두 대기모드가 함께 영향을 주는 지역도 상대적으로 넓게 분포하는데, 캄차카 반도 주변, 북동태평양, 미국 남동부, 북유럽이 대표적이고, 지역적으로는 남한도 이에 해당된다.

영향모드 지도 해석에서 유의할 점은, 다수 모드가 한번에 표시되었다고 해서 그 영향력의 부호가 모두 일치하는 것은 아니라는 점이다. 예를 들어, 열대 태평양 지역의 경우는 ENSO, IOD, WP가 모두 유의미한 상관성을 가지지만 WP의 부호는 다른 두 모드와 반대이다. 그리고 모드간에 상호 관련성을 고려한 부분적 영향력 혹은 선후관계 등의 정보는 제공하지 않는다. 안타깝게도, 본 영향모드 지도는 기후 모드가 기온/강수 변동성에 미치는 영향력의 정도를 정량적으로 나타내지는 않는다. 앞서 언급했듯이, 기후 모드들이 완벽히 독립적이지 않기 때문에 상당부분 상호 관련성 갖고 있고 따라서 여러 모드들이 동시에 영향을 주는 지점에 대해서는 영향력의 총량을 얻는 것은 매우 어려운 일이다. 또한 여러 모드들이 동시에 영향을 준다고 하여 그들이 미치는 영향력이 절대적으로 커진다는 것을 의미하는 것도 아니다. 기후 모드가 미치는 절대적인 영향력의 정도는 매우 의미 있는 정보이기 때문에, 향후 이를 재는 적절한 통계 방법을 개발하는 것이 필요하다고 생각된다. 본 영향모드지도의 활용을 위하여, 관심 있는 지점에 영향을 주는 모드들을 우선 파악한 후에, 개별 모드 반응의 부호, 강도 및 패턴 등의 특성을 하단 패널에서 확인하고, 그 다음에 필요한 추가 연구를 진행하는 일련의 과정을 제안한다. 또한 각 지점에 영향을 주는 기후 모드가 본 연구에서 분석한 네 개로 제한되는 것은 아니라는 점을 염두해야 한다. 영향모드지도는 현재 활용 가능한 정보에 기반해서 생산되었기 때문에, 다른 기후모드 역시 영향을 줄 수 있다는 가능성을 열어 두어야 한다. 마지막으로 모든 분석은 재분석자료에 대해 이루어졌기 때문에 모형세계에서의 모드영향지도는 상당히 다를 수 있고, 따라서 모형 자료를 해석할 때는 이 점을 고려해야 한다.

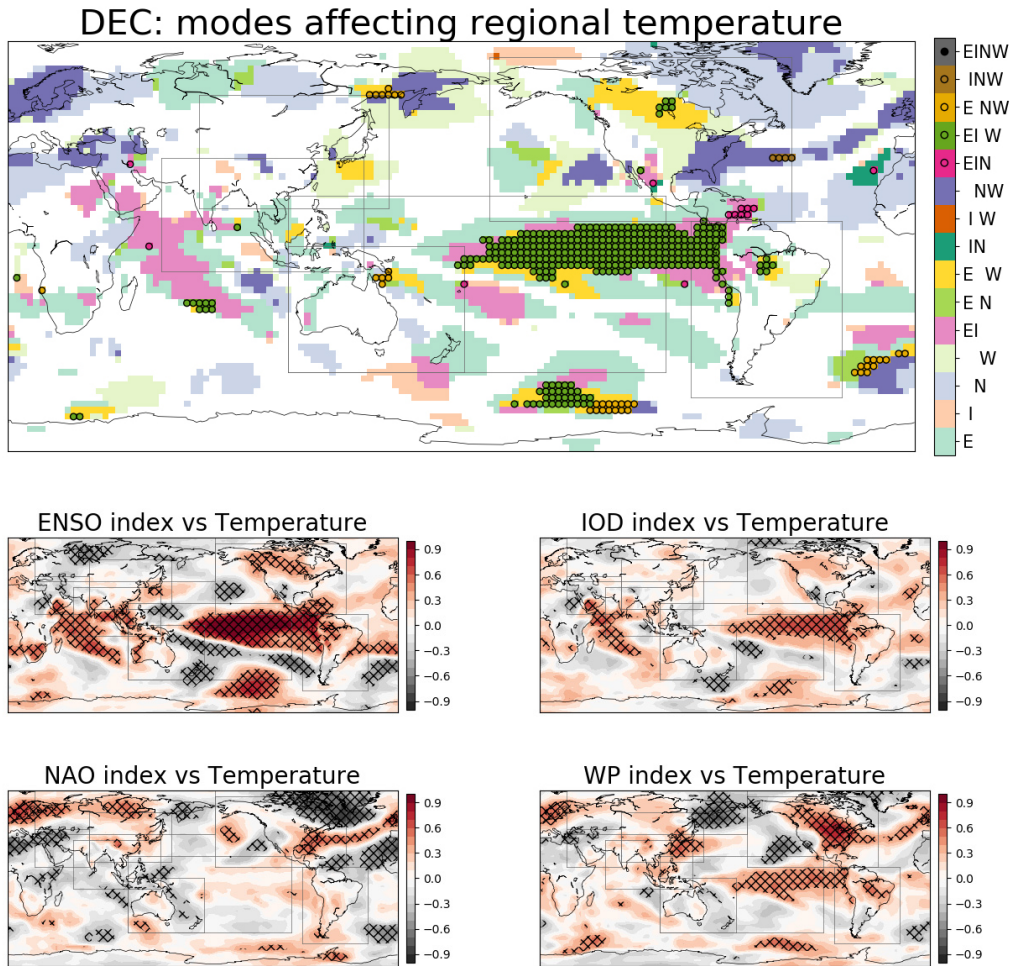


Figure 34. Same as in Figure 33 except for 2-m temperature.

각 달의 네 기후모드에 대한 하층 기온반응을 검증지역별로 요약한 결과는 Figure 35와 같다. 검증지역 도메인 내에서 15개 기후모드 조합 카테고리에 해당하는 격자 개수를 세어서 막대그래프로 나타냈고, 숫자가 많은 것부터 3순위까지의 카테고리에 대해 숫자로 표시하였다. 이에 더하여, 단독 대기 모드에 해당하는 부분은 회색 별표 막대로, 2개 이상 모드가 조합된 부분은 검정 경계선 막대로 중첩하여 표시하였다. 남태평양, 호주, 남미, 그리고 남아시아와 같이 열대 해양을 많이 포함하는 지역들은 상대적으로 해양모드 영향이 크다. 그 중 호주를 포함한 남태평양 지역은 ENSO 단독 영향 면적이 매우 넓다. 남아시아의 경우 도메인에 인도양 및 Maritime continent를 포함하기 때문에 IOD의

영향이 상대적으로 크고, IOD 최성기 직전(7-9월)에 매우 뚜렷하다. 반대로 대부분의 도메인이 육지인 동아시아와 북미에서는 대기모드 영향이 매우 크게 나타난다. 동아시아의 경우 봄철에 WP 영향 면적이 매우 넓고, 북미의 경우 NAO의 영향 면적이 전 계절에 고루 넓게 분포한다. 하지만 동아시아 1월은 특이하게 IOD 영향 면적이 매우 넓게 나타나는데, 예보 보조자료로의 활용이 기대된다. 계절별 추이를 살펴보면, 여름철은 대륙 지역 특히 동아시아 지역에서 기후 모드 영향 면적이 매우 작다. 이 시기 예보가 어렵고 예측성이 낮은 상황을 이해할 수 있다. 카테고리별 순위를 보면, 해양을 많이 포함하는 네 지역에서는 단독 해양모드나 조합된 모드의 순위가 높지만 대륙 지역에서는 단독 대기모드가 상위권을 차지하는 것을 알 수 있다.

Areal fraction of climate modes contributions [Temperature]

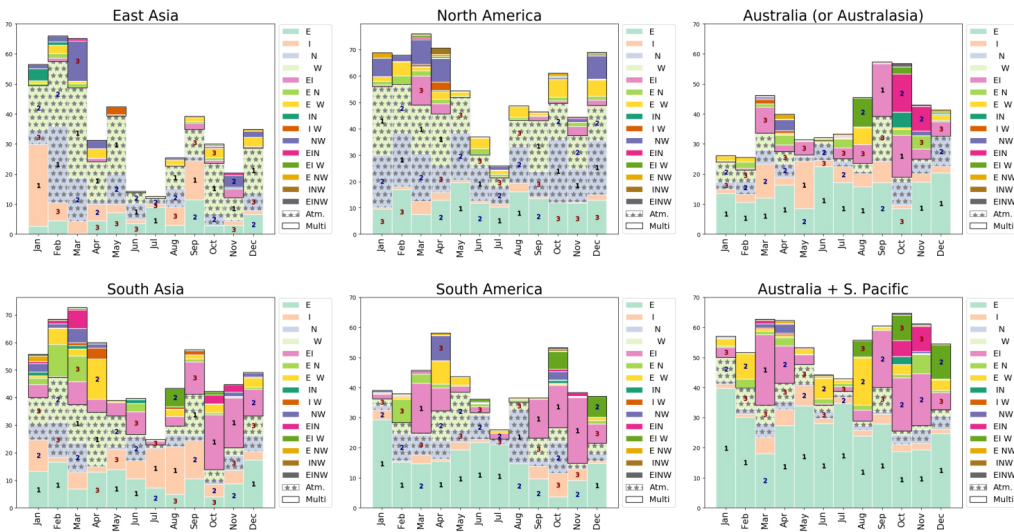


Figure 35. Areal fraction of 15 different kinds of climate mode contribution to 2-m temperature (T2M) over 6 regions for 12 months. Blocks with grey starred bars indicate the fraction of grids where single atmospheric mode is affecting T2M. Blocks with black solid outlines indicate the fraction of grids where climate modes more than one are affecting T2M.

강수의 경우도 하층 기온 반응의 특성과 대체로 유사하지만, 기후모드 영향을 받는 면적이 전체적으로 줄어든 것을 볼 수 있다(Figure 36). 해양모드에 비해 대기모드의 영향 지역 감소가 크고 이는 동아시아 북미 지역에서 뚜렷하게 나타난다. 강수의 경우, 중규모 역학에 의해 좁은 지역에서 단기간에 발생하는 경우가 많은데, 이러한 강수 이벤트들

이 월평균 값에 흡수되어 대규모 기후 모드와의 관련성을 낮추기 때문으로 해석된다. 계절별로 보면, 북반구 봄철에서(3-4월) 강수에 대한 기후 모드 영향 면적이 앞선 기온 (Figure 35)에 비해서 매우 좁다. 이는 봄철 강수에 대한 예측인자를 찾기 힘들다는 뜻으로, 이 시기 역학모형 성능이 터무니없이 낮은 것과도 관련 있겠다.

Areal fraction of climate modes contributions [Precipitation]

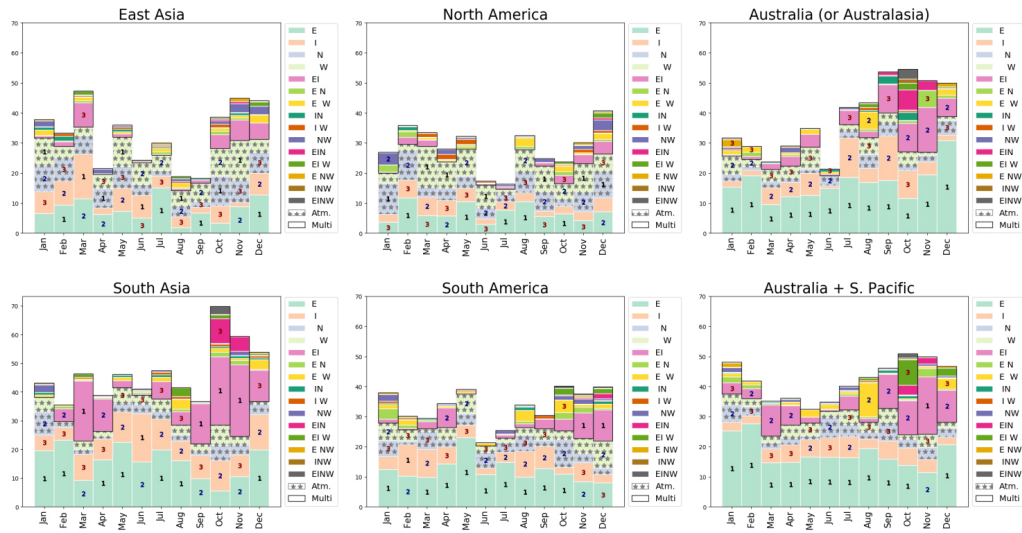


Figure 36. Same as in Figure 35 except for precipitation.

5. 결론

본 연구에서는 전 지구 해양 및 대기의 주요 기후 변동 모드들인 ENSO, IOD, WP, NAO 모드들의 지역 기후 영향 측면에서 원격 상관의 특징 및 오류들을 분석하였다. 먼저 ENSO 변동성 자체는 1개월 예측선행 시간에서 APCC MME 모형들이 잘 예측하였다. 그리고 전반적으로 ENSO와 관련된 원격상관 측면에서는 관측에서 보이는 많은 특징들을 잘 재현하였다. 특히 ENSO 발달하는 계절 즉 가을철과 겨울철에 원격상관 성능이 가장 좋았고, 모형간 차이도 적었다. 하지만, 일부 지역에서 과도한 기온/강수 반응강도가 과도하게 모의되는 오류를 보이기도 하였다. 특히 ENSO 최성기 시즌에 북미 기온/강수 반응강도 오류가 상당히 증가하였다. 이 때문에 ENSO가 발달하는 동안 북미 기온/강수 예측 오류를 발생시켰다. 즉 대부분의 모형들에서 ENSO 최성기시즌 동안 양의 편차, 라니냐 동안 음의 편차가 우세한, 엘니뇨/라니냐에 대한 기온/강수 반응에서 강한 선형 관계가 유지되었지만, 관측에서는 선형 관계가 약하였다. 모형에서 강한 선형성에 대한 원인으로 원격상관 대기 패턴이 엘니뇨와 라니냐 사이에 선형성이 크다는 점, 극 지역의 중위도 기후에 영향을 제대로 모의하지 못하기 때문에 겨울철 엘니뇨/라니냐 반응이 최성기 시즌 내내 유지되는 점등이 가능한 원인이다. 아울러 상관관계 주성분 분석을 통해서 극 지역의 중위도 영향의 오류는 모형들의 북극해 지역 cold bias와 관련 지을 수 있다고 결론을 내렸다. 결국 ENSO에 대한 기온/강수의 강한 선형적인 상관관계는 엘니뇨/라니냐 발달시 일부 지역 예측 정보 활용에 주의해야 함을 시사한다.

IOD의 계절예측 모형의 성능은 대기모드 예측에 비해 좋은 편이지만, ENSO 예측 성능에 비교하였을 때 TCC값이 줄어드는 경향을 보인다. IOD의 최성기(9-11월)에는 모든 모형에서 통계적으로 유의미한 DMI 예측성능을 보이는 것으로 나타났다. 다만 CWB와 PNU에서 TCC값이 다른 모형에 비해 통계적으로 유의한 값을 보이는 달의 수가 적었다. IOD에 대한 기온과 강수의 반응은 주로 인도양 주변 국가들에서 뚜렷하게 나타났다. 인도양의 서쪽 주변 국가들은 IOD의 영향으로 인해 상대적으로 고온/다습한 경향을 나타내고 인도양의 동쪽 주변 국가들은 저온/건조한 경향을 나타낸다. 또한 열대 태평양에서의 IOD 반응과 ENSO에 의한 기온 및 강수 반응 패턴이 매우 유사하게 나타났다. IOD에 대한 각 지역의 반응에 대한 예측성은 주로 IOD가 발달하는 북반구 여름철부터

증가한다. 모형이 관측과 IOD의 반응측면에서 얼마나 공통된 패턴을 보이는지를 살펴본 결과, IOD 자체가 중위도 및 대륙에 미치는 반응이 관측에서도 뚜렷하지는 않지만 모형에서는 더 감소하는 경향을 보인다. 특히, 6개 지역 중 동아시아 지역에서 IOD의 반응은 모형에서 가장 재현되지 않았다.

인도양 해수면 온도의 EOF 분석을 통해 모형들은 대부분 주요 상위 모드(IOB, IOD)가 전체 해수면 온도의 변동성을 차지하는 비율이 관측에 비해 높게 나타났다. 이러한 경향은 태평양 해수면 온도에서도 마찬가지로 나타났다. 태평양의 ENSO 변동성이 크게 나타나기 때문에 ENSO의 영향을 주고받는 IOB나 IOD의 변동성이 크게 나타나는지에 대한 추후 연구가 더 필요한 것으로 보인다. 한편, IOD의 경우 IOD 발달시기 자바 해 인근의 남동풍과 같은 대기활동 양상이 대부분의 모형에서 잘 재현되었다. 그러나 ENSO의 영향력을 배제한 후 살펴본 IOD와 기온 반응의 경우 관측에서 동아시아 지역의 양의 상관관계가 더욱 뚜렷해지는데 반하여 모형에서는 이러한 경향이 잘 나타나지 않았다.

1개월 선형 NAO 지수 변동성 예측은 해양 모드에 비해서 매우 낮지만, NAO 최성기인 북반구 겨울철(특히, 1월)에는 많은 모형이 유의미한 성능을 보인다. 7개 모형들을 비교하면, POAMA의 성능이 현저히 높다. NAO의 기온/강수 반응은 북반구 겨울철 대서양을 포함한 주변 지역에서 매우 뚜렷하게 나타난다. 기온 반응의 경우, 북아메리카 동부에서 대서양을 거쳐 유럽, 아시아에 이르는 북반구 아적도 지역과 일부 남반구 지역에서 매우 넓게 나타나지만 강수 반응은 북아메리카 동부에서 대서양을 거쳐 동유럽까지 상대적으로 좁은 중위도 영역에서 나타난다. 유의한 기온/강수 지역 반응은 전반적으로 7개 모형들에서 일관되게 모의되지만, 일부 지역에서는 패턴이 어그러지고 과대/과소 모의되거나 혹은 관측에 없는 반응이 생기는 등의 오류를 확인할 수 있었다. 상관관계맵의 모형간 주성분 분석 결과, NAO 풍하측인 유럽 아시아 대륙에서의 기온 반응의 모형간 다양성이 뚜렷하고, 이는 북대서양 해수면 온도 평균 모형 오차와 관련된 것으로 파악된다. 7개 모형의 전체 앙상블을 고려했을 때 열대 해양 지역 반응의 일관성이 사라지는데, 이는 모형세상에서는 NAO의 반응이 북반구 아적도에서만 유의하게 모의되고 있음을 의미하며, 따라서 MME에서 모형/앙상블을 합성하는 방법에 따라 지역 반응 해석에 각별한 주의가 필요함을 배울 수 있다.

NAO의 경우 특이하게 3-4월에 기온/강수 모두에서 모형 반응이 1개월 이전의 관측 지역 반응과 더 높은 공간 상관성을 보여, 반응성에 대한 봄철 지연 모의가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 모형에서 3-4월에 ENSO-NAO 관련성이 과대 모의되고 NAO 자체 활동성의 최성기가 관측에 비해 1개월 지연되어 3월에 나타나는 것과 관련되어 있다. 하지만 ENSO 활동성 최성기의 지연은 나타나지 않아 ENSO 자체를 직접적인 원인으로는 볼 수 없다. 대신, ENSO가 강한 겨울철을 초기장으로 처방하는 모형 실험에서 대기 로스비 전파 형태로 봄철 북대서양 지역 SST가 변화되고, 이에 대한 반응으로 NAO 최성기 및 지역반응 지연이 봄철에 나타나는 것으로 예상해 볼 수 있겠다.

WP의 경우, 두개의 해양모드에 비해서 시계열 모의 성능이 현저하게 떨어짐을 확인하였다. WP의 최성기인 겨울철과 봄철 중 상대적으로 봄철에 예측성능이 높게 나타났고 특히 4월에 4개의 모형에서 통계적으로 유의미한 예측성능을 보이는 것으로 나타났다. 또한 계절이 전이되는 시기인 9, 10월에 모형의 TCC가 상대적으로 높고 WP의 활동성이 약한 여름철엔 모형에서 예측성능이 거의 나타나지 않았다. WP에 대한 기온과 강수의 반응은 북반구 겨울철에 동아시아, 베링해, 북미 지역에서 매우 뚜렷하게 나타났다. 동아시아와 북미지역은 WP의 영향으로 온난하고 캄차카 반도부터 베링해를 거쳐 북미 태평양 연안은 한랭한 반응이 나타났다. 이 같은 반응을 대부분의 모형이 관측과 유사하게 모의를 했지만 실제 관측에서 반응이 나타나지 않았던 인도양에서의 양의 반응을 크게 나타내는 것이 공통적이었다. 또한 관측에서 12월에 열대 동태평양 엘니뇨 구역에서 온난 편차가 뚜렷하게 나타나는데, 모형은 이 지역에서의 온난 편차를 4월까지 지속적으로 나타내는 오차를 확인하였다. 또한 10월 WP와 기온간의 상관관계에 오차반응을 통해 모형이 대기 모드의 지수를 적절히 모의했지만 그와 관련된 모형 내 대기패턴이나 기온 반응이 실제 관측과는 다른 역학 관계로 반응하고 있음을 확인하였다. WP에 대한 강수반응은 기온 반응과 비교해 그 강도가 매우 약하지만 열대태평양에서 남북으로 얇게 나타나는 강수 반응과 북미 대륙에서의 강수 반응은 기후 모형에서도 일관되게 나타났다. 또한 기온반응과 유사하게 관측의 12월 열대태평양의 습윤 반응을 모형은 3월까지 유지하는 경향이 있었다. 그러나 기온과 강수에서 나타나는 모형에서의 열대태평양 오차반응은 개별 앙상블간 반응에서는 거의 나타나지 않았다. WP에 대한 6개 권역 기온과 강수 반응 예측성에 있어, 기온의 PCC는 다른 모드에 비해 현저하게 낮지만 북반구에서 WP의 반

응이 활발한 3, 4월과 계절이 전이되는 시기인 9, 10월에 예측성능이 상대적으로 높게 나타났고, 강수에 대한 반응 예측성은 거의 나타나지 않았다.

마지막으로, 본 연구는 전구 개별 격자 기온/강수에 유의미한 영향을 주는 모드를 통합적으로 표출하는 영향모드지도를 생산 제공한다. 이를 통해, 매월 관심 지역/격자에 대한 ENSO, IOD, NAO, WP 네 모드의 영향력 여부를 한 번에 확인 가능하다. 또한, 영향모드지도 6개 검증 지역에서 어떠한 모드들의 조합이 주요한 영향을 주는지에 대한 통계 역시 제공한다. 하지만, 영향모드지도는 기후모드 각각이 얼마만큼의 독립적인 영향을 주는지에 대한 정보 그리고 기후모드간 상대적인 중요도 등의 정보는 제공하지 않기에 해석에 유의해야 한다. 영향모드지도 관련 정보들은 현업 예측의 보조 자료로 이용 가능하고, 기후모드 지역 영향에 대한 추가 연구를 시작하는 중요한 동기가 될 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

- Adler, R. F., and Coauthors, 2003: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *Journal of Hydrometeorology*, **4**, 1147–1167.
- Ahn, J. B., and H. J. Kim, 2013: Improvement of one-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM. *Meteorol. Appl.*, **21**, 415–418. doi:10.1002/met.1372
- Alexander, M. A., I. Blade, M. Newman, J. R. Lanzante, and N.-C. Lau, 2002: The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnection on air–sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate*, **15**, 2205–2231.
- Allan, R., Chambers, D., Drosowsky, W., Hendon, H., Latif, M., Nicholls, N., Smith, I., Stone, R. and Tourre, Y., 2001: Is there an Indian Ocean dipole and is it independent of the El Niño–Southern Oscillation. CLIVAR exchanges, 21, pp.18–22.
- Archambault, H. M., L. F. Bosart, D. Keyser, and A. R. Aiyyer, 2008: Influence of Large-Scale Flow Regimes on Cool-Season Precipitation in the Northeastern United States. *Monthly Weather Review*, **136**, 2945–2963.
- Ashok, K., Z. Guan, N. H. Saji, and T. Yamagata, 2004: Individual and combined influences of ENSO and Indian Ocean Dipole on the Indian summer monsoon. *Journal of Climate*, **17**, 3141–3155.
- Barnston, A., and R. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, **115**, 1083–1126.
- Baxter, S., and S. Nigam, 2015: Key Role of the North Pacific Oscillation–West Pacific Pattern in Generating the Extreme 2013/14 North American Winter. *Journal of Climate*, **28**, 8109–8117.
- Behera, S. K., J. J. Luo, S. Masson, P. Delecluse, S. Gualdi, and A. Navarra, 2005: Paramount impact of the Indian Ocean dipole on the east African short rains: a CGCM study. *Journal of Climate*, **18**, 4514–4530.
- Behera, S. K., J. J. Luo, S. Masson, S. A. Rao, H. Sakuma, and T. Yamagata, 2006: A CGCM Study on the Interaction between IOD and ENSO. *Journal of Climate*, **19**, 1688–1705.
- Bellenger, H., E. Guilyardi, J. Leloup, M. Lengaigne, and J. Vialard, 2013: ENSO

- representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, **42**, 1999–2018.
- Cai, W., P. van Rensch, T. Cowan, and H. H. Hendon, 2011a: Teleconnection Pathways of ENSO and the IOD and the Mechanisms for Impacts on Australian Rainfall. *Journal of Climate*, **24**, 3910–3923.
- Cai, W., A. Sullivan, and T. Cowan, 2011b: Interactions of ENSO, the IOD, and the SAM in CMIP3 Models. *Journal of Climate*, **24**, 1688–1704.
- Cai, W and Coauthors, 2015: ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, **5**, 849–859.
- Cellitti, M. P., J. E. Walsh, R. M. Rauber, and D. H. Portis, 2006: Extreme cold air outbreaks over the United States, the polar vortex, and the large-scale circulation. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D02114.
- Cohen, J., and Coauthors, 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, **7**, 627–637.
- Guilyardi, E., and Coauthors, 2009: Understanding El Niño in Ocean-Atmosphere General Circulation Models: Progress and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**, 325–340.
- Ham, S., A-Y. Lim, S. Kang, H. Jeong, and Y. Jeong, 2018: A newly developed APCC SCoPS and its prediction of East Asia seasonal climate variability. *Climate Dynamics*, In Print.
- Hoerling, M.P., A. Kumar, and M. Zhong, 1997: El Niño, La Niña, and the Nonlinearity of Their Teleconnections. *Journal of Climate*, **10**, 1769–1786,
- Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1982: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, **109**, 813–829.
- Hsu, H.-H., and J. M. Wallace, 1985: Vertical Structure of Wintertime Teleconnection Patterns. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **42**, 1693–1710.
- Ineson, S., and A. Scaife, 2009: The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño. *Nature Geoscience*, **2**, 32–36.
- Iizuka, S., Matsuura, T. and Yamagata, T., 2000: The Indian Ocean SST dipole simulated in a coupled general circulation model. *Geophysical Research Letters*, **27**(20), pp.3369–3372.
- Izumo, T., and Coauthors, 2010: Influence of the state of the Indian Ocean Dipole on the following year's El Niño. *Nature Geoscience*, **3**, 168.
- Jia, L., and Coauthors, 2015: Improved Seasonal Prediction of Temperature and Precipitation

- over Land in a High-Resolution GFDL Climate Model. *Journal of Climate*, **28**, 2044-2062.
- Jun, S.-Y., C.-H. Hui, B.-M. Kim, and J.-H. Jeong, 2014: Sensitivity of Arctic warming to sea surface temperature distribution over melted sea-ice region in atmospheric general circulation model experiments. *Climate Dynamics*, **42**, 941-955.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., & Potter, G. L. (2002). Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83(11)**, 1631-1644.
- Kenyon, J., and G. C. Hegerl, 2010: Influence of Modes of Climate Variability on Global Precipitation Extremes. *Journal of Climate*, **23**, 6248-6262.
- Kim, H.-M., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2012: Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere Winter. *Climate Dynamics*, **39**, 2957-2973.
- Klein, S. A., B. J. Soden, and N.-C. Lau, 1999: Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate*, **12**, 917-932.
- 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. *Nature Geoscience*, **8**, 759-762.
- Leathers, D. J., B. Yarnal, and M. A. Palecki, 1991: The Pacific/North American Teleconnection Pattern and United States Climate. Part I: Regional Temperature and Precipitation Associations. *Journal of Climate*, **4**, 517-528.
- Lee, Y.-Y., and R. X. Black, 2013: Boreal winter low-frequency variability in CMIP5 models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 6891-6904.
- Li, T., Wang, B., Chang, C.P. and Zhang, Y., 2003: A theory for the Indian Ocean dipole-zonal mode. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60(17)**, pp.2119-2135.
- Lim, E. P., H. H. Hendon, S. Langford and O. Alves, 2012: Improvements in POAMA2 for the prediction of major climate drivers and south eastern Australian rainfall. CAWCR Tech. Rep., No. 051, <http://www.cawcr.gov.au/publications/technicalreports.php>.
- Lin, H., and J. Derome, 2004: Nonlinearity of the Extratropical Response to Tropical Forcing. *Journal of Climate*, **17**, 2597-2608.
- Linkin, M. E., and S. Nigam, 2008: The North Pacific Oscillation-West Pacific Teleconnection

- Pattern: Mature-Phase Structure and Winter Impacts. *Journal of Climate*, **21**, 1979–1997.
- Liou, C. S., J. H. Chen, C. T. Terng, F. J. Wang, C. T. Fong, T. E. Rosmond, H. C. Kuo, C. H. Shiao, and M. D. Cheng (1997), The second generation global forecast system at the central weather bureau in Taiwan, *Weather Forecasting*, **12**, 653–663, doi:10.1175/1520-0434-12.3.653.
- Luo, J.-J., S. Masson, E. Roeckner, G. Madec, and T. Yamagata, 2005: Reducing Climatology Bias in an Ocean-Atmosphere CGCM with Improved Coupling Physics. *Journal of Climate*, **18**, 2344–2360.
- McPhaden, M. J., 1999: Genesis and Evolution of the 1997–98 El Niño. *Science*, **283**, 950–954.
- McPhaden, M. J., S. E. Zebiak, and M. H. Glantz, 2006: ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, **314**, 1740–1745.
- Merryfield, W. J., and Coauthors, 2013: The Canadian seasonal to interannual prediction system. Part I: Models and initialization. *Monthly Weather Review*, **141**, 2910–2945. doi:10.1175/MWR-D-12-00216.1.
- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, S. M. Oh, and H.-J. 2017: Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015. *Climate Dynamics*, **49**, 4141–4156.
- Mo, K. C., and R. E. Livezey, 1986: Tropical-Extratropical Geopotential Height Teleconnections during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, **114**, 2488–2515.
- Molod, A. et al., 2012: The GEOS-5 atmospheric general circulation model: mean climate and development from MERRA to Fortuna. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, 28. <http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/tm28.pdf>.
- Notaro, M., W.-C. Wang, and W. Gong, 2006: Model and Observational Analysis of the Northeast U.S. Regional Climate and Its Relationship to the PNA and NAO Patterns during Early Winter. *Monthly Weather Review*, **134**, 3479–3505.
- Peng, P., A. Kumar, and W. Wang, 2011: An analysis of seasonal predictability in coupled model forecasts. *Climate Dynamics*, **36**, 637–648.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, **20**, 5473–5496.

- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, Wang J, Wang W, Zhang Q, Van den Dool HM, Pan HL, Moorthi S, Behringer D, Stokes D, Pena M, Lord S, White G, Ebisuzaki W, Peng P, Xie P (2006) The NCEP climate forecast system. *Journal of Climate*, **19**, 3483-3517
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360-363.
- Saji, N.H., Xie, S.P. and Yamagata, T., 2006. Tropical Indian Ocean variability in the IPCC twentieth-century climate simulations. *Journal of Climate*, **19(17)**, 4397-4417.
- Saji, N., and T. Yamagata, 2003: Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate. *Climate Research*, **25**, 151-169
- Scaife, A. A., C. K. Folland, L. V. Alexander, A. Moberg, and J. R. Knight, 2008: European Climate Extremes and the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, **21**, 72-83.
- Smith, D. M., A. A. Scaife, R. Eade, and J. R. Knight, 2014: Seasonal to decadal prediction of the winter North Atlantic Oscillation: emerging capability and future prospects. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**, 611-617.
- Smith, K. L., C. G. Fletcher, and P. J. Kushner, 2010: The role of linear interference in the annular mode response to extratropical surface forcing. *Journal of Climate*, **23**, 6036-6050.
- Sutton, R. T., S. P. Jewson, and D. P. Rowell, 2000: The elements of climate variability in the tropical Atlantic region. *Journal of Climate*, **13**, 3261-3284
- Thompson, D. W., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, **25**, 1297-1300.
- Wallace, J., and D. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, **109**, 784-812.
- Walsh, J. E., A. S. Phillips, D. H. Portis, and W. L. Chapman, 2001: Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948-99. *Journal of climate*, **14**, 2642-2658.
- Wang H., R. Murtugudde, and A. Kumar, 2016: Evolution of Indian Ocean dipole and its forcing mechanisms in the absence of ENSO. *Climate Dynamics*, **47**, 2481-2500.
- Watterson, I. G., 2015: Improved Simulation of Regional Climate by Global Models with Higher Resolution: Skill Scores Correlated with Grid Length*. *Journal of Climate*, **28**, 5985-6000.
- Webster, P.J., Moore, A.M., Loschnigg, J.P. and Leben, R.R., 1999: Coupled ocean-

- atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, *401*(6751), p.356.
- Westby, R. M., Y.-Y. Lee, and R. X. Black, 2013: Anomalous Temperature Regimes during the Cool Season: Long-term Trends, Low Frequency Mode Modulation and Representation in CMIP5 Simulations. *Journal of Climate*, **26**, 9061-9076.
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean Capacitor Effect on Indo-Western Pacific Climate during the Summer following El Niño. *Journal of Climate*, **22**, 730-747.

【연구자】

김선태 선임연구원

이윤영 선임연구원

오지현 선임연구원

임아영 연구원

연구보고서 2018-02

**APCC MME 계절 예측 자료 특성 분석:
기후변동모드, 영향, 그리고 다중 모형 비교**

I S B N 979-11-5698-234-0

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

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.