

PNU CGCM V1.1을 이용한 12개월 앙상블 예측 시스템의 개발

안중배^{1),*} · 이수봉¹⁾ · 류상범²⁾

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부

²⁾국립기상연구소 지구환경시스템연구과

(접수: 2012년 10월 6일, 수정: 2012년 11월 15일, 게재확정일: 2012년 11월 20일)

Development of 12-month Ensemble Prediction System Using PNU CGCM V1.1

Joong-Bae Ahn^{1),*}, Su-Bong Lee¹⁾, and Sang-Boom Ryoo²⁾

¹⁾Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾Global Environment System Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

(Received: 6 October 2012, Revised: 15 November 2012, Accepted: 20 November 2012)

Abstracts This study investigates a 12 month-lead predictability of PNU Coupled General Circulation Model (CGCM) V1.1 hindcast, for which an oceanic data assimilated initialization is used to generate ocean initial condition. The CGCM, a participant model of APEC Climate Center (APCC) long-lead multi-model ensemble system, has been initialized at each and every month and performed 12-month-lead hindcast for each month during 1980 to 2011. The 12-month-lead hindcast consisted of 2-5 ensembles and this study verified the ensemble averaged hindcast. As for the sea-surface temperature concerns, it remained high level of confidence especially over the tropical Pacific and the mid-latitude central Pacific with slight declining of temporal correlation coefficients (TCC) as lead month increased. The CGCM revealed trustworthy ENSO prediction skills in most of hindcasts, in particular. For atmospheric variables, like air temperature, precipitation, and geopotential height at 500hPa, reliable prediction results have been shown during entire lead time in most of domain, particularly over the equatorial region. Though the TCCs of hindcasted precipitation are lower than other variables, a skillful precipitation forecasts is also shown over highly variable regions such as ITCZ. This study also revealed that there are seasonal and regional dependencies on predictability for each variable and lead.

Key words: CGCM, ocean data assimilation, seasonal forecasting, ensemble prediction, ENSO

1. 서 론

물리 법칙을 기반으로 구성된 대기-해양 접합대순환모형 (Coupled General Circulation Model, CGCM) 들은 과거의 기후변화와 최근에 관측된 기후변화의 특징들을 비교적 잘 재현한다. 그러나 CGCM을 이용

한 예측은 여러 가지 불확실성과 관련한 문제들로 인하여 완벽한 예측성을 기대하기 어렵다. 예를 들어 대기 대순환 모형이나 해양 대순환 모형의 경우 주어진 경계조건을 이용하기 때문에 상대적으로 관측과 큰 차이를 보이지 않는 결과를 생산하기도 하나 CGCM은 주어진 초기 조건으로부터 시작하여 성분 모형의 예측 결과가 다른 성분 모형의 경계조건이 되기 때문에, CGCM이 생산하는 기후가 실제의 기후와 다른 방향으로 전개될 가능성이 있다. 또한 관측자료에 포함된 불완전성과 불확실성 역시 예측성을 저해하는 요소이다. 앞서 언급한 바와 같이, CGCM은 전적으

*Corresponding Author: Prof. Joong-Bae Ahn, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, Rep. of Korea.

Phone : +82-51-510-2290, Fax : +82-51-515-1689

E-mail : jbahn@pusan.ac.kr

로 초기 조건에 의존하기 때문에 정확한 예측을 위해서는 관측을 이용하여 정확한 초기 조건을 입력해주어야 한다. 그러나 관측이 완벽하다 하더라도 관측으로 만들어진 초기 조건과 모형의 역학적 균형이 일치하지 않는다면 심한 초기 불균형을 모형이 겪게 된다. 따라서 모형의 역학적 균형과도 어울리면서 동시에 관측과도 유사한 초기 조건을 만드는 것은 매우 중요하다. 자료동화 기술이나 앙상블 산출방식 등은 모형의 초기 조건에 따른 예측성 향상에 대안이 될 수 있다 (IPCC, 2007).

예측성의 향상을 위한 자료동화의 활용에 대하여 많은 연구기관에서 활발하게 연구되어지고 있다. 특히 해양의 열용량은 해양 상층 4 m의 열용량이 대기 전체의 열용량에 상응하는 만큼 크고 그 열적 관성 또한 크기 때문에 자료동화의 효과가 상당기간 지속된다. 유럽의 ECMWF (Balmaseda *et al.*, 2007), 호주의 POAMA (Yin *et al.*, 2011) 등은 OI (Optimum Interpolation)나 칼만 필터를 기반으로 한 자체 초기장 생산 체계를 이용하고, 미국의 NCEP (Ji *et al.*, 1995), 영국의 Met Office (Mogensen *et al.*, 2012), 일본의 JMA (Usui *et al.*, 2006) 등은 변분자료동화방법 (Variational method)을 이용하여 초기장을 생산하여 현업에 사용하고 있다. 또한 Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE) 프로젝트와 NOAA/CDEP Ocean Data Assimilation for Seasonal to-Interannual Prediction (ODASI) 컨소시엄 등 세계의 여러 기관들이 자료동화에 대한 협력체를 구성하여 해양자료 동화에 대한 개발뿐만 아니라 자료동화를 통한 분석장을 활용한 계절예보, 장기예보의 정확도를 높이기 위한 연구를 진행하고 있다. 국내에서는 해양자료 동화를 초기장 생성에 접목한 전지구 규모 모형인 PNU (Pusan National University) CGCM이 개발되어 12개월 Lead의 앙상블 장기예측자료를 정기적으로 생산하고 있다 (안중배와 이혜진, 2000; 안중배와 이진아, 2001; 안중배 등, 2005; 정혜인과 안중배, 2007; Sun and Ahn, 2011).

본 연구에서는 APEC Climate Center (APCC)의 monthly multi-model ensemble (MME) 3-month forecast의 참여 모형인 PNU CGCM V1.1의 앙상블 예측 시스템을 소개하였다. 초기 조건에 포함된 모형의 불확실성을 줄이고자 PNU CGCM V1.1 시스템은 최대 5개의 앙상블 멤버를 구성하고 있으며 해양자료 동화를 적용하고 있다. 본 연구에서는 또한 생산된 12개월 Lead 예측자료의 전지구 예측성에 대하여 살펴보았다. 이를 위하여 PNU CGCM V1.1의 예측시스템에서 생산된 변수들 중 직접 동화된 SST와 기온과 강수, 500 hPa 지위고도 등에 대해서 잠재 예측성, 시간·공간 상관계수와 Hit Rate 등을 사용하여 전지구 예측성을 검증하였다.

2. PNU CGCM V1.1 12개월 앙상블 예측 시스템의 구성

2.1. 성분모형의 구성

본 연구에 사용된 모형은 대기-지면-해양-해빙 모형으로 구성된 Pusan National University (PNU) CGCM이다. 각각의 성분 모형으로 NCEP Community Climate Model version 3 (CCM3 T42, Kiehl *et al.*, 1996) AGCM, GFDL Modular Ocean Model version 3 (MOM3, Pacanowski and Griffies, 1998) OGCM, Semtner-type 열역학 부분 (Semtner, 1976)과 Los Alamos National Laboratory (LANL)의 Elastic-Viscous-Plastic (EVP) 역학과 수송부분이 결합된 Sea-Ice Model (Hunke and Dukowicz, 1997)로 각각 구성되어 있다.

CCM3 T42는 동서방향으로 2.8125°의 해상도를 가지며 연직 18층으로 구성되어 있고, MOM3는 CCM3와 동서방향 수평해상도가 동일하고, 남북방향으로 ENSO 관련 해양 역학에서 중요한 역할을 하는 적도에 간헐 해양의 파동들을 분해하기 위하여 적도에서 조밀 격자인 가변격자이며, 연직 40층으로 구성되어 있다. PNU CGCM의 해상도 및 CGCM에 사용된 물리과정을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에 사용된 PNU CGCM V1.1의 hindcast에서는 기후표류를 막기 위한 속도정을 하지 않았다.

2.2. 초기 조건의 생산

CGCM의 초기조건을 생산하기 위하여 각 성분모형의 재현실험을 분석기간에 대하여 수행하였다. 특히 해양에 대하여서는 MOM3가 생산한 재현실험자료와 관측자료를 이용하여 자료동화 방안을 통하여 초기조건을 생산하였다. 자료동화 방안으로는 변분법의 하나인 필터를 이용한 변분법 (Variational Analysis using a Filter, VAF)을 택하였다 (Huang, 2000; 안중배 등, 2005). 변분법은 모델과 관측 사이의 비용함수를 고려하여 총 비용함수가 최저가 되는 지점인 최적해를 찾는 방안이다. VAF는 그 중에서도 변분법을 수행할 때 발생하는 계산량 문제를 해결하기 위하여 공간필터를 적용한 방법이다. 자료동화는 해양 초기 조건을 생산하는 단계에서 적용되며 모형 적분 중간에는 사용되지 않는다.

자료동화의 배경장 (Background field)으로는 해양 성분모형 (MOM3)의 재현실험으로부터 생산된 해양 변수들 중 해수온과 염분을 사용하였으며, 관측자료로는 전지구적으로 분포하는 ARGO, TAO (Tropical Atmosphere-Ocean) 부표, XBT (eXpensible BathyThermographs) 등의 해수온과 염분을 사용하였다. 현재 ARGO, TAO 부표, XBT 등을 이용한 전구 해양 관측이 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서도 ARGO 플

Table 1. Component models, resolutions, and physics of the PNU CGCM.

Component model	Atmosphere	Community Climate Model (CCM3, Kiehl <i>et al.</i> 1996)	
	Land	Land Surface Model (LSM, Bonan 1998)	
	Ocean	Modular Ocean Model (MOM3, Pacanowski and Griffies 1998)	
	Sea-Ice	Elastic-Viscous-Plastic Model (EVP, Hunke and Dukowicz 1997)	
Resolution	Horizontal	Atmosphere	Spectral truncation T42
		Land	
		Ocean	2.8125-degree longitude, ~0.7 (low lat.), ~1.4 (mid lat) and ~2.8 (high lat) degrees latitude
	Vertical	Sea-ice	
		Atmosphere	18 hybrid sigma-pressure levels (top : 2.917mb)
		Land	6 levels
Physics	Moist processes	Deep convection	Zhang and McFarlane (1995)
		Shallow convection	Hack (1994)
	Radiation	Short wave	Considered in scattering and absorption by delta-Eddington method (Briegleb, 1992)
		Long wave	Observed in broad-band method
	PBL	Boundary layer diffusion	Nonlocal scheme (Holtslag and Boville, 1993)
Land-surface		Prognostic hydrology scheme	

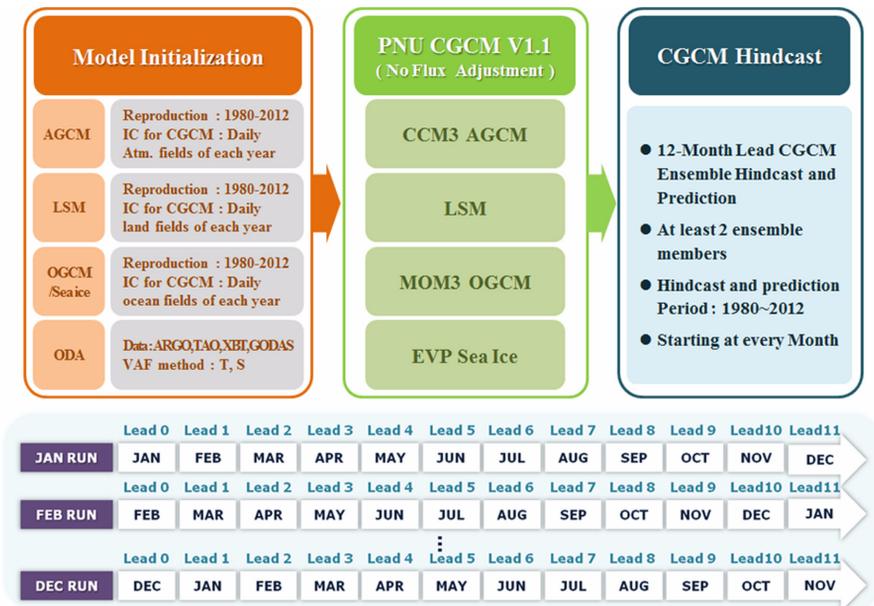


Fig. 1. Prediction System of the PNU CGCM V1.1 (Upper) and naming rule for individual run (Lower).

로트는 평균 10일 정도의 주기로 잠수, 표류, 부상, 관측, 자료전송 등을 반복하면서 해류를 따라 중·심해

를 떠다니며 해양의 물성을 자동 관측하는 무인 관측 장비이다 (Carval, 2002). 이는 세계기상기구 (WMO)

와 국가 간 해양과학위원회 (IOC)에 의해 2000년에 투하되기 시작하였으며 현재는 전 세계적으로 약 3500여 개 (2012년 04월 현재) 정도가 떠 있다. 동화에 사용되는 해양자료들의 연직·수평적 해상도의 균질성을 보장하기 위하여 Global Ocean Data Assimilation System (GODAS)의 해수온과 염분자료도 함께 사용하였다. 초기 조건의 생산에 대한 개요를 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. 12개월 앙상블 예측 실험 설계 및 자료의 생산

본 연구에서는 앞 절에 소개한 PNU CGCM을 사용하여 전구 예측자료를 생산하고, CGCM의 예측성을 검증하였다. PNU CGCM은 매월 초기화하여 12개월의 Lead로 적분을 수행하며, 1980년부터 2012년 최근까지 지속적으로 매시간평균 (hourly) 자료를 생산하고 있다. 매월 출발하는 12개월 Lead의 PNU CGCM V1.1 적분자료를 초기화 시기에 따라 1월에 출발하는 적분을 JAN RUN, 2월에 출발하는 적분을 FEB RUN 등으로 명명하였다. Fig. 1에 각 적분의 명명과 Lead에 대해 나타내었다. 각 RUN은 시간지연 방법을 사용하여 앙상블 멤버를 구성하였으며, 각 계절 예측을 목표로 하는 적분인 JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN은 5개 이상의 멤버로, 그 외에는 2개 이상의 멤버로 구성되어 있다. 본 연구에서는 주로 JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN에 대하여 1980년부터 2011년까지의 월평균 앙상블자료를 사용하여 예측성을 평가하였다.

3. PNU CGCM V1.1의 예측성 평가

3.1. 전지구 12개월 SST 예측성 평가

먼저 직접적으로 동화된 변수인 SST의 예측성을 살펴 보았다. Fig. 2는 PNU CGCM V1.1의 전지구 SST 예측을 APCC 다중모형앙상블 (Multi Model Ensemble, 이하 MME) 예측에 참여하는 다른 CGCM들의 전지구 SST 예측과 함께 나타낸 테일러 다이어그램이다. PNU CGCM V1.0과 PNU CGCM V1.1은 동일한 PNU CGCM을 사용하나, PNU CGCM V1.1은 앞서 언급한 바와 같이 해양초기화 과정에서 자료동화를 사용한 예측이며 PNU CGCM V1.0은 PNU CGCM V1.1과 동일한 모형으로 예측자료를 생산하나 자료동화가 초기화 과정에 포함되지 않은 예측이다. APCC의 MME 예측에 참여하는 CGCM들 중 초기화 과정에 자료동화가 포함된 CGCM들의 SST 예측을 MME하여 APCC CGCM MME1으로, 그렇지 않은 CGCM들의 SST 예측의 MME를 APCC CGCM MME2로 나타내었다. 봄 계절 예측부터 겨울 계절 예측까지 각각 1년부터 4번으로 나타내었다.

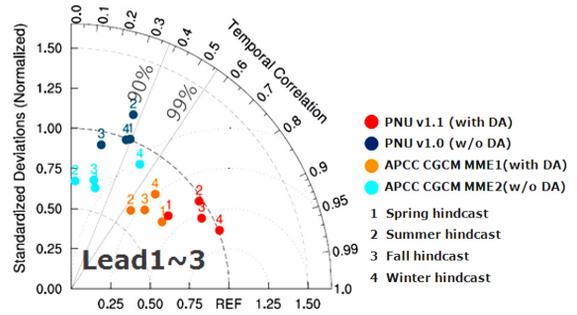


Fig. 2. Taylor diagram of global SST for PNU CGCM V1.1 (red), PNU CGCM V1.0 (blue), APCC CGCM MME1 (orange) and APCC CGCM MME2 (sky blue). The labels over the markers denote target seasons (see legends).

Fig. 2에서 볼 수 있듯, 16개의 모형별, 계절별 테일러 다이어그램 상의 각 점들은 각 모형별로 (PNU CGCM V1.0, PNU CGCM V1.1, APCC CGCM MME1, APCC CGCM MME2)로 군집되어 있다. 이는 계절별 예측 특성보다는 각 개별 모형의 예측성이 SST 예측성에 더 큰 영향을 미친다고 해석할 수 있다. 또한 각 점들은 신뢰수준 99%를 기준으로 자료동화를 적용한 CGCM들 (PNU CGCM V1.1과 APCC CGCM MME1)과 그렇지 않은 CGCM들로 나뉜다. 그림에서 자료동화를 적용한 CGCM들의 시간상관계수가 그렇지 않은 CGCM들보다 높음을 확인할 수 있다. 덧붙여 관측의 표준편차를 나타내는 REF line을 기준으로 하여 APCC CGCM MME (APCC CGCM MME1, APCC CGCM MME2)와 PNU CGCM (PNU CGCM V1.0, PNU CGCM V1.1)로 나뉜다. APCC CGCM들은 관측보다 SST의 변동을 다소 약하게 모의하는 경향이 있으나, PNU CGCM V1.0과 PNU CGCM V1.1은 관측과 유사한 크기로 변동을 모사하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 PNU CGCM V1.1은 다른 CGCM들과 비교하여 계절 시간 규모에 대하여 전지구 SST 예측성이 높음을 확인하였다.

PNU CGCM V1.1의 12개월 Lead에 대한 SST의 예측성을 살펴보기 위하여 계절별 전지구 SST 시간상관계수를 Fig. 3에 나타내었다. JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN의 동일 Lead 평균에 대한 (Lead 0~1, Lead 2~4, Lead 5~7, Lead 8~10) 시간상관계수를 평균하여 나타내었다. 실선과 점선은 각각 신뢰수준 90%와 99%의 경계를 나타낸다. 계절 예측에 사용되는 Lead 2~4의 SST에 대한 상관계수의 전지구 평균은 0.36으로 적도태평양을 비롯하여 중위도 대부분의 지역에서 신뢰수준 99% 이상의 높은 값을 나타낸다. Lead가 길어질수록 각 영역별 시간상관계수는

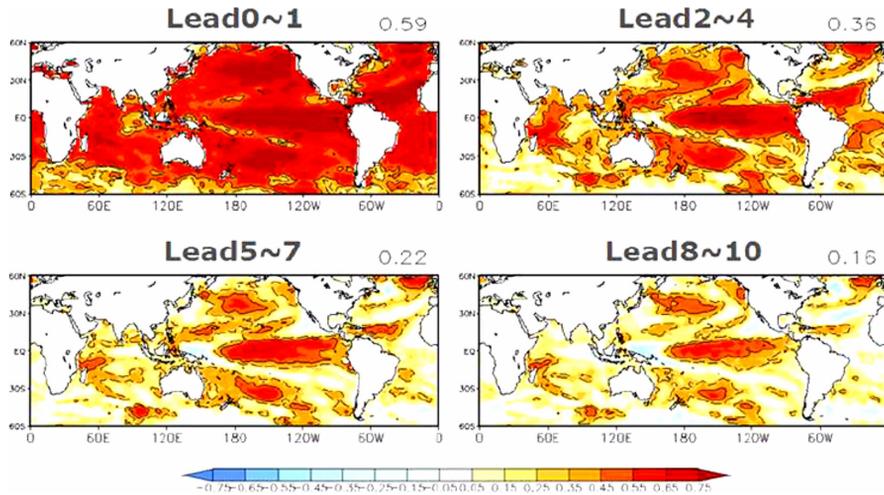


Fig. 3. Temporal correlation coefficients (TCC) for hindcasted SSTs. TCCs of JAN RUN, APR RUN, JUL RUN and OCT RUN are averaged at the same lead-time (Lead 0~1, Lead 2~4, Lead 5~7 and Lead 8~10). The solid and dashed contours represent statistical significance of the correlation coefficients at 90% and 99% confidence level, respectively. The value of upper-right corner above each plot indicates the areal mean of global TCC.

감소함에도 불구하고, PNU CGCM V1.1은 Lead 8~10 까지도 적도 중앙태평양과 동태평양, 중위도의 중앙태평양 영역(약 25°N~40°N), 중위도 남태평양 등에서 지속적으로 유의한 상관계수를 나타낸다. 이를 통하여 PNU CGCM V1.1을 이용하여 적도태평양지역의 현상을 5개월 이상 장기 예측할 경우 신뢰도 높은 예측이 가능함을 알 수 있다.

PNU CGCM V1.1의 적도 예측성 중 ENSO 예측성을 자세히 살펴보기 위하여 분석기간의 JAN RUN부터 DEC RUN까지 12개월 Lead에 대하여 NINO3.4

영역평균 SST 아노말리의 상관계수를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 가로축은 12개월의 Lead를, 세로축은 매월 출발하는 RUN을 나타낸다. 신뢰수준 99%와 95%의 상관계수는 각각 0.46과 0.36으로 파선과 점선으로 나타내었으며 대부분의 출발과 Lead에서 신뢰수준 95%가 넘는 높은 상관계수를 보인다.

각 RUN마다 NINO3.4 영역에 대한 예측성은 계절적 차이가 있다. 12개의 RUN 중 OCT RUN에서 Lead 초반부의 상관계수가 가장 크게 나타났으며 APR RUN부터 JUN RUN에서는 Lead 초반부의 상관계수가 작다. 7월부터 10월까지 (JUL RUN부터 OCT RUN)는 엘니뇨·라니냐의 방향성이 어느 정도 정해진 상태이고, 4월부터 6월까지 (APR RUN부터 JUN RUN)는 엘니뇨·라니냐의 부호가 명확하지 않은 상태를 고려하면 각 RUN의 ENSO 예측성은 초기조건에 포함된 엘니뇨·라니냐의 정보와 관련이 있는 것으로 분석된다.

DEC RUN의 경우 Lead 중반부 (Lead 4부터 Lead 7, 4월부터 7월)에 상관계수가 급격히 감소하다가 Lead 후반부에 다시 증가하는 형태를 보인다. Fig. 4의 흰색 점선은 4월과 7월의 경계를 나타내었다. DEC RUN 외에도 4월부터 7월 기간에는 상관계수가 대체로 감소하고 이 기간이 지나면 상관계수가 일정하게 유지되거나 오히려 증가하는 경우도 있어 NINO3.4 영역에 대한 PNU CGCM V1.1의 SST 아노말리 예측성은 계절에 좌우되는 것으로 보인다. 이로써 PNU CGCM V1.1은 엘니뇨·라니냐의 변동에 대하여 12

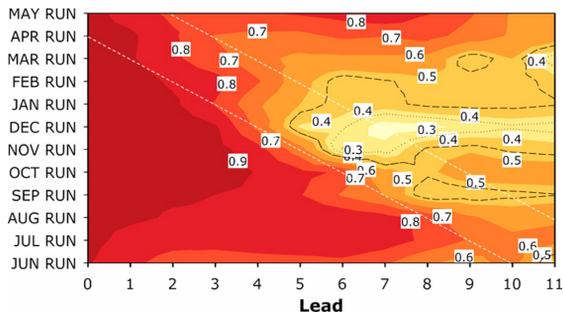


Fig. 4. TCC for Nino3.4 SST anomalies between PNU CGCM V1.1 hindcast and observation as a function of lead-time and RUNs. The solid and dashed contours represent statistical significance of the correlation coefficients at 90% and 99% confidence level, respectively. White dotted lines are boundaries of April and July.

개월의 예측기간 동안 높은 신뢰수준의 예측자료의 제공이 가능함을 확인하였다.

3.2. 전지구 대기변수의 예측성 평가

PNU CGCM V1.1은 계절 예측을 목표로 하는 JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN에 대하여 각각 5개 이상의 앙상블 멤버를 보유하고 있다. 여러 개의 앙상블 멤버 사용이 PNU CGCM V1.1의 예측성에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 기온, 강수, 500 hPa 지위고도의 잠재 예측성 (potential predictability)을 Fig. 5에 나타내었다. 각 RUN의 Lead 2~4에 대한 잠재 예측성 패턴을 나타내었으며, 우측 상단의 숫자는 잠재 예측성의 전지구 영역평균이다. 잠재 예측성은 전체 변동성 중 초기조건과 모델이 만들어내는 변동성으로 설명되는 비율, 즉 시그널의 비율이다.

$$PP = \frac{\sigma_{Ext}^2}{\sigma_{Tot}^2}$$

$$\sigma_{Ext}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ((X_j) - \bar{X})^2$$

$$\sigma_{Tot}^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij} - \bar{X})^2$$

$$\langle X \rangle_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_{ij}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij}$$

여기서 M 은 앙상블 크기, N 은 분석기간이다. Fig. 5에 따르면 적도 해양 및 중위도 해양의 기온 변동성 중 80% 이상이 앙상블 멤버 간의 변동에 의해 설명된다. 그 외의 대부분 지역에서도 30% 이상의 잠재 예측성이 나타났으며 전지구 평균 50~59%의 값을 보인다. PNU CGCM V1.1의 강수는 다른 두 변수보다 잠재 예측성이 상대적으로 낮으나 ITCZ 영역과 대부분의 적도 영역에서 예측 가능한 시그널이 전체 변동의 80% 이상으로 나타났다. 반대로 CGCM에서 비선형적으로 만들어내는 잡음은 전체 강수 변동의 20% 이하이다. 전지구 평균적으로 34~38%의 강수 잠재 예측성을 보인다. 500 hPa 지위고도는 적도에서의 잠재 예측성이 특히 높으며 중위도 해양에서도 높은 값을 보인다. 이 결과들을 종합하면 다양한 초기치를 사용하여 앙상블 예측을 할 경우 전지구적인 계절 예측성 향상의 가능성이 있다고 분석된다. 특히 PNU CGCM V1.1의 앙상블 예측은 초기조건에 민감한 적도 영역의 예측성에 큰 영향을 줄 수 있으며, 원격상관을 통

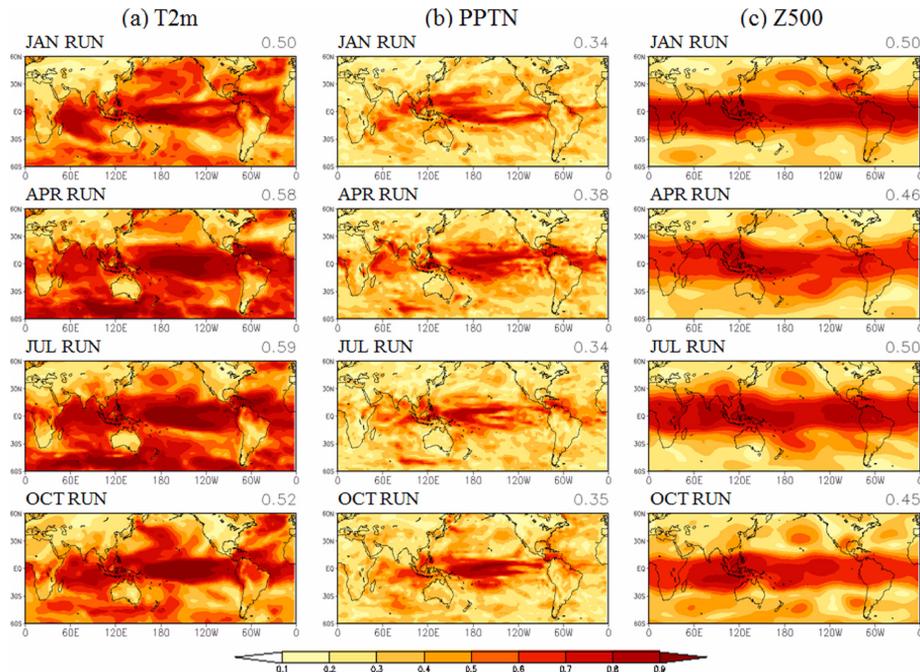


Fig. 5. Potential predictability for (a) 2 m temperature, (b) precipitation and (c) 500 hPa geopotential height of JAN RUN (top), APR RUN, JUL RUN and OCT RUN(bottom) at Lead 2~4. The value of upper-right corner above each plot indicates the areal mean of global potential predictability.

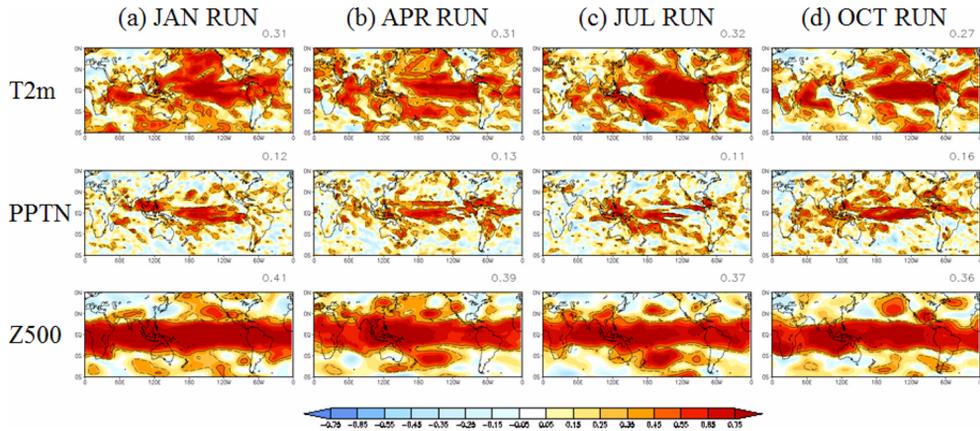


Fig. 6. TCC for 2 m temperature, precipitation and 500 hPa geopotential height of JAN RUN, APR RUN, JUL RUN and OCT RUN at Lead 2~4. The value of upper-right corner above each plot indicates the areal mean of global TCC.

하여 전지구적으로도 그 효과가 미칠 수 있다고 생각된다.

이러한 PNU CGCM V1.1의 JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN의 각 Lead 2~4 (MAM, JJA, SON, DJF)의 양상별 평균에 대하여 시간상관계수를 살펴보았다 (Fig. 6). 실선과 점선은 각각 신뢰수준 99%, 95%를 나타내는 경계이다. 기온, 강수, 500 hPa 지위고도는 Lead 2~4에 공통적으로 적도영역에서 매우 높은 상관을 보인다. 특히 기온의 경우 신뢰수준이 99% 이상의 상관관계가 중위도 이상에서도 나타나서 기온에 대한 전지구적인 예측성이 높음을 알 수 있다. 기온의 상관은 앞서 살펴본 SST의 상관과 거의 유사한 패턴을 보이는데, 이는 대기-해양 상호작용에 의해 SST가 기온과 직접적인 영향을 주고받기 때문이다. 강수는 다른 변수와 비교하여 상대적으로 상관계수가 작으나 ITCZ와 같은 변동성이 큰 영역에서 높은 상관을 보인다. 500 hPa 지위고도는 적도 외에도 중위도 해양에서 높은 상관을 보인다. 계절별로 약간의 차이는 있으나 PNU CGCM V1.1의 계절 예측성은 일관성 있게 나타난다. 한편 상관계수의 공간 패턴은 앞서 살펴 본 잠재 예측성과 매우 유사하다. 이로써 PNU CGCM V1.1의 양상별은 잠재 예측성을 높이며, 더 나아가 예측자료의 신뢰수준에까지 긍정적인 영향을 미친다고 분석된다.

Fig. 7은 전지구 영역에 대한 각 변수의 공간상관계수이다. JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN의 Lead 0부터 Lead 11에 대한 공간상관계수를 나타내었다. 기온과 500 hPa 지위고도는 전지구적인 패턴 예측성이 매우 높고, 강수는 계절에 따라 예측성이 다소 변동한다. 전지구 영역에 대하여 기온과 500 hPa 지위고도는 12개월 Lead 동안 0.99 이상의 높

은 공간상관계수를 지속적으로 나타낸다. 강수는 상대적으로 공간상관이 낮게 나타나 대체로 0.6~0.8의 범위를 가지며, 특정 계절 (4월부터 6월까지)에 대한 패턴 예측성은 다른 계절에 비해 다소 낮게 나타난다.

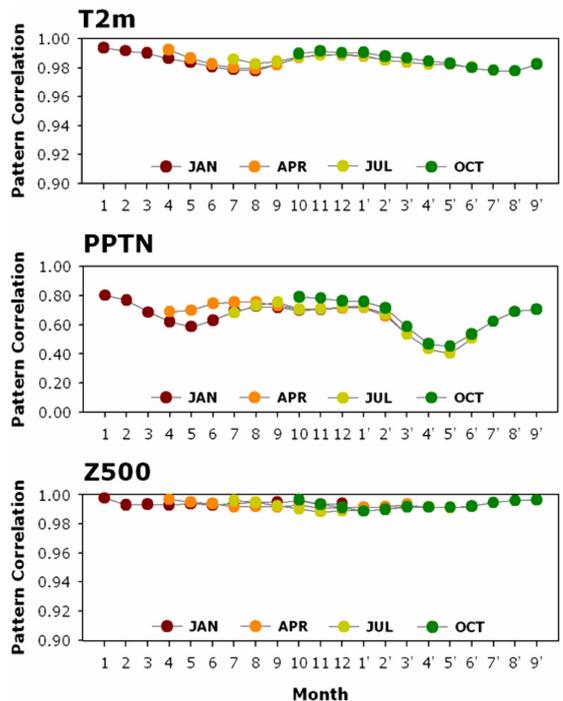


Fig. 7. Time series of pattern correlation for 2 m temperature, precipitation and 500 hPa geopotential height of JAN RUN, APR RUN, JUL RUN and OCT RUN with 12-month lead time.

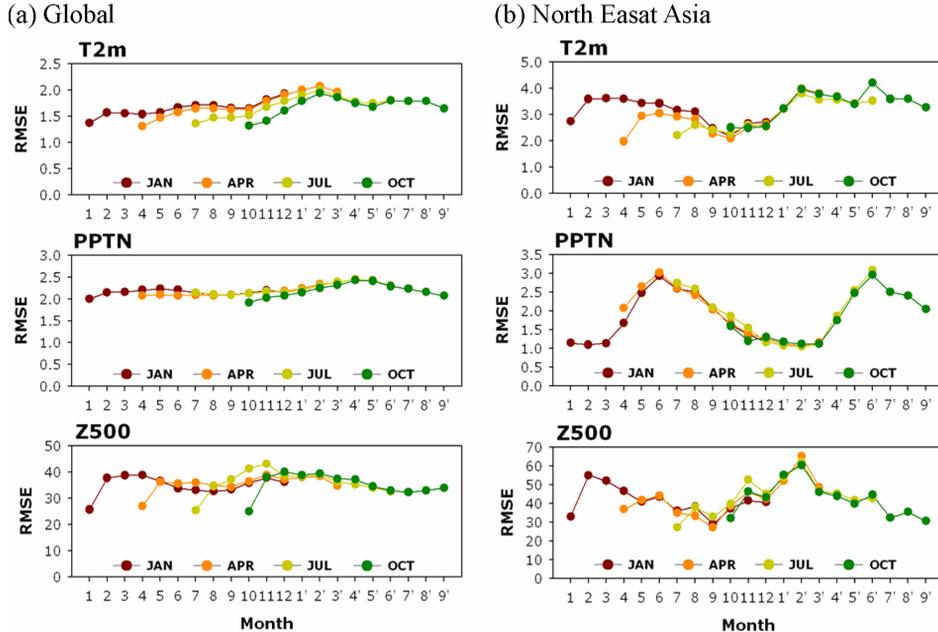


Fig. 8. RMSEs for 2 m temperature, precipitation and 500 hPa geopotential height over (a) the globe and (b) the northeast Asia of JAN RUN, APR RUN, JUL RUN and OCT RUN with 12-month lead.

강수에서 계절에 대한 예측성 차이가 두드러지게 나타났지만, 기온과 500 hPa 지위고도 역시 계절에 따라 예측성이 좋고 나쁨이 다를 수 있다.

각 Lead별 에러의 크기를 측정하기 위하여 Lead별 RMSE를 살펴보았다. Fig. 8은 전지구와 한반도를 포함한 동북아시아 영역 (위도 25°~55°N, 경도 110°~145°E)에 대한 기온, 강수, 500 hPa 지위고도에 대한 RMSE를 나타내었다. 전지구 기온은 1.3~2.0°C의 RMSE 범위를 나타내었으며, 다른 시기보다 2월에 상대적으로 높은 RMSE를 나타내었다. 동북아시아 영역에 대하여는 9월부터 12월의 RMSE가 약 2.0°C로 가장 작게 나타났으며 상대적으로 2월의 RMSE가 약 4.0°C로 크게 나타났다. 강수의 전지구 RMSE는 계절에 따른 편차가 크지 않아서 전지구 영역의 강수 RMSE 범위는 전체 Lead에 걸쳐 2.0~2.5 mm day⁻¹로 나타난다. 동북아시아 영역의 강수 RMSE는 10월부터 3월까지 약 1.0 mm day⁻¹로 매우 작은 값이 나타나고 6월에는 3.0 mm day⁻¹로 최대 RMSE 값이 나타난다. 500 hPa 지위고도의 경우, 전지구 영역에 대한 RMSE가 약 25 m인 Lead 0를 제외하면 30~40 m의 범위를 나타낸다. 동북아시아 영역에서는 계절에 따른 편차가 커서 7월부터 12월에 대한 RMSE는 약 30 m 정도로 작은 반면, 2월에 대한 RMSE는 약 60 m로 크게 나타난다.

PNU CGCM V1.1은 동북아시아 영역에 대하여 기온은 9월부터 1월까지, 강수는 10월부터 3월까지, 그

리고 500 hPa 지위고도는 7월부터 12월까지 좋은 예측성을 보인다. 반면 2월의 기온과 500 hPa 지위고도, 6월의 강수에 대해서는 상대적으로 예측성이 낮음을 확인하였다. 각 변수의 RMSE는 짧은 적분시간 (짧은 Lead)에 작은 값을 나타내는 특성을 보인다. 이와 더불어 각 변수별로 예측성이 좋은 계절과 그렇지 않은 계절이 특징적으로 나타나고 이 특성이 적분 Lead 보다 영향을 크게 미치는 것으로 보인다.

전지구 영역과 동북아시아 영역에 대하여 12개월의 Lead에 대한 Hit Rate를 살펴보았다 (Fig. 9). 여기서는 3분위 분류를 사용하여 관측과 모형의 분포를 각각 30%, 40%, 30%로 나누어서 평균 이하 (below normal), 평균 (normal), 평균 이상 (above normal)이라 이름하고, 각 경우 마다 관측에서 발생한 횟수와 모형이 예측한 횟수를 세어서 둘의 비로 구한 것이 Hit Rate이다. 이 값이 클수록 예측성이 뛰어나다 할 수 있다. 기온과 500 hPa 지위고도에 대하여 Lead 초반에 0.6에서 0.7 사이의 값을 보여주며 Lead가 길어질수록 점점 값이 작아지는 모습을 보인다. 강수의 경우 다른 변수들보다 예측성이 다소 낮게 나타나며 앞서 다른 검증도구들에서 살펴본 바와 같이 계절변동에 다소 영향을 받는 것으로 보인다. 전지구 영역평균과 동북아시아 영역평균의 변동폭이 다소 좁은 것도 낮은 스코어의 원인이다.

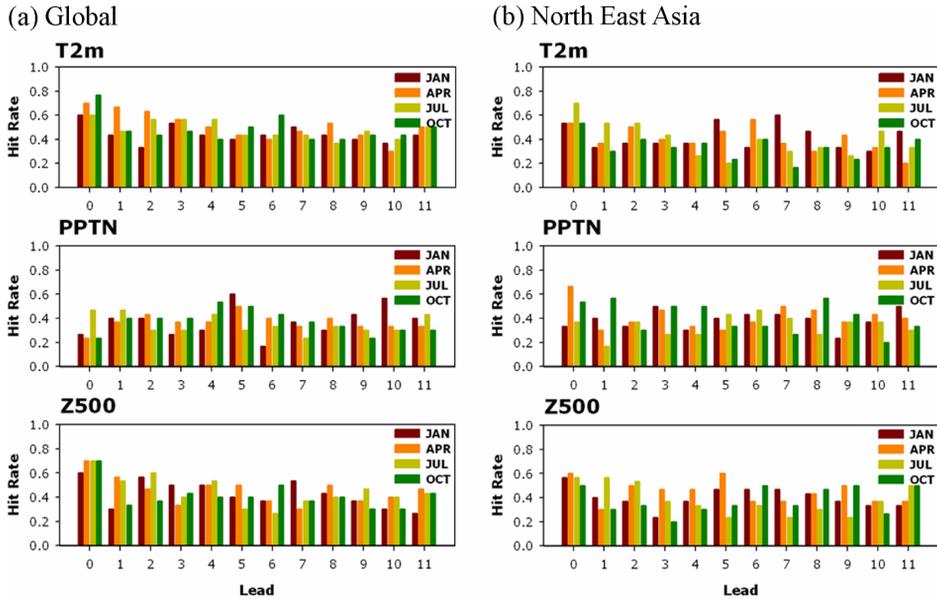


Fig. 9. Hit rates for 2 m temperature, precipitation and 500 hPa geopotential height over (a) the globe and (b) the northeast Asia of JAN RUN, APR RUN, JUL RUN and OCT RUN with 12-month lead.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 초기조건에 포함된 불확실성을 줄이기 위하여 해양초기조건에 자료동화를 적용하여 해양의 3차원적인 관측 정보를 모형 예측의 입력자료로 사용한 PNU CGCM V1.1의 12개월 예측성에 대하여 살펴보았다. 현재 이 모형의 앙상블 결과는 APCC의 3개월 장기 예측 앙상블 시스템을 위한 앙상블자료로 제공되고 있으며, 기상청 국립기상연구소에도 제공되고 있다.

PNU CGCM V1.1은 매월 초기화하여 출발하는 12개월의 Lead로 적분이 수행되며, 여기서는 1980년부터 2011년까지의 후보 (hindcast)자료를 분석하였다. 각 RUN은 계절 예측을 목표로 하는 RUN (JAN RUN, APR RUN, JUL RUN, OCT RUN)에 대하여 5개 이상의 멤버로 구성되어 있다. 본 연구에서는 PNU CGCM V1.1의 앙상블 평균을 사용하여 예측성을 검증하였다.

먼저 직접적으로 동화된 변수인 SST 예측성에 대하여 살펴보았다. PNU CGCM V1.1의 SST 예측은 APCC CGCM MME에 참석하는 모형들 중 자료동화가 포함된 모형들과 함께 높은 예측성을 보였다. 또한 12개월의 예측기간동안 SST 예측성은 크게 떨어지지 않고 특히 적도 태평양 및 중위도의 중앙태평양 영역에 대하여 신뢰도 높은 상관관계를 유지하였다. ENSO 예측에 있어서도 PNU CGCM V1.1은 12개월 출발

RUN 모두에서 12개월의 예측기간동안 높은 신뢰수준을 나타내었다.

PNU CGCM V1.1은 적도영역에서 기온과 강수, 500 hPa 지위고도에 대한 예측성이 전체 Lead에 걸쳐 높게 나타났다. 이와 더불어 기온과 500 hPa 지위고도는 중위도 해양 영역에서도 신뢰도 있는 예측성을 보였다. 강수는 다른 변수들보다 상대적으로 관측과의 상관성이 낮지만, ITCZ와 같이 변동성이 큰 영역에 대해서는 예측성이 좋다. 각 변수마다 분석한 영역별로 예측성이 좋은 계절과 그렇지 않은 계절이 나타난다. 동북아시아 영역에 대하여 기온은 9월부터 1월까지, 강수는 10월부터 3월까지, 그리고 500 hPa 지위고도는 7월부터 12월까지 예측성이 좋은 것으로 나타났다.

다양한 앙상블 멤버를 구성하고, 또한 해양자료 동화된 초기조건을 사용함으로써 예측성 향상을 도모한 PNU CGCM V1.1의 계절 시간 규모뿐 아니라 12개월 예측기간 전체에 대하여 예측의 신뢰도가 높음을 확인하였다. 해양-대기 상호작용이 고려되는 CGCM의 예측자료가 많지 않고, 더군다나 PNU CGCM V1.1은 시간평균 단위로 자료가 생산되기 때문에 다양한 시간·공간 규모의 현상들에 대하여 다방면으로 분석할 수 있어 활용 가치가 높을 수 있다. 향후 PNU CGCM V1.1의 예측자료를 활용한 다양한 분석이 활발히 이루어지면 장기 기상 및 기후에 관한 예측성 향상에 도움이 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주관의 “관측기술 지원 및 활용연구”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 안중배, 윤용훈, 조익현, 오혜람, 2005: VAF 변분법을 이용한 전구 해양자료 동화 연구. *한국해양학회지 바다*, **10**(1), 69-78.
- _____, 이해진, 2000: 중규모 해양모형을 이용한 한반도 주변해역 해양순환 재현. *한국해양학회지 바다*, **5**(3), 186-194.
- _____, 이진아 2001 : 해양대순환모형을 이용한 해빙의 역할에 관한 수치실험 연구. *한국해양학회지 바다*, **6**(4), 225-233.
- 정혜인, 안중배, 2007: PNU/CME CGCM을 이용한 엘니뇨/라니냐 장기 예측성 연구. *한국해양학회지 바다*, **12**(3), 170-177.
- Balmaseda, M. A., A. Vidard, and D. L. T. Anderson, 2007: The ECMWF System 3 Ocean Analysis System. ECMWF Technical Memorandum 408.
- Bonan, G. B., 1998: The land surface climatology of the NCAR Land Surface Model (LSM 1.0) coupled to the NCAR Community Climate Model (CCM3). *J. Climate*, **11**, 1307-1326.
- Briegleb, B. P., 1992: Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model. *J. Geophys. Res.*, **97**, 7603-7612.
- Carval, T., 2002: Argo data management: User's manual. Ifremer, 6-7 pp.
- Hack, J. J., 1994: Parameterization of moist convection in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (CCM2). *J. Geophys. Res.*, **99**, 5551-5568.
- Holtstag, A. A. M. and B. A. Boville, 1993: Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. *J. Climate*, **6**, 1825-1842.
- Huang, X. Y., 2000: Variational Analysis Using Spatial Filters. *Mon. Wea. Rev.*, **128**(7), 2588-2600.
- Hunke, E. C. and J. K. Dukowicz, 1997: An Elastic-Viscous-Plastic Model for Sea Ice Dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1849-1867.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis . Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ji, M., A. Leetmaa, and J. Derber, 1995: An ocean analysis system for seasonal to interannual climate studies. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 460-481.
- Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Briegleb, D. L. Williamson, and P. J. Rasch, 1996: Description of the NCAR Community Climate Model(CCM3). NCAR Tech. Note. NCAR/TN-420+STR, 152 pp.
- Mogensen, K., M. A. Balmaseda, and A. Weaver, 2012: The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. ECMWF Tech Memo 668.
- Pacanowski, R. C. and S. M. Griffies, 1998: MOM 3.0 Manual. NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA 08542.
- Semtner, A. J., Jr., 1976: A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 379-389.
- Sun, J. Q. and J. B. Ahn, 2011: A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**(5), 1049-1055.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi, 2006: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in Space Res.*, **37**, 806-822.
- Yin, Y., O. Alves, and P. R. Oke, 2011: An Ensemble Ocean Data Assimilation System for Seasonal Prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 786-808.
- Zhang, G. J. and N. A. McFarlane, 1995: Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model, *Atmosphere-Ocean.*, **33**, 407-446.