

기상청 전지구 예측시스템에서의 2019년 1월 북반구 중고위도 지역 예측성 검증

황재영¹⁾ · 조형오¹⁾ · 임유나²⁾ · 손석우^{1)*} · 김은정³⁾ · 임정욱³⁾ · 부경은³⁾

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾캘리포니아 대학교 어바인캠퍼스 지구시스템과학부,

³⁾기상청 수치모델링센터 수치모델개발과

(접수일: 2020년 2월 24일, 수정일: 2020년 4월 17일, 게재확정일: 2020년 5월 11일)

Extratropical Prediction Skill of KMA GDAPS in January 2019

Jaeyoung Hwang¹⁾, Hyeong-Oh Cho¹⁾, Yuna Lim²⁾, Seok-Woo Son^{1)*},
Eun-Jung Kim³⁾, Jeong-Ock Lim³⁾, and Kyung-On Boo³⁾

¹⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

²⁾Department of Earth System Science, University of California, Irvine, California, United States

³⁾Numerical Model Development Division, Numerical Modeling Center,
Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 24 February 2020; revised 17 April 2020; accepted 11 May 2020)

Abstract The Northern Hemisphere extratropical prediction skill of the Korea Meteorological Administration (KMA) Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS) is examined for January 2019. The real-time prediction skill, evaluated with mean squared skill score (MSSS) of 30-90°N geopotential height field at 500 hPa (Z500), is ~8 days in the troposphere. The MSSS of Z500 considerably decreases after 3 days mainly due to the increasing eddy errors. The eddy errors are largely explained by the eddy-phased errors with minor contribution of amplitude errors. In particular, planetary-scale eddy errors are considered as a main reason of rapidly increasing errors. It turns out that such errors are associated with the blocking highs over North Pacific (NP) and Euro-Atlantic (EA) regions. The model overestimates the blocking highs over NP and EA regions in time, showing dependence of blocking predictability on blocking initializations. This result suggests that the extratropical prediction skill could be improved by better representing blocking in the model.

Key words: Prediction skill, GDAPS, blocking

1. 서 론

대기의 카오스적 성질에 의해 모델의 오차는 예측 초기부터 급격하게 증가할 수 있으며, 이러한 특징 때문에 모델의 예측성은 유한할 수 밖에 없다(Lorenz, 1969). 모델의 예측한계는 변수에 따라 다소 차이가

있으나 일반적으로 짧게는 3일 이상에서 길게는 14일 이내인 것으로 보고되어 왔다(Miyakoda et al., 1972). 수치모델의 발달과 함께 예측오차의 원인을 탐구하거나 모델의 예측성능을 높이기 위한 많은 시도들이 이루어져 왔다. 모델의 오차를 개선하는 방향은 크게 1) 모델의 구조적 오차 또는 2) 확률론적 변동성(stochastic variability)에 의한 오차를 줄이거나, 3) 모델 내부의 역학을 개선하는 방법으로 정리 할 수 있다(Baumhefner, 1996).

모델의 구조적 오차와 확률론적 변동성에 의한 오차는 모델의 초기값 개선 및 모델 내부 역학을 개선

*Corresponding Author: Seok-Woo Son, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-8152, Fax: +82-2-880-4972
E-mail: seokwooson@snu.ac.kr

하는 방향을 통해서도 줄일 수 있지만 보다 기술적인 방법을 통해서도 해결할 수 있다. 모델의 초기값에 임의의 작은 변화를 주어 단일 모델의 다중 앙상블을 만듦으로써 확률론적 변동성에 의한 모델의 오차를 감소시킬 수 있다(Toth and Kalnay, 1993; Molteni et al., 1996). 모델의 구조적 오차의 경우 다중 모델 앙상블을 통해 모델이 가지고 있는 고유의 구조적 오차를 서로 상쇄시킴으로써 일부 해결할 수 있다(Hagedorn et al., 2005). Atger (1999), Ziehmann (2000) 그리고 Ebert (2001)에서는 poor-man's 앙상블 방법론을 이용하여 다중 모델 앙상블이 단일 모델로 구성된 앙상블보다 예측 성능이 높다는 점을 밝혔다. 이는 모델 자체가 가지고 있는 구조적인 오차의 크기가 확률론적 변동성에 의한 오차보다 크고, 단일 모델 앙상블에서는 구조적 오차에 의한 예측 한계를 개선시킬 수 없기 때문이다.

최근 컴퓨팅 기술이 발전하면서 보다 고해상도의 모델 예측이 가능해졌고, 기후변화와 더불어 극한기상 현상들이 증가됨에 따라(Rahmstorf and Coumou, 2011; Coumou et al., 2013) 보다 정확하고 세밀한 일기예보가 요구되고 있다. 이런 시대적인 흐름에 맞추어 WMO (World Meteorological Organization) 산하 WWRP (World Weather Research Programme)에서는 앙상블 기법을 이용한 예측능력의 향상, 다중 모델 앙상블을 통한 구조적 오차의 최소화, 그리고 2주 이내의 극한 기후의 예측 정확도 향상 등을 목적으로 The Observing System Research and Predictability Experiment (THORPEX) 프로젝트를 실시하였다(Richardson et al., 2005). THORPEX 프로젝트에서는 수치예보 모델을 활용한 앙상블 예보를 위해 THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) 시스템을 운용 중에 있다(Bougeault et al., 2010).

Hagedorn et al. (2012)는 TIGGE 다중 모델 앙상블과 오차가 고정된 European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) 모델의 예측성능을 비교하였다. 전체 9개 기관의 모델 중에서 캐나다, 미국, 영국 및 ECMWF의 모델로 구성된 다중 모델 앙상블의 예측성능은 ECMWF의 예측성능보다 높았다. 이는 기존 연구 결과와 일맥상통한다. 그러나 ECMWF 모델을 제외한 8개 기관의 모델로 구성된 다중 모델 앙상블 예측성능은 오히려 ECMWF 단일 모델의 예측성능보다 낮다. 이는 앞서 서술된 다중 모델 앙상블 구성과 함께 개별 모델들의 예측성능 개선이 반드시 이루어져야 함을 시사하고 있다. 이를 위해서는 반드시 적절한 방법을 통한 모델의 검증이 선행되어야 하며 이와 더불어 모델 오차의 대한 탐구 또한 이루어져야만 한다.

기상청 현업 모델인 전지구 예측시스템(Global Data

Assimilation and Prediction System; GDAPS)에 대한 예측성 평가도 꾸준히 진행되었다. Park et al. (2017)은 GDAPS 500 hPa 지위고도 예측장을 이용하여 Anomaly Correlation Coefficient 0.6 값을 기준으로 북반구 전체에서 약 8일, 동아시아 지역에서는 약 7일 정도의 예측성능을 보이는 것을 확인하였다. Lee et al. (2016)은 2014년의 GDAPS 자료를 이용하여 예측성능을 확인한 결과 예측시간이 길어질수록 적도 및 극 지역에 비해 중위도 지역에서의 Root Mean Square Error (RMSE)가 증가 폭이 큰 것을 확인하였다. 이밖의 많은 연구자들이 GDAPS의 개선과 검증을 위해 노력하고 있지만 예측 오차의 원인에 대한 역학적인 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2019년 1월 동안의 GDAPS 예측 자료를 이용하여 북반구 중고위도 지역을 중심으로 지위고도 장의 예측성을 분석하였다. 기존의 전통적인 예측성 분석방법 중 하나인 MSSS (Mean Square Skill Score)를 보다 더 발전시켜 북반구 중고위도 지역에서의 모델의 구조적 오차를 진단하고 성분별로 나누어 오차의 원인을 제시할 수 있는 역학적인 분석을 수행하였다. 또한 북반구 대류권 지위고도 오차가 블로킹과 연관 되어있을 수 있음을 제시하고 그 예측성에 대해서 분석하였다. 2장에서는 사용된 모델과 재분석 자료에 대한 설명 및 예측성 검증 방법론, 블로킹의 정의 및 평가지표에 대해 서술할 것이고, 3장에서는 분석 방법론을 토대로 GDAPS의 예측성을 진단하였다. 4장에서는 결론 및 요약을 기술하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

본 연구에서 사용된 GDAPS는 2018년 6월부터 현업에서 사용된 단일 대기 전지구 중기 예측모델로 수평 N1280(약 10 km의 수평 격자 간격), 연직 70층의 해상도를 사용한다. 모델은 4차원 융합자료동화를 하고 있으며, 하루에 2번 12시간 간격의 초기화된 자료를 바탕으로 84시간까지는 3시간 간격, 그 이후 288시간까지는 6시간 간격의 예측장을 생산하여 총 12일까지의 예측 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 2019년 1월 1일 0000 UTC부터 2019년 1월 31일 1200 UTC까지 12시간 간격으로 초기화하여 예측한 자료를 예측시간 10일까지 사용했으며, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 수평해상도로 선형 내삽하여 예측성을 평가하였다. 본 연구에서는 예측성 검증을 위해 연직 17개 층(1000/925/850/700/600/500/400/300/250/200/150/100/70/50/30/20/10 hPa)의 지위고도 예측장을 6시간 간격으로 사용하였다.

예측성 진단을 위해 사용된 재분석 자료는 ECMWF

에서 제공하는 ECMWF Reanalysis Interim (ERA-Interim)을 이용하였다(Dee et al., 2011). 모델의 예측성 검증을 위해 0.25° × 0.25°의 수평해상도와 17개의 연직 층을 동일하게 사용하였으며, 2019년 1월 1일 0000 UTC부터 2019년 2월 10일 1200 UTC까지의 자료를 이용하였다.

2.2 분석방법

2.2.1 구조적 오차

수치예보모델들은 초기조건과 모델의 불안정성 때문에 예측이 진행될수록 오차가 일정한 방향으로 편향되어 나타날 수 있으며, 이를 구조적 오차라 부른다. 이러한 모델의 구조적 오차를 진단하기 위한 평가법으로 평균오차(Mean Bias; MB)와 평균제곱오차(Mean Square Error; MSE)가 사용되며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$MB(i, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (M_{\lambda}(i, \tau) - O(i, \tau)) \quad (1)$$

$$MSE(i, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (M_{\lambda}(i, \tau) - O(i, \tau))^2 \quad (2)$$

여기서 λ 는 초기화하여 수행한 각 예측을 의미하고, N 은 예측을 수행한 총 횟수를 의미한다. i 는 각 격자점, τ 는 예측 시작으로부터의 예측기간(예측시점)을 나타낸다. M 은 해당 격자점, 해당 예측 시점에서의 모델의 결과를 의미한다. O 는 관측을 의미하며 예측시점에 해당하는 ERA-Interim 재분석 자료 값을 사용하였다. 식(1)의 MB 계산을 통해서 모델의 예측 오차가 각 지역과 연직층에서 어떤 경향으로 나타나는지 진단할 수 있으며, 식(2)의 MSE를 이용하여 모델의 예측 오차가 가지는 부호의 일관성을 진단할 수 있다.

2.2.2 예측성 진단

본 연구에서는 모델의 예측성을 정량적으로 검증하기 위해 평균제곱 예측성(Mean Squared Skill Score; MSSS)을 사용하였다(Goddard et al., 2013). MSSS는 표준화된 MSE를 이용한 통계량으로 아래의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$MSSS(i, \tau) = \frac{(O(i, \tau) - C(i, \tau))^2 - \frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (M_{\lambda}(i, \tau) - O(i, \tau))^2}{(O(i, \tau) - C(i, \tau))^2} = 1 - MSE_n(i, \tau) \quad (3)$$

식(3)의 $\lambda, N, i, \tau, M, O$ 은 식(2)와 동일하며, C 는 분석기간인 1월의 각 예측시점의 재분석 자료 기후값(1981년부터 2010년)을 의미한다. MSE_n 은 MSE를 관

측과 기후값의 차이(관측 아노말리)의 제곱으로 나누어 표준화한 값이다. 따라서 모델이 관측을 완벽하게 예측한다면 MSE, MSE_n 은 0이고 $MSSS$ 는 1이 된다. 일반적으로 수치예보모델의 구조적 오차는 예측이 진행될수록 증가하므로 $MSSS$ 는 1에 가까운 값에서 지속적으로 감소한다. 본 연구에서는 MSE와 관측 아노말리의 제곱의 크기가 같아져서 $MSSS$ 값이 0이 되는 시점까지 모델이 예측성이 있다고 정의하였다.

앞서 서술된 MSSS와 MSE_n 은 분석지역의 영역평균을 통해 아래 식(4)와 같이 표현될 수 있다.

$$MSSS(\tau) = 1 - MSE_n(\tau) = 1 - \frac{MSE_M(\tau)}{MSE_O(\tau)} \quad (4)$$

여기서 MSE_M 은 위도에 따른 영역 가중치($\cos\theta$)를 고려하여 지역 평균한 모델의 MSE를 의미하며, 마찬가지로 MSE_O 는 지역 평균한 관측 아노말리의 제곱을 의미한다. 위 MSE_M 과 MSE_O 두 값은 각각 아래의 식(5), (6)으로 나타낼 수 있다.

$$MSE_M(\tau) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N \sum_i (M_{\lambda}(i, \tau) - O(i, \tau))^2 \cos\theta_i}{\sum_i \cos\theta_i} \quad (5)$$

$$MSE_O = \frac{\sum_i (O(i, \tau) - C(i, \tau))^2 \cos\theta_i}{\sum_i \cos\theta_i} \quad (6)$$

뿐만 아니라, MSE_M 은 동서방향으로 평균된 [MSE]와 에디오차항(MSE^*) 구분할 수 있으며, MSE^* 은 푸리에 변환을 이용하여 진폭오차(MSE_{amp}^*)와 위상오차(MSE_{phs}^*)로 나타낼 수 있다(Stan and Straus, 2009; Son et al., 2020). 위의 방법론을 통하여 MSE^* 을 규모에 따라 행성규모의 파동(동서방향 파수3 이하) 또는 중관규모 이하의 파동(동서방향 파수4 이상)에 의한 오차로 구분하여 예측 오차의 원인에 대해 보다 역학적 진단을 할 수 있다(Kim et al., 2018a, 2018b).

2.2.3 블로킹 예측성 정의

500 hPa 지위고도에 나타나는 오차의 원인과 모델의 북반구 블로킹을 모의하는 것과의 관계를 살펴보고자 본 연구에서는 Tibaldi and Molteni (1990)에서 사용된 블로킹 지수를 수정하여 적용하였다.

$$GHGN = \frac{Z500(\phi_N) - Z500(\phi_0)}{\phi_N - \phi_0} \quad (7)$$

$$GHGS = \frac{Z500(\phi_0) - Z500(\phi_S)}{\phi_0 - \phi_S} \quad (8)$$

여기서, $\phi_N = \phi_0 + 17.5^\circ N$, $\phi_S = \phi_0 - 20^\circ N$ 이고, ϕ_0 는 $40^\circ N$ 부터 $70^\circ N$ 까지 2.5° 간격으로 설정하였다. 해당 경도에서 아래 기술된 두 가지 기준을 모두 만족하는

Table 1. Contingency table for blocking prediction.

		Observation	
		Blocked	No event
Prediction	Blocked	Hit	False
	No event	Miss	Normal

경우 블로킹이 존재하는 것으로 판별하였다.

$$GHGS > 0 \ \& \ GHGN < -10 \text{ m deg}^{-1} \text{lat}^{-1} \quad (9)$$

모델이 블로킹을 모의하는 경우는 총 4가지로 나뉠 수 있고, 이를 2행 2열의 분할표로 나타낼 수 있다 (Table 1). 해당 경도에서 모델과 재분석 자료에서 모두 블로킹이 관측되었다면 ‘H (Hit)’, 재분석 자료에는 블로킹이 존재하나 모델에서 모의하지 못한 경우에는 ‘M (Miss)’, 재분석 자료에는 블로킹이 없으나, 모델에서 블로킹을 모의한 경우에는 ‘F (False)’, 마지막으로 재분석 자료와 모델에서 둘 다 블로킹이 존재하지 않는 경우를 ‘N (Normal)’로 정의하였다.

앞서 서술된 4가지 경우를 이용하여 모델의 블로킹 모의성능을 평가할 수 있으며, 평가 지표로는 POD (Probability of Detection), BS (Bias Score), HSS (Heidke Skill Score), 그리고 FAR (False Alarm Rate)을 사용하였다(Table 2) (Wilks, 2011). POD는 재분석 자료에서 블로킹이 발생하였을 때 모델이 블로킹을 탐지하는 경우를 나타내는 비율로 완벽한 예측을 하는 경우에 그 값은 1이 된다. 하지만 모델이 재분석 자료 보다 과대 모의를 하는 경우는 구별할 수는 없다. FAR은 이와 반대 개념으로 재분석 자료에서 블로킹이 발생하지 않았지만 모델에서는 블로킹이 탐지되는 비율을 의미하므로, 모델이 완벽하게 예측하는 경우에 그 값은 0이 된다. 하지만 앞서 POD와 마찬가지로 모델이 아예 블로킹을 탐지하지 못하는 경우와 구별할 수 없다. BS는 모델이 블로킹을 과대/과소 모의하는 정

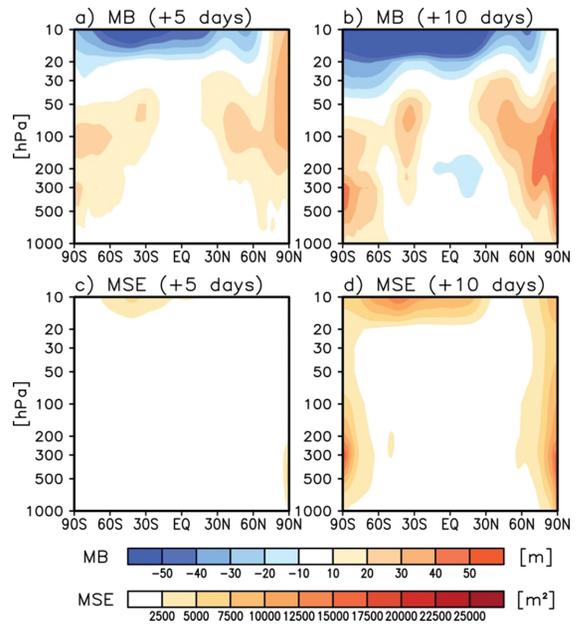


Fig. 1. (Top) MB and (bottom) MSE of zonal-mean geopotential height in GDAPS at lead time of 5 days (left) and 10 days (right) in January 2019.

도를 살펴보는 지표로 0 이상의 값을 값을 가지며, 모델이 완벽한 예측을 하는 경우에 그 값이 1이 된다. HSS는 모델의 예측성을 확인하는 지표로 1의 값은 모델이 완벽하게 블로킹을 예측한다는 것을 의미하고, 만약 모델이 0이하의 값을 갖게 되면 모델은 예측하는 블로킹이 무작위성을 가지는 것을 의미한다.

3. 결 과

Figure 1은 2019년 1월의 GDAPS의 5일, 10일 지

Table 2. Skill scores used for skill verification. Here, H, F, M, and N denote the number of ‘Hit’, ‘False’, ‘Miss’, and ‘Normal’ events, respectively.

	Definition
POD (Probability of Detection)	$\frac{H}{H + M}$
FAR (False Alarm Rate)	$\frac{F}{F + N}$
BS (Bias Score)	$\frac{H + F}{H + M}$
HSS (Heidke Skill Score)	$\frac{2(HN - MF)}{(H + M)(M + N) + (H + F)(F + N)}$

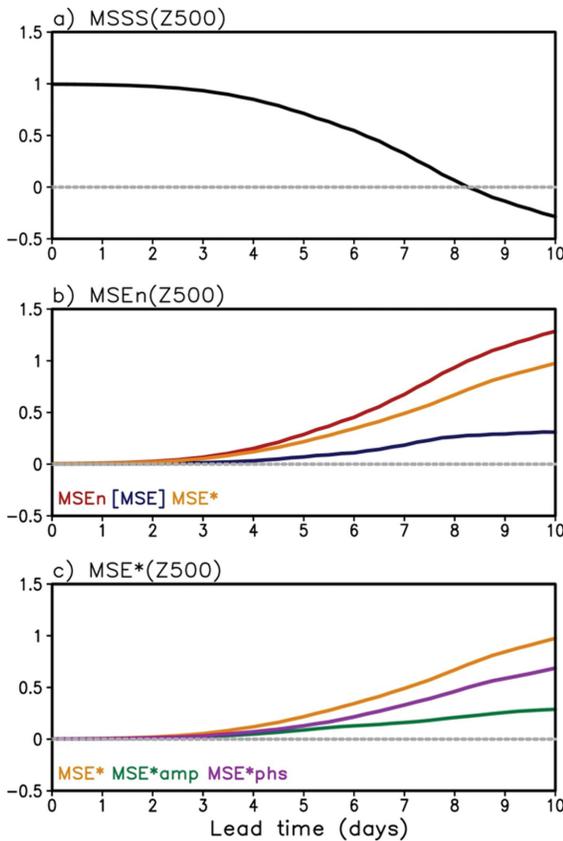


Fig. 2. (Top) MSSS, (middle) MSE_n , $[MSE]$, MSE^* , (bottom) MSE_{phs}^* , and MSE_{amp}^* of 500-hPa geopotential height in the northern extratropics (30° - 90° N). Note that $[MSE]$, MSE^* , MSE_{phs}^* , and MSE_{amp}^* are normalized by MSE_o .

위고도 예측 결과에 대한 구조적 오차를 분석한 것으로, 동서방향으로 평균된 평균오차(MB) 및 평균제곱오차(MSE)를 나타내고 있다. GDAPS의 5일 예측장에서는 10 hPa 부근의 상부 성층권에서 음의 MB 가 존재하는 것을 확인할 수 있으며 중고위도 지역의 하부 성층권과 상부 대류권, 북극 상부 성층권에서 양의 MB 를 보인다(Fig. 1a). 10일 예측결과에서 MB 의 공간분포도 5일 예측결과와 유사하며 그 크기가 더 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 1b). 또한 적도 부근 대류권 상부에서도 약한 음의 MB 가 존재한다. MB 와 유사하게 MSE 에서도 5일 예측결과에서는 상부 성층권에서 오차가 나타나며, 10일 예측 결과에서는 양극지역의 연직 전층과 30° N- 60° S 지역의 중하부 성층권에서 MSE 가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Figs. 1c, d).

GDAPS의 예측시간에 따른 북반구 중-고위도(30° N- 90° N) 500 hPa 지위고도장의 2019년 1월 평균 MSSS

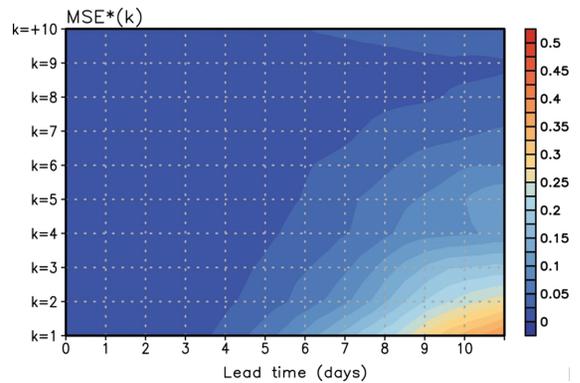


Fig. 3. MSE^* of 500-hPa geopotential height in the northern extratropics (30° - 90° N) as a function of zonal wave number. Note that MSE^* is normalized by MSE_o .

및 MSE_n 을 Fig. 2에 나타내었다. MSSS 값은 예측시간 약 3일까지 거의 1에 가깝게 유지되다가 예측시간 3일 이후로 점차 감소하여 0 이하로 떨어지는 형태를 보인다(Fig. 2a). 이로부터 2019년 1월 북반구 중고위도에서 GDAPS의 MSSS 값이 0 이상으로 유지되는 예측한계는 약 8.2일로 나타난다. MSE_n 의 경우 MSSS와 일관된 형태로 예측 3일부터 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2b 빨간색 실선). MSE_n 가 동서방향으로 평균된 항인 $[MSE]$ 는 예측이 진행되어도 상대적으로 느리게 증가하여 약 8일부터 오차의 크기가 일정한 형태를 보인다(Fig. 2b 파란색 실선). 반면 에디항 MSE^* 는 MSE_n 과 유사하게 약 3일부터 가시적으로 증가하여 MSE_n 의 전체 변화의 대부분이 이 에디항에서 기인함을 확인할 수 있으며, $[MSE]$ 와 달리 예측 후반에 오차가 포화되는 경향이 나타나지 않는다(Fig. 2b 노란색 실선). 예측시간 10일을 기준으로 MSE_n 의 약 70% 정도는 MSE^* 에서 비롯되며, 나머지 약 30% 정도를 $[MSE]$ 가 설명한다. MSE^* 가 발생하는 원인을 구체적으로 분석하기 위해 진폭오차(MSE_{amp}^*)와 위상오차(MSE_{phs}^*)로 구분하였다(Fig. 2c). MSE^* 가 가시적으로 증가하는 예측시간 3일부터 MSE_{amp}^* (Fig. 2c 초록색 실선)과 MSE_{phs}^* (Fig. 2c 보라색 실선) 모두 증가하는 형태를 보이고 있다. 예측시간 약 5일까지는 두 오차의 크기가 비슷하였으나, 그 이후 위상오차의 크기가 상대적으로 더 크게 증가하여, 예측시간 10일 기점으로 위상오차의 크기가 진폭오차의 크기의 2배 이상인 것을 확인할 수 있다.

오차의 원인과 예측성 한계를 보다 역학적인 관점으로 접근하기 위해 GDAPS 500 hPa 지위고도 예측장에서 동서방향 파수에 따른 MSE^* 의 크기를 푸리에 변환을 통하여 분석하였다(Fig. 3). 모든 동서방향 파수에서 오차는 예측시간이 길어질수록 그 값이 증가

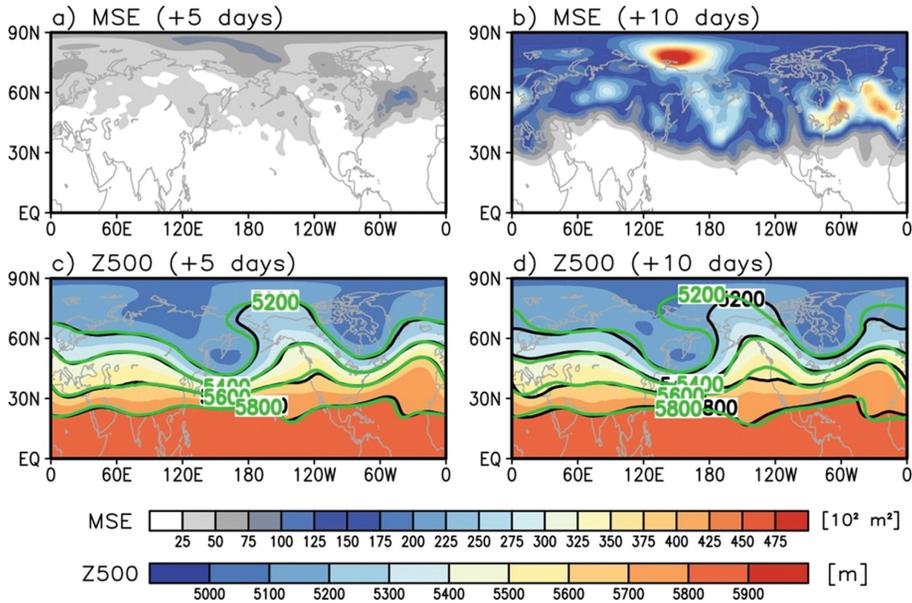


Fig. 4. (Top) MSE of 500-hPa geopotential height and (bottom) GDAPS forecasts (green contour) and ERAI (shading with black contour).

한다. 또한 MSE^* 는 큰 동서방향 파수에서는 그 크기가 작고, 대부분은 동서방향 파수가 1~3의 행성규모의 파동에서 비롯된다. 또한 행성규모 파동에 의한 MSE^* 의 변화는 예측기간이 증가할 때 대류권 하부부터 상부까지 전체 층에서 비슷한 크기로 증가하는 것을 확인할 수 있고, 중관규모 이하의 파동(동서방향 파수 3 이상)에 의한 에디오차는 대부분 대류권 상부에 집중된 형태로 나타난다(결과 나타내지 않음).

GDAPS 500 hPa 북반구 지위고도 예측오차의 공간적인 분포를 살펴보기 위해 5일, 10일 예측결과의 MSE 및 지위고도를 Fig. 4에 나타내었다. 모델에서는 예측시간이 길어짐에 따라 북태평양 중고위도 지역(120°E-140°W), 그리고 북대서양 중위도 지역(90°W-0°)에서 MSE가 상대적으로 높게 나타남을 확인할 수 있다(Figs. 4a, b). GDAPS 500 hPa 예측결과에서도 북태평양 지역에 나타나는 지위고도의 고기압성 분포 및 블로킹의 특징인 지위고도의 남북방향 역전현상을 더 강하게 모의하는 경향을 보이며, 이러한 특징은 5일 예측 결과보다 10일 예측결과에서 더 심화되어 나타난다. 또한 북대서양 지역에서의 지위고도는 재분석 자료보다 강하게 모의한다. 이와 같은 GDAPS 예측결과와 재분석 자료의 500 hPa 지위고도 편차는 대부분 동서방향 파수가 1~3의 행성규모 파동에 의해 나타나며, 이는 앞서 서술된 Fig. 3의 결과와 일치한다(결과 나타내지 않음).

위 결과들을 종합하면, 2019년 1월의 GDAPS 예측

에서 중고위도 대류권에서 동서방향 평균된 지위고도는 양의 MB가 나타나며(Figs. 1a, b), 500 hPa 북태평양에서는 지위고도 능선과 남북방향 역전현상을 강하게, 북대서양 지역에서는 지위고도 능선을 강하게 모의한다(Figs. 4c, d). 위 두 지역은 북반구 겨울철 블로킹 발생이 빈번하게 발생하는 지역과 지리적으로 유사하며(Dunn-Sigouin et al., 2013), 이러한 예측장의 특징과 지리적 유사성은 GDAPS의 오차가 북반구 중고위도 지역에서 발생하는 블로킹과 연관될 수 있음을 시사한다.

Figure 5에서는 2019년 1월 7일 0000 UTC부터 2019년 1월 16일 1200 UTC 사이에 12시간 간격으로 예측한 GDAPS 결과와 재분석 자료에서의 북태평양 블로킹을 나타내었다. GDAPS는 대부분의 예측장에서 예측시간 3일까지 블로킹을 재분석 자료와 거의 유사하게 모의하였으나, 그 이후에는 예측시간이 길어질수록 블로킹 모의능력이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 GDAPS의 블로킹 예측 능력은 예측에 이용된 초기값에 민감한데, 예를 들어 10일 예측 결과에서 초기화가 12시간 간격임에도 불구하고 블로킹 모의 능력이 상당히 다르게 나타날 수 있다(Figs. 5f-h, m-o) (Matsueda et al., 2011).

Figure 6은 2019년 1월 1일 0000 UTC 부터 2019년 2월 10일 1200 UTC 기간동안 재분석 자료와 GDAPS의 5일, 10일 예측결과에서 북반구 경도별로 발생한 블로킹을 각각 나타낸 결과이다. 재분석 자료에서는

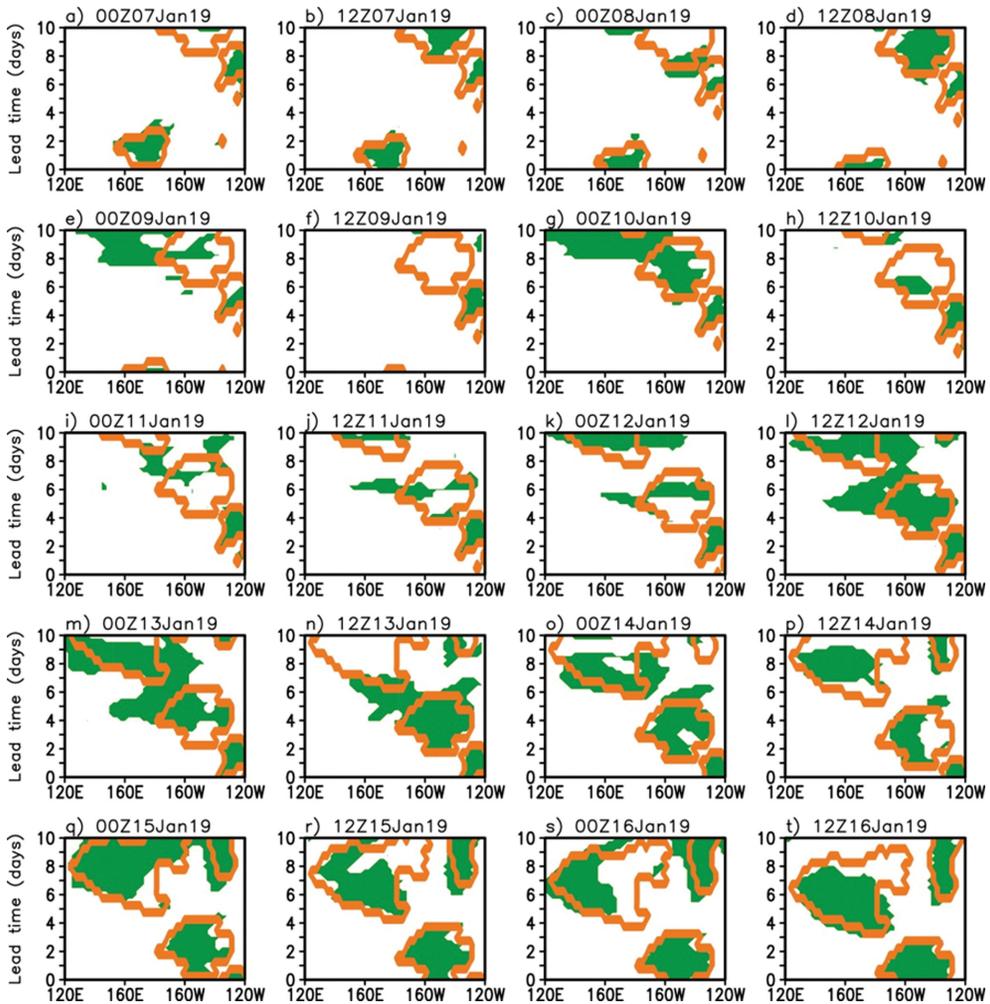


Fig. 5. Hovmöller diagram of blocking over 120°E-120°W in ERAI (orange contour) and GDAPS forecasts (shading) initialized in 00Z 19 January to 12Z 16 January 2019.

예측기간 동안 북태평양 및 북대서양 지역에서 블로킹이 빈번하게 발생한 것을 확인할 수 있다(Fig. 6a). GDAPS 5일 예측장에서는 일부 지역을 제외하고 블로킹 발생 시기 및 위치를 재분석 자료와 유사하게 모의한다(Fig. 6b). GDAPS 10일 예측장에서도 블로킹을 재분석 자료와 비슷하게 모의하였으나, 앞서 사례분석에서 확인하였던 것처럼(Figs. 5f-h, m-o) 블로킹이 모델 초기값에 민감하며, 블로킹을 과대 모의하는 경우가 있어 동서방향으로 늘어진 형태의 블로킹 지수가 나타난다. 또한 이러한 특징은 주로 블로킹 발생 빈도가 높은 북태평양과 북대서양 지역을 중심으로 발생한다(Fig. 6c).

Figure 7은 재분석 자료와 GDAPS의 5일, 10일 예측장에서 블로킹 발생 빈도를 나타낸다. 블로킹은 Fig.

6에서 확인하였던 것처럼 GDAPS 예측 기간 동안 북태평양 지역 및 북대서양 지역에서 빈번하게 발생하는 것을 확인할 수 있다(Figs. 7a, b 회색 선). GDAPS 5일 예측장에서의 블로킹 발생빈도는 재분석 자료의 결과와 굉장히 유사하며(Fig. 7a), 10일 예측장에서도 마찬가지로 블로킹 발생빈도를 재분석 자료와 비슷하게 모의한다(Fig. 7b). 하지만 10일 예측장에서는 블로킹이 빈번하게 발생하는 북태평양 및 북대서양 지역의 블로킹을 과대모의하며, 특히 대서양 지역에서 그 경향이 더욱 뚜렷하게 나타난 것을 확인할 수 있다.

GDAPS의 블로킹 모의 능력을 보다 정량적으로 검증하고, 모델에서 지위고도의 오차와 블로킹 모의 능력과의 연관성을 살펴보기 위해 예측시간에 따른 모델 평가지표(POD, BS, HSS, FAR)를 Fig. 8에 나타내

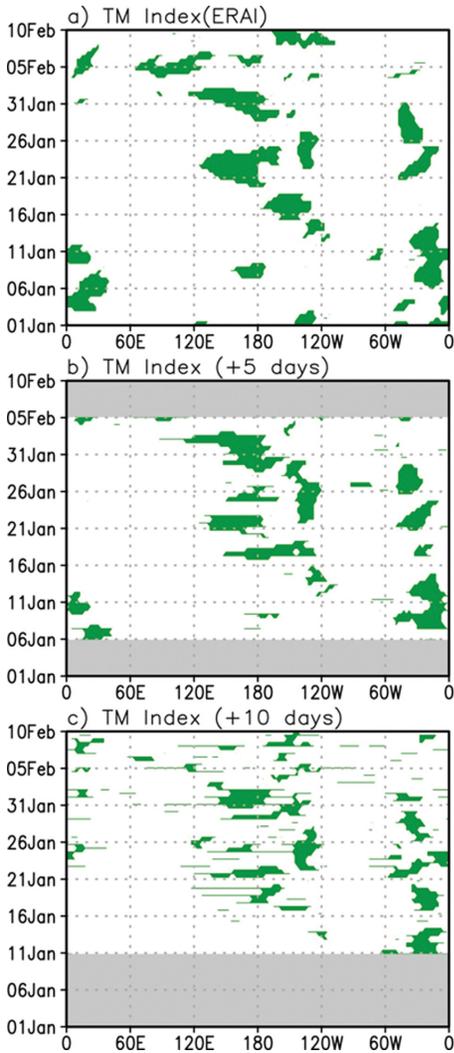


Fig. 6. Hovmöller diagram of Northern Hemisphere blocking in (a) ERAI and (b) GDAPS 5-day forecasts and (c) 10-day forecasts from 01 January 2019 to 10 February 2019. Gray areas represents the period outside of the forecast range.

었다. Figure 8a는 모델의 MSE가 상대적으로 낮았던 지역(0°-120°E, 140°W-90°W)에서의 POD, BS, HSS, FAR을 나타내고, Fig. 8b에서는 모델의 MSE가 상대적으로 높은 지역(120°E-140°W, 90°W-0°)에서의 POD, BS, HSS, FAR을 나타낸다. 모델은 MSE가 높은 지역과 낮은 지역 모두 예측시간이 길어짐에 따라 POD 및 HSS 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 예측시간이 10일 정도 되었을 때 HSS가 두 지역 모두 약 0.2의 값에 가까워져 GDAPS에서 블로킹을 예측하는 정도가 무작위성에 가까워지는 것을 확인하였다. POD의 경우 MSE가 낮은 지역에서는 예측시간이 길어짐에 따라 약 0.2의 값까지 떨어졌으며, MSE가 높은 지역에서는 약 0.5까지 떨어진다. 두 지역 모두 HSS가 비슷함에도 불구하고, POD의 차이를 보인 이유는 MSE가 높은 지역에 상대적으로 블로킹이 많이 발생하였기 때문인 것으로 보인다.

FAR의 경우 두 지역 모두 시간이 지남에 따라 증가하는 추세를 보인다. 그러나 MSE가 낮은 지역에서는 예측 시간이 10일이 되었을 때에도 FAR이 약 0.1에 불과한 반면, MSE가 높은 지역에서는 FAR이 예측 시간 3일 이후부터 크게 증가하기 시작하여 예측 시간 10일이 되었을 때는 MSE가 낮은 지역보다 2배 이상 크게 나타난다. BS는 MSE가 낮은 지역에서는 예측이 진행되어도 1에 가까운 값으로 유지되는 반면 MSE가 크게 나타나는 지역의 BS는 모델 예측시간이 길어질수록 그 값이 점점 증가하는 경향을 보인다. 이로부터 GDAPS에서 예측이 진행될수록 블로킹을 과대 모의하는 것이 MSE가 크게 나타나는 것과 관련이 있으며 모델의 대류권 예측성 한계를 만드는 주요한 요소임을 추측해볼 수 있다.

4. 결론 및 토의

본 연구는 기상청 전지구 예측시스템(GDAPS)의 2019년 1월 예측장을 이용하여 북반구 중고위도 지위 고도 예측성을 검증하였다. GDAPS 지위고도장은 예

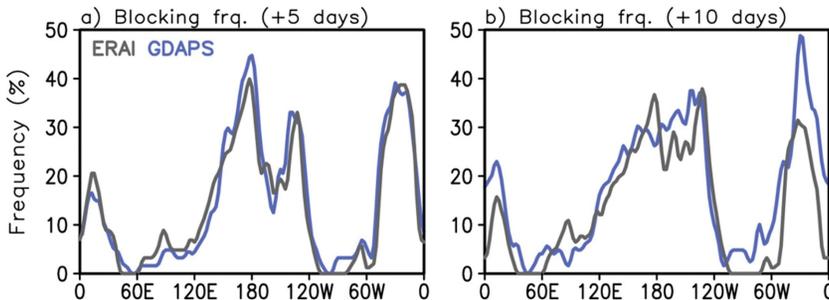


Fig. 7. Blocking frequency in ERAI (gray) and (a) GDAPS 5-day forecasts and (b) 10-day forecasts.

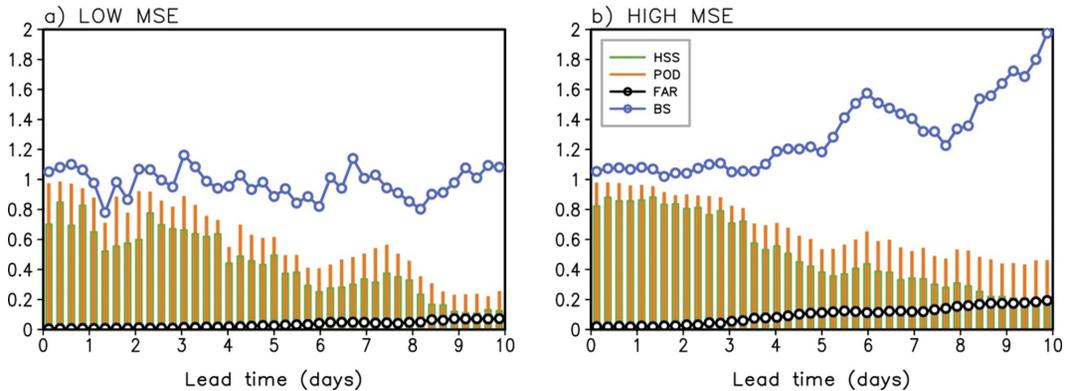


Fig. 8. HSS (green), POD (orange), FAR (black), HS (blue) over (left) low MSE region (0° - 120° E and 140° W- 90° W) and (right) high MSE region (120° E- 140° W and 90° W- 0°).

측이 진행되며 10 hPa 부근 성층권 적도지역에서 음의 편차를, 하부 성층권 및 대류권 중고위도와 극 지역에서는 양의 편차가 나타난다.

GDAPS 500 hPa 지위고도의 북반구 중고위도 지역 예측성을 평가한 결과 예측기간 3일 이후부터 오차가 점점 증가하기 시작하였고, MSSS 값 0을 기준으로 약 8.2일의 예측성을 보인다. 모델의 예측 오차는 동서방향 파수가 1~3인 행성규모 파동의 에디오차가 가장 큰 원인이며, 행성규모 에디오차의 대부분은 위상오차에 의해 나타난다. 500 hPa 지위고도의 MSE는 북태평양과 북대서양에서 크며, 이 지역에서 예측된 지위고도장의 능선이 재분석자료에 비해 강하게 나타난다.

블로킹 지수를 이용하여 재분석 자료와 GDAPS의 예측결과에서 블로킹을 분석한 결과, 해당 분석기간에서 블로킹이 많이 발생하는 북태평양과 북대서양지역이 MSE가 높았던 지역과 유사하게 나타난다. 모델은 예측시간 3~5일까지 블로킹을 잘 모의하였으며 10일의 예측결과에서도 정성적으로는 블로킹을 모의하나, 블로킹 예측성능이 블로킹 사례 및 모델 초기장에 다소 민감하게 나타난다. 평가지표를 활용하여 GDAPS의 블로킹 모의 능력을 확인한 결과 MSE가 높은 지역에서는 MSE가 낮은 지역과 달리 블로킹을 과대 모의하는 경향을 보인다. 따라서 GDAPS의 북반구 500 hPa 중고위도 지역에서 나타나는 예측오차와 이로 인한 예측성 감소는 블로킹의 과대 모의와 연관이 있을 것으로 보이며, 이 점은 모델에서 블로킹 모의 성능을 향상시킴으로써 북반구 중고위도 대류권의 중기예측성능을 높일 수 있는 가능성을 시사한다 (Tibaldi and Molteni, 1990; Colucci and Baumhefner, 1998).

본 연구는 기상청 현업 예보 시스템인 GDAPS의 중고위도 예측성능을 역학적으로 평가하고 대류권 예

측성 한계의 원인으로서는 블로킹을 제시했다는 점에서 주요한 의의가 있다. 그러나 고해상도 현업 예측 자료를 긴 기간 확보하기 어려운 제한점 때문에 분석이 2019년 1월의 예측에 대해 한정되어 GDAPS의 예측 특성을 일반화하기 어렵다. 따라서 GDAPS의 예측성 향상을 위해서는 다른 계절 및 모델 버전 향상에 따라 북반구 예측성 및 블로킹 예측성이 어떤 특성을 보이는지에 대한 지속적인 논의가 필수적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 『수치예보 및 자료응용 기술개발』 과제 (1365002970)의 지원과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2017R1E1A1A01074889)을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Atger, F., 1999: The skill of ensemble prediction systems. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1941-1953.
- Baumhefner, D. P., 1996: Numerical extended-range prediction: Forecast skill using a low-resolution climate model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1965-1980.
- Bougeault, P., and Coauthors, 2010: The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1059-1072, doi:10.1175/2010BAMS2853.1.
- Colucci, S. J., and D. P. Baumhefner, 1998: Numerical prediction of the onset of blocking: A case study with forecast ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 773-784.
- Coumou, D., A. Robinson, and S. Rahmstorf, 2013: Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Climatic Change*, **118**, 771-782, doi:10.1007/

- s10584-012-0668-1.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Dunn-Sigouin, E., S.-W. Son, and H. Lin, 2013: Evaluation of Northern Hemisphere blocking climatology in the Global Environment Multiscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 707-727, doi:10.1175/MWR-D-12-00134.1.
- Ebert, E. E., 2001: Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2461-2480.
- Goddard, L., and Coauthors, 2013: A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. *Climate Dyn.*, **40**, 245-272, doi:10.1007/s00382-012-1481-2.
- Hagedorn, R., F. J. Doblas-Reyes, and T. N. Palmer, 2005: The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept. *Tellus A*, **57**, 219-233.
- _____, R. Buizza, T. M. Hamill, M. Leutbecher, and T. N. Palmer, 2012: Comparing TIGGE multi-model forecasts with reforecast-calibrated ECMWF ensemble forecasts. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 1814-1827, doi:10.1002/qj.1895.
- Kim, H., S.-W. Son, K. Song, S.-W. Kim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018a: Prediction skill of GloSea5 model for stratospheric polar vortex intensification events. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **39**, 211-227, doi:10.5467/JKES.2018.39.3.211 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-W., H. Kim, K. Song, S.-W. Son, Y. Lim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018b: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction skills of GloSea5 model: Part 1. Geopotential height in the Northern Hemisphere extratropics. *Atmosphere*, **28**, 233-245, doi:10.14191/ATMOS.2018.28.3.233 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-M., H.-S. Kang, Y.-H. Kim, Y.-H. Byun, and C. Cho, 2016: Verification and comparison of forecast skill between global seasonal forecasting system version 5 and unified model during 2014. *Atmosphere*, **26**, 59-72, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.059 (in Korean with English abstract).
- Lorenz, E., 1969: The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, **21**, 289-307.
- Matsueda, M., M. Kyouda, Z. Toth, H. L. Tanaka, and T. Tsuyuki, 2011: Predictability of an atmospheric blocking event that occurred on 15 December 2005. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2455-2470, doi:10.1175/2010MWR3551.1.
- Miyakoda, K., G. D. Hembree, R. F. Strickler, and I. Shulman, 1972: Cumulative results of extended forecast experiments. I. Model performance for winter cases. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 836-855.
- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 73-119.
- Park, S., D.-J. Kim, S.-W. Lee, K.-W. Lee, J. Kim, E.-J. Song, and K.-H. Seo, 2017: Comparison of extended medium-range forecast skill between KMA ensemble, ocean coupled ensemble, and GloSea5. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 393-401, doi:10.1007/s13143-017-0035-2.
- Rahmstorf, S., and D. Coumou, 2011: Increase of extreme events in a warming world. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 17905-17909, doi:10.1073/pnas.1101766108.
- Richardson, D., R. Buizza, and R. Hagedorn, 2005: First workshop on the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) - Final report. World Meteorological Organization WMO/TD-No. 1273, WWRP/THORPEX No. 5, 39 pp.
- Son, S.-W., H. Kim, K. Song, S.-W. Kim, P. Martineau, Y.-K. Hyun, and Y. Kim, 2020: Extratropical prediction skill of the Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031273, doi:10.1029/2019JD031273.
- Stan, C., and D. M. Straus, 2009: Stratospheric predictability and sudden stratospheric warming events. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **114**, D12103.
- Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990: On the operational predictability of blocking. *Tellus A*, **42**, 343-365.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.
- Wilks, D. S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd ed. Academic Press, 676 pp.
- Ziehmann, C., 2000: Comparison of a single-model EPS with a multi-model ensemble consisting of a few operational models. *Tellus A*, **52**, 280-299.