

GloSea5 모형의 성층권 예측성 검증

정명일¹⁾ · 손석우^{1)*} · 임유나¹⁾ · 송강현¹⁾ · 원덕진²⁾ · 강현석²⁾

¹⁾서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부, ²⁾국립기상과학원

(접수일: 2016년 2월 1일, 수정일: 2016년 2월 26일, 게재확정일: 2016년 3월 8일)

Assessment of Stratospheric Prediction Skill of the GloSea5 Hindcast Experiment

Myungil Jung¹⁾, Seok-Woo Son^{1)*}, Yuna Lim¹⁾, Kanghyun Song¹⁾,
DukJin Won²⁾, and Hyun-Suk Kang²⁾

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

²⁾National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

(Manuscript received 1 February 2016; revised 26 February 2016; accepted 8 March 2016)

Abstract This study explores the 6-month lead prediction skill of stratospheric temperature and circulations in the Global Seasonal forecasting model version 5 (GloSea5) hindcast experiment over the period of 1996–2009. Both the tropical and extratropical circulations are considered by analyzing the Quasi-Biennial Oscillation (QBO) and Northern Hemisphere Polar Vortex (NHPV). Their prediction skills are quantitatively evaluated by computing the Anomaly Correlation Coefficient (ACC) and Mean Squared Skill Score (MSSS), and compared with those of El Nino-Southern Oscillation (ENSO) and Arctic Oscillation (AO). Stratospheric temperature is generally better predicted than tropospheric temperature. Such improved prediction skill, however, rapidly disappears in a month, and a reliable prediction skill is observed only in the tropics, indicating a higher prediction skill in the tropics than in the extratropics. Consistent with this finding, QBO is well predicted more than 6 months in advance. Its prediction skill is significant in all seasons although a relatively low prediction skill appears in the spring when QBO phase transition often takes place. This seasonality is qualitatively similar to the spring barrier of ENSO prediction skill. In contrast, NHPV exhibits no prediction skill beyond one month as in AO prediction skill. In terms of MSSS, both QBO and NHPV are better predicted than their counterparts in the troposphere, i.e., ENSO and AO, indicating that the GloSea5 has a higher prediction skill in the stratosphere than in the troposphere.

Key words: GloSea5, seasonal prediction, QBO, polar vortex

1. 서 론

계절 예측 시스템의 예측성을 파악하고 정량화하기 위한 연구는 수치모형의 개선과 더불어 꾸준히 이루어

어지고 있다(Hurrell et al., 2009). 특히, 북반구 계절 예측성에 대한 이해는 수치모형의 개발 및 개선뿐만 아니라 사회경제학적인 측면에서도 매우 중요하다. 그러나 대부분의 계절 예측성 연구는 대류권 기후인자에 국한되어 있으며(Kim et al., 2012), 성층권 예측인자에 대한 이해는 미미한 형편이다.

대류권의 계절 예측성에 관한 연구는 다양한 계절과 지역, 그리고 기간 및 분석방법에 대해서 진행되어왔다. 최신 모형에서 엘니뇨-남방진동(El Nino-

*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: +82-2-883-4972
E-mail: seokwooson@snu.ac.kr

Southern Oscillation, ENSO)은 6~9개월 이상 예측할 수 있는 것으로 보고되었으며(Jin et al., 2008; Wang et al., 2009), 몬순의 경우 계절규모 이상의 예측성이 크지 않은 것으로 알려져 있다(Wang et al., 2012). 또한 인도양 쌍극자(Indian Ocean Dipole, IOD)와 북극 진동(Arctic Oscillation, AO)은 일부 계절을 제외하고 예측성이 크지 않으며 통계적 분석방법에 따라 예측성의 차이가 있는 것으로 밝혀졌다(Jung et al., 2015). 대류권 예측성 향상은 지역규모의 예측성 향상으로 이어질 수 있기 때문에 모형에서 보다 나은 예측성을 확보하기 위한 노력을 기울일 필요가 있다.

성층권의 대표적인 현상으로는 적도 성층권의 준2년주기진동(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)과 북반구 극 성층권의 계절내진동인 극소용돌이(Northern Hemisphere Polar Vortex, NHPV)가 있다. 이러한 성층권 자연변동성이 대류권에 직간접적으로 미치는 영향에 대한 연구는 최근 10여년간 지속적으로 이루어지고 있다. Baldwin and Dunkerton (2001)은 겨울철 극소용돌이의 강도 변화가 대류권 고위도 지표에 직접 영향을 줄 수 있음을 보였으며, Garfinkel and Hartmann (2011)은 준2년주기진동과 관련된 운동량의 변화가 대류권의 겨울철 중위도 제트에 직접 영향을 미치는 것을 설명하였다. 그뿐만 아니라, Holton and Tan (1980)은 준2년주기진동이 연직방향으로 전파하는 파동의 전파방향을 결정하면서, 성층권 극소용돌이를 통해 고위도 지표 순환장의 변화를 유도할 수 있음을 보였다. 또한 일부 지역에서는 성층권 자연변동성이 엘니뇨-남방진동만큼 지표 기온 변화에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사하는 연구도 있다(Thompson et al., 2002). 성층권 자연변동성에 대한 이해는 단기예측부터 기후 변화까지 전 시간 규모의 예측성 향상을 가져올 수 있기 때문에(Kidston et al., 2015; Sigmond et al., 2013) 모형의 성층권 예측성 이해는 대류권 예측성 이해에 있어서 중요하다.

계절 예측에 대한 연구가 국제적으로 활발하게 이뤄지고 있는 현 시점에서 국내에서도 계절예측시스템의 개발 및 기후인자의 예측을 위해 다양한 노력을 기울여 왔다. 그 일환으로 2010년부터 한국 기상청과 국립기상과학원은 영국 기상청에서 개발한 HadGEM (Hadley Center Global Environment Model) 전 지구 기후모형을 기반으로 한 GloSea (Global Seasonal forecasting model) 앙상블 계절예측시스템을 도입하여, 한영 공동 계절 예측 시스템을 운용 중에 있다. 지속적인 모형 개발 결과, 현재는 GloSea Version5 (GloSea5)를 현업에 도입하여 활용 중이다.

Jung et al. (2015)은 GloSea5 모형의 6개월 과거기후 모의자료를 이용하여 대류권 기후 지수의 예측성을 평가하였다. 연구에 의하면 엘니뇨-남방진동은 6개

월 이상 예측 가능하며 인도양 쌍극자의 경우, 발달하는 봄철은 예측성이 없지만 가을철은 3개월 정도 예측 가능하다. 또한 북극진동과 다양한 여름철 및 겨울철 몬순은 1~2개월 예측 가능하다고 본다. 결론적으로 Jung et al. (2015)은 계절변동이 적은 지수의 경우 계절변동이 심하고 현상의 메모리가 짧은 지수에 비해 예측성이 높다고 평가하였다.

Jung et al. (2015)에서 GloSea5 모형의 대류권 예측능력을 평가하였다면 본 연구에서는 모형의 성층권 예측능력을 평가하였다. 분석 시 모형이 가지고 있는 구조적 오차를 제거한 후, 재분석 자료와의 비교를 통해 예측성을 평가 하였다. 우선 성층권 및 대류권의 전지구 기온 예측성을 살펴보고, 성층권 자연변동성의 예측성은 준2년주기진동과 극소용돌이 지수로 진단하였다. 또한 이와 유사한 주기성을 가지는 대류권 자연변동성인 엘니뇨-남방진동과 극진동 지수를 진단하고 성층권 지수의 예측성과 비교하였다.

2. 자 료

GloSea5는 전지구 대기-해양-해빙 결합모형인 HadGEM3를 기반으로 한 계절예측 시스템이다 (Maclachlan et al., 2014). HadGEM3는 Met Office Unified Model (MetUM)의 대기모델과 Joint UK Land Environment Simulator (JULES)의 지면모델 및 Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO)의 해양 모델, 그리고 Los Alamos Sea Ice Model (CICE)의 해빙모델로 구성된다. 그리고 이 모델들은 대기-해양 플럭스 교환을 위한 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS) 커플러를 통해 하나의 시스템으로 결합되어 있다. 본 연구와 관련된 GloSea5의 과거 기후 모의실험은 1996년부터 2009년까지 총 14년 동안 각 초기장마다 최소 6개월의 적분 자료를 생산한다. 이 실험의 초기 조건으로 Met Office 자료동화 시스템에서 제공하는 ERA-Interim (Dee et al., 2011)재분석 자료가 쓰이며 대기와 지면 및 해양과 해빙 자료가 포함된다. 자세한 내용은 Maclachlan et al. (2014)에 기술되어 있다. 생산된 과거 기후 모의자료는 일평균 자료이며 위도 0.56°과 경도 0.83°의 수평 해상도와 총 85개의 연직층을 가진다. GloSea5 모형의 초기장으로는 매달 1일, 9일, 17일과 25일에 해당하는 자료가 사용되며 각 초기장이 가지는 불확실성을 고려하여 초기장 별로 최대 3개의 앙상블 멤버가 존재한다. 본 연구는 초기장의 불확실성을 고려한 월평균 방법인 영국 기상청의 분석 방법에 따라 25일, 1일, 9일 초기장의 앙상블을 평균한 뒤, 월평균 자료로 가공하여 사용하였다 (Maclachlan et al., 2014). 일례로 1월에 예측을 시작하는 월평균 자료는 Table 1과 같은 초기 모형 자료

Table 1. An example of ensemble mean for January prediction.

Initialization date	Lead time (month)	0	1	2	3	4	5	Ensemble member
12/25		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	1-3
01/01		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	1-3
01/09			Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	1-3
01		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	3-9

Table 2. The definitions of climate indices used in this study. Here bracket denotes zonal mean.

Climate index	Variable	Definition
GMT50	T50	70°S-70°N, 0-360°E, 50 hPa
GMT500	T500	70°S-70°N, 0-360°E, 500 hPa
QBO index	[U50]	10°S-10°N, 50 hPa
Nino3.4 index	TS	5°S-5°N, 170-120°W
NHPV index	[Z50]	65-90°N, 50 hPa
AO index	SLP	[35°N]-[65°N]

의 앙상블 평균을 통해 구하였다. 선행시간(Lead Time)은 예측 시점과 초기화 시점의 시간상 차이를 의미하며 본 연구에서는 월 단위를 가진다. 예를 들어 lead time 0은 해당 월의 초기장을 이용하여 그 월의 월평균 값을 예측한 것이고, lead time 5는 5개월 후의 월평균 값을 예측한 것이다.

본 연구에서는 GloSea5의 6개월 과거 기후 모의 자료와 일본기상청에서 제공하는 Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Kobayashi et al., 2015) 재분석 자료의 비교를 통해 GloSea5 모형의 예측성을 평가하였다. JRA-55 자료는 위도 2.5°와 경도 2.5°의 수평 해상도와 총 37개의 연직층을 가진다. 이를 바탕으로 재분석 자료와 해상도를 통일하기 위해 GloSea5 자료를 위경도 2.5로 선형 내삽하였고, 두 자료에서 공통으로 존재하는 17개 연직층(1000-5 hPa)에 대해 분석하였다.

분석 시 전반적인 온도 예측성을 살펴보기 위해 대기온도(Air Temperature, T)를 사용하였고, 기후 지수 분석 시 대류권 예측성을 위해 지표온도(Surface Temperature, TS)와 해면기압(Sea Level Pressure, SLP)을 사용하였다. 또한 성층권 예측성을 위해 50 hPa의 동서바람(Zonal Wind, U)과 지위고도(Geopotential Height, Z) 자료를 사용하였다. 본 연구에서 예측성을 평가한 대류권 및 성층권을 대표하는 기후 지수들의 정의는 Table 2와 같다.

3. 예측성 평가 방법

모형 자료를 이용하여 Table 2에서 언급한 지수들

을 구하면 적분 시간이 증가할 수록 재분석 자료와의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 오차는 무작위적으로 생성되지 않고 모형 내의 환경을 따라가면서 일련의 규칙성을 가진다. GloSea5가 가지는 모형의 구조적 오차에 관해서는 4장에서 자세히 다루었다.

본 연구에서는 앞서 언급한 모형의 구조적 오차를 제거한 후 분석을 수행하였다. 예측성 평가에는 평가 인자로서 이상상관계수(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)와 평균제곱근 숙련도(Mean Squared Skill Score, MSSS)를 사용하였다(Goddard et al., 2013; Jung et al., 2015).

$$ACC(i, \tau) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [H_{ijt} - \bar{H}_{it}] [O_{ijt} - \bar{O}_{it}]}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [H_{ijt} - \bar{H}_{it}]^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [O_{ijt} - \bar{O}_{it}]^2}}$$

i 는 각 월에 해당하는 값(1~12)이고, j 는 분석기간인 총 14년(1996~2009년) 동안 각 해에 해당하는 값($j=1\sim 14$)으로 본 연구에서 N 은 14이다. τ 는 각 lead time에 해당하는 값($\tau=0\sim 5$)을 의미한다. 앞서 말하였듯 lead time은 예측 시점과 초기화 시점의 시간상 차이를 나타내며, 본 연구에서는 총 6개월의 적분 값을 사용하였기 때문에 lead time 은 0~5의 값을 가진다. H_{ijt} 는 각 월과 년도 및 lead time에 맞는 모형 값을 의미하며 O_{ijt} 는 H_{ijt} 와 동일한 시기의 재분석 자료 값을 의미한다. \bar{H}_{it} 와 \bar{O}_{it} 는 각 월별 lead time에 따른 총 14년 동안의 평균이다. 일례로 1월의 lead time 0에 해당하는 자료들의 ACC는 $ACC(1, 0)$ 로 나타낼 수 있다.

MSSS는 다음과 같이 정의하였다.

$$MSSS(i, \tau) = ACC(i, \tau)^2 - (ACC(i, \tau) - (s(i, \tau)_H / s(i, \tau)_O))^2$$

$$s(i, \tau)_H^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (H_{ijt} - \bar{H}_{it})^2,$$

$$s(i, \tau)_O^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (O_{ijt} - \bar{O}_{it})^2$$

ACC는 모형과 재분석 자료의 선형 상관관계에 대한 진단 변수로 -1에서 1 사이의 값을 가진다. 이 때, 선

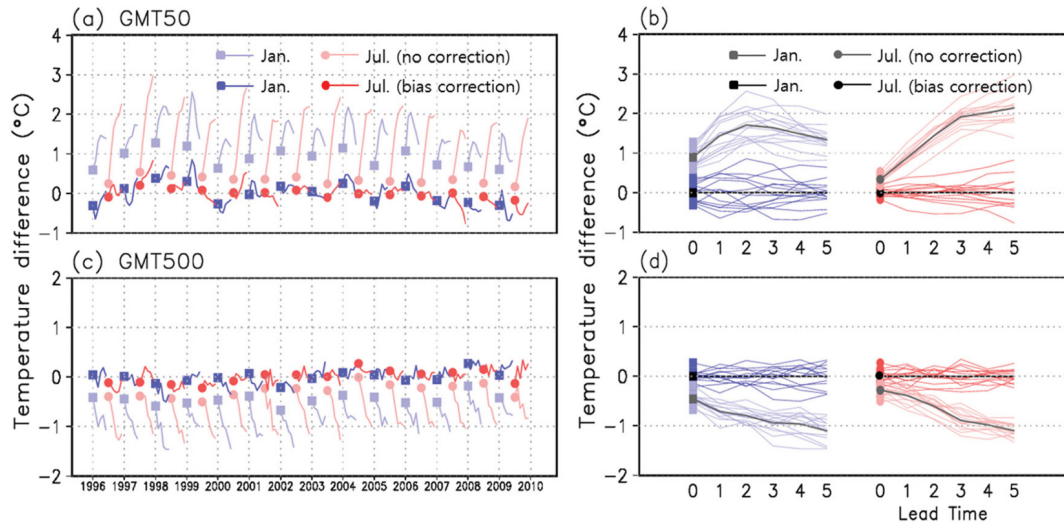


Fig. 1. Time series of GMT (Global Mean air Temperature) anomaly at (a) 50 and (c) 500 hPa for January and July predictions before (sky blue and light pink) and after (blue and red) bias correction. Long-term mean of January and July predictions at (b) 50 and (d) 500 hPa from 1996 to 2009. Initialized months are indicated by squares and circles.

형 상관관계가 높을수록 ACC가 1에 가까워지며 이는 모형의 예측성이 우수함을 의미한다. MSSS는 ACC 및 모형과 재분석 자료의 분산 비율에 관한 함수로 ACC가 고려하지 못한 두 자료간의 분산 차이를 고려할 수 있다. 괄호 안의 식 $ACC(i, \tau) - (s(i, \tau)_H / s(i, \tau)_O)$ 은 조건부 오차(conditional bias)로 모형과 재분석 자료의 시간에 따른 변화 경향성이 다를 때 그 값이 커진다. 따라서 조건부 오차가 커질수록 MSSS는 ACC보다 작아지며 1에 가까울수록 모형의 예측성이 우수함을 의미한다.

예측성 평가 시 사용한 자료는 월 및 lead time에 따라 14개의 자료(총 14년)를 가진다. 이처럼 적은 표본수로 평가한 MSSS와 ACC는 통계적으로 유의한지에 대한 평가가 반드시 이뤄져야 한다. 따라서 예측성 평가 인자의 통계적 유의성을 평가하기 위해 Goddard et al. (2013)이 제안한 bootstrap 기반의 방법을 사용하였다. 보다 자세히 설명하면 같은 기간 내 중복을 허용하여 무작위적으로 추출한 자료를 재분석 자료와 비교하여 ACC와 MSSS를 구하였으며 이와 같은 표본 추출 과정을 1,000번 반복하였다. 1,000번을 수행한 후 나온 평가 인자가 각 '0' 이상의 값을 몇 번 가지는지 그 비율을 계산하여 신뢰 수준을 정하였다. 이러한 신뢰 수준을 바탕으로 본 연구에서는 ACC가 95% 이상의 신뢰도를 가지는 동시에 그 값이 0.5 이상을 만족하여야 신뢰할 수 있다고 평가하였다. 또한 MSSS는 95% 이상의 신뢰도와 그 값이 0.0 이상을 동시에 만족하여야 신뢰할 수 있다고 평가하였다.

4. 모형의 구조적 오차

모형 예측 결과는 적분 시간이 증가할수록 외부 강제력 없이도 모형 환경을 따라가는 일련의 경향성을 가지며 이는 기후 표류(climate drift)라 한다(Gupta et al., 2012). 이러한 경향성은 예측 시, 재분석 자료와의 차이를 일으키는 중요한 요인으로 작용하기 때문에 본 연구에서는 예측성 평가를 수행하기 전 모형의 구조적 오차를 제거해 주었으며 자세한 식은 아래와 같다(Smith et al., 2013).

$$H'_{ij\tau} = H_{ij\tau} - (\bar{H}_{i\tau} - \bar{O}_{i\tau})$$

모형 결과인 $H_{ij\tau}$ 에서 모형과 재분석 자료의 평균을 이용하여 구조적 오차를 제거하면 H'_j 를 구할 수 있으며, 이를 모형 오차 수정(bias correction)이라고 한다.

GloSea5 자료에서 모형 오차 수정을 통해 drift가 제거된 자료는 Fig. 1과 같다. (a)와 (c)는 50 hPa과 500 hPa 에서 전지구 평균된 기온의 차이이다. 하늘색과 분홍색 실선은 각각 1월과 7월에 예측을 시작하는 모형 자료와 재분석 자료의 차이를 나타낸다. 두 자료의 값이 같을수록 '0'에 가까워지는 점을 고려하면 lead time에 따라 drift 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 파란색과 빨간색 실선은 모형 오차 수정을 통해 보정한 모형 자료와 재분석 자료의 차이를 나타낸다. 이를 통해 drift가 효과적으로 제거되었음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 더 효과적인 예측성 평가를 위해 분석 전 모형 자료의 구조적 오차를 보

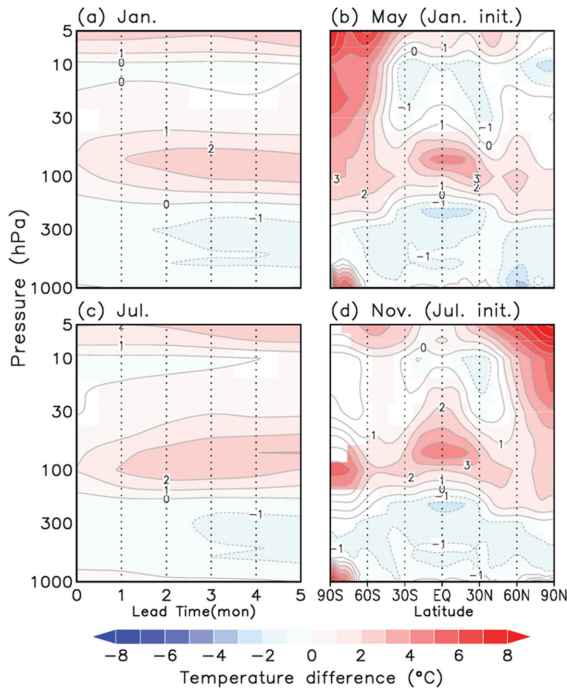


Fig. 2. GMT bias for (a) January and (c) July predictions as a function of lead time and pressure level. Vertical structure of temperature bias at lead time 4 for (b) January and (d) July predictions.

정하여 climate drift의 영향을 최소화하였다.

앞서 언급한 GloSea5의 구조적 오차가 일련의 경향성을 가지고 있는지 살펴보기 위해 1월과 7월의 초기장으로 예측한 모형에서 나타나는 오차를 분석해 보았다(Fig. 1). Figure 1(b)와 (d)의 검정색 실선은 총 14년의 분석기간 동안 1월과 7월에 해당하는 기온 차이를 평균한 것이다. 이를 통해 예측 년도에 상관없이 각 월별로 비슷한 양상의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 성층권을 대표하는 50 hPa의 경우, lead time이 증가함에 따라 모형이 재분석 자료보다 과대 모의되어 양의 경향성을 보여준다. 반면 대류권을 대표하는 500 hPa의 경우, 과소 모의되어 음의 경향성을 보여주고 있다. 이러한 경향성은 lead time에 따라 증가하기도 하지만 어느 시점 이후로 감소하는 독특한 경향도 보여준다. 결론적으로 GloSea5의 구조적 오차는 계절 및 연직 고도에 따라 일련의 경향성을 가지고 있다.

성층권(혹은 대류권)의 예측이 전반적으로 과대(혹은 과소) 모의되는지 확인해 보기 위해 Fig. 1의 검정색 실선이 가지는 값을 연직적으로 구해보았다(Fig. 2). 1월과 7월의 연직분포도(Fig. 2(a), (c))를 보면 lead time이 증가할수록 모형과 재분석 자료의 기온 차이

가 커지고 있음을 확인할 수 있다. Figure 2(b)와 (d)는 각각 5월과 11월의 예측 자료가 위도 및 고도별로 어떠한 구조적 오차를 가지고 있는지 보여준다. 이 두 시기는 1월과 7월의 초기장을 사용하여 적분한 시기로 lead time 4에 해당한다. 양의 값은 모형이 재분석 자료보다 기온을 더 따뜻하게 모의하고 있음을 의미하고, 음의 값은 더 차갑게 모의하고 있음을 의미한다. 성층권 하부는 대류권계면을 따라 오차가 크게 나타나며 특히 적도 부근에서 큰 양의 값을 보인다. 가능성 있는 오차 원인으로는 그림으로 보이지 않았으나, 초기값에 비해 낮아진 대류권계면과 관련된 것으로 추정할 수 있으며, 연직운동의 모의능력 또한 오차를 발생할 수 있는 요인인 것으로 판단된다. 보다 명확한 원인을 이해하기 위해서는 추후 연구가 필요하다.

GloSea5의 구조적 오차는 계절에 따른 특징도 가지고 있다. 계절에 따른 차이를 분석한 결과 우선 극성층권의 경우, 겨울반구의 기온이 여름반구에 비해 더 과대 모의되었다. 이는 모형의 예측 모의과정에서 겨울철 장파 복사를 과대 모의하고 있음을 시사한다. 또한 모형의 오존량이 실제보다 과다하게 모의되었을 경우, 여름반구 성층권의 기온을 과대 모의할 수 있다. Figure 2(b)와 (d)에 나타난 여름반구 고위도 하부 성층권 양의 편차가 오존과 관련이 있을 수 있다. 이러한 특정 위도 및 고도에서 나타나는 구조적 오차의 원인을 보다 정확하게 파악하기 위해서 추후 보다 심층적인 연구가 필요하다.

5. 기온 예측성

기온의 예측성을 평가하기 위해 성층권에 해당하는 50 hPa와 대류권에 해당하는 500 hPa에서의 예측성을 수평분포를 통해 살펴보았다(Fig. 3). Figure 3(a)는 50 hPa에서 1월, 4월, 7월 그리고 10월의 초기장으로 예측한 기온의 예측성을 lead time별로 보여준다. 붉은 색에 가까울수록 ACC가 '1'에 가까움을 의미하며 통계적으로 유의하지 않은 지역의 경우 흰색으로 처리하였다. 실선은 MSSS가 통계적으로 유의한 지역을 나타낸다. 따라서 ACC와 MSSS가 모두 유의미하게 표시된 지역은 통계적으로 유의한 수준에서 기온의 예측이 가능한 곳이다. 조건부 오차를 고려한 MSSS의 경우, 오차가 클수록 ACC를 감소시키기 때문에 그 값이 ACC보다 작게 나타난다. 따라서 ACC가 0.5 이상이나 실선이 존재하지 않는 지역은 증가 혹은 감소의 경향성은 예측 가능하나 경향성을 제거한 변동은 예측하기 어려운 곳이다.

Figure 3(a)를 살펴보면 전반적으로 lead time이 증가할수록 ACC가 감소한다. 지역적으로 살펴보면 적도의 기온 예측성이 가장 높게 나타나며 lead time이

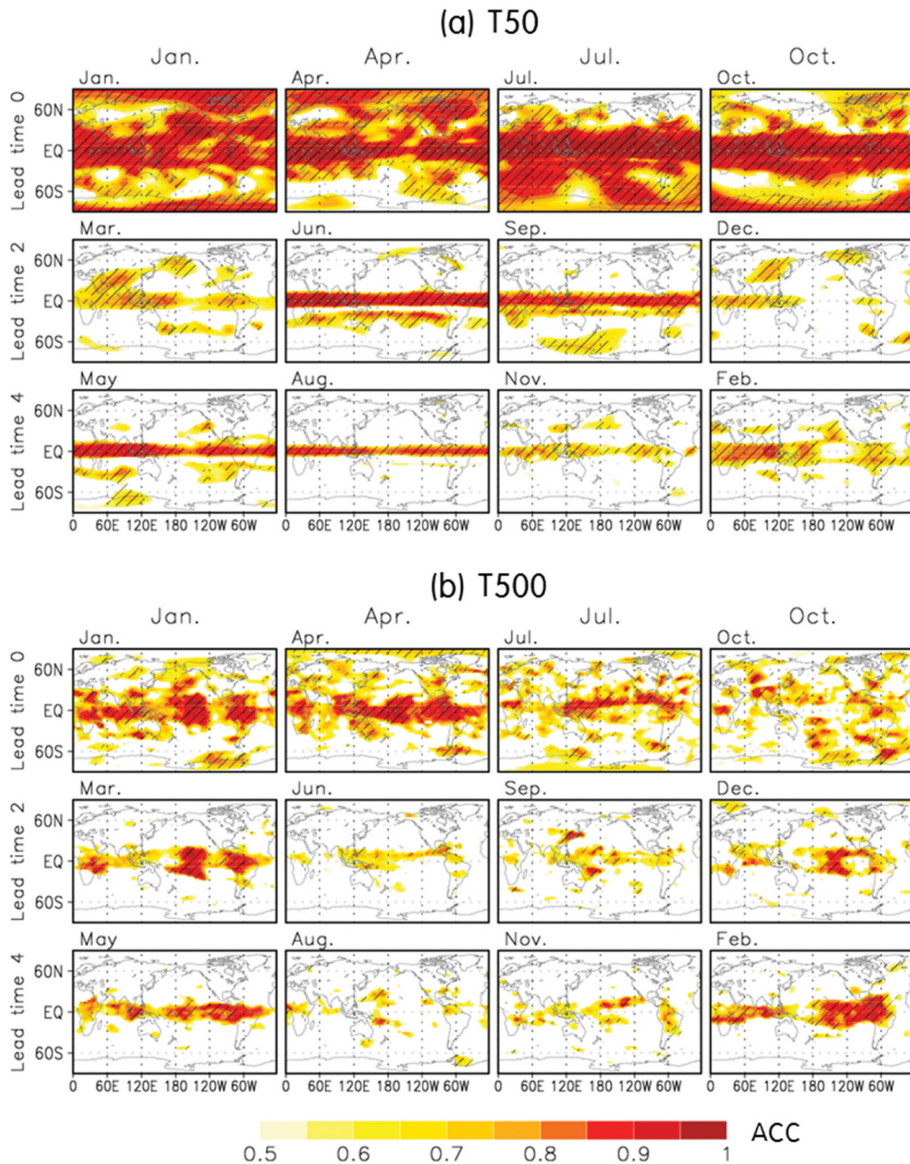


Fig. 3. Spatial map of ACC and MSSS for (top) T50 and (bottom) T500 predictions in January, April, July and November for lead time 0, 2, 4. The ACCs that are greater than 0.5 and statistically significant at the 95% confidence level are shaded. The regions where MSSSs are greater than 0 and statistically significant are further striped.

증가하여도 높게 유지되어 6개월 이상 예측이 가능하다. 반면, 중위도의 예측성은 lead time 0에도 다른 위도에 비해 굉장히 낮게 나타나며 고위도의 예측성은 lead time 0에서 높으나 적도에 비해 굉장히 빠르게 감소한다. 500 hPa 기온의 예측성 또한 50 hPa에서의 예측성과 마찬가지로 적도에서 높게 나타나며 일부 지역의 경우 6개월 이상 지속됨을 알 수 있다(Fig. 3(b)). 또한 적도를 제외한 지역의 예측성은 lead time

0을 제외하면 급격하게 감소한다. 다만 대류권의 경우, 성층권에 비해 전반적으로 낮은 ACC와 MSSS를 보이고 있으며 lead time에 따라 예측성이 감소하는 현상도 두드러지게 나타난다. 따라서 성층권의 예측성이 대류권보다 더 높음을 알 수 있다.

Figure 4는 1월, 4월, 7월 그리고 11월의 초기장으로 예측된 동서 평균 기온의 예측성을 연직적으로 살펴봐왔으며 이를 lead time별로 나타내었다. 앞서 Fig.

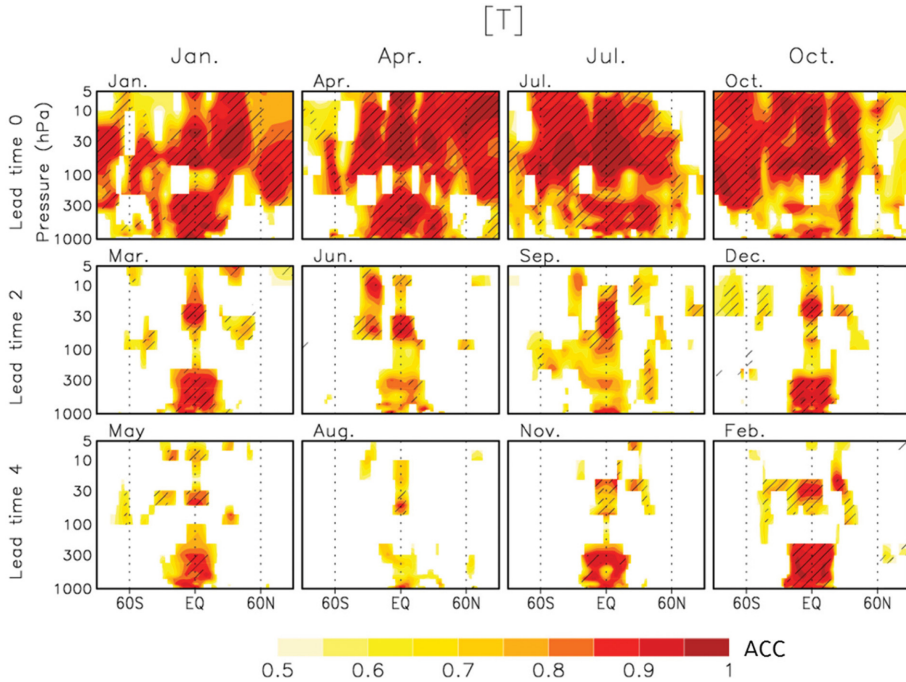


Fig. 4. Same as Fig. 3. but for the vertical structure of [T] prediction.

3에서 설명하였듯이 lead time 0을 보면 성층권의 예측성이 대류권의 예측성보다 전반적으로 높게 나타난다. 또한 lead time이 커짐에 따라 적도 대류권의 500 hPa 과 적도 성층권의 30 hPa 부근의 예측성이 높다. 30 hPa의 온도장에서 나타난 예측성은 50 hPa 순환장에서 보인 준2년주기진동의 예측성과 상관이 있을 것으로 추측된다 (Collimore et al., 2003). 이처럼 높은 예측성을 가지는 적도에서도 대류권계면을 따라가는 성층권 하부에서 예측성이 급격히 낮아지는데 이 고도는 Fig. 2에서 구조적 오차가 크게 존재하는 고도와 일치한다. 따라서 다른 고도에 비해 다소 변동성이 큰 대류권계면 부근은 예측이 어려우며 그 원인은 모형을 가지는 구조적 오차의 크기와 관련이 있는 것으로 보인다.

6. 성층권 예측성

성층권 자연변동성의 변화는 성층권뿐만 아니라 대류권까지 영향을 미칠 수 있으며 그 영향이 지역적으로 엘니뇨-남방진동의 영향에 비견되기도 한다 (Thompson et al., 2002). 이와 관련하여 성층권의 예측성이 어느 수준인지 인지하고 문제점을 파악하는 것은 중요한 이슈이다.

성층권의 자연변동성은 대표적으로 적도 성층권의

경년변동인 준2년주기진동과 극 성층권의 극소용돌이 변화가 있다. 준2년주기진동은 열대 적도 성층권의 동서방향 바람이 동풍에서 서풍으로 약 28개월 주기를 가지고 번갈아 나타나는 장주기 변동성으로, 성층권의 온도와 동서바람장의 구조에 결정적인 역할을 한다. 열대 성층권 구조의 변화는 극 성층권을 통하여 중·고위도 대류권의 순환장에 간접적으로 영향을 미치기도 하며, 대류권 열대지역의 깊은 대류 현상의 발달의 강도에 직접적으로 영향을 주기도 한다(Collimore et al., 2003; Holton and Tan, 1980). 최근 연구에 따르면, 이와 같이 직접적인 영향을 주는 역학과정으로 인해, 준2년주기진동의 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)에 대한 영향 가능성이 제기되었다 (Yoo and Son, 2016). 따라서 준2년주기진동에 대한 이해와 예측성 향상이 원격 상관을 통해 전지구 대류권의 예측성 또한 향상시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

성층권의 극소용돌이는 적도-극지역간 태양 복사의 차이로 인한 온도 차이와 온도풍 균형을 통해 발달한 극 지역의 강한 서풍과 관련된 저기압성 회전을 의미한다. 적도-극지역간 온도차이가 가장 큰 겨울반구에 특히 강하며, 성층권 돌연승온과도 밀접하게 연관되어 있다(Holton and Mass, 1976). 성층권 돌연승온은 성층권 극소용돌이가 대류권에서부터 연직방향으로

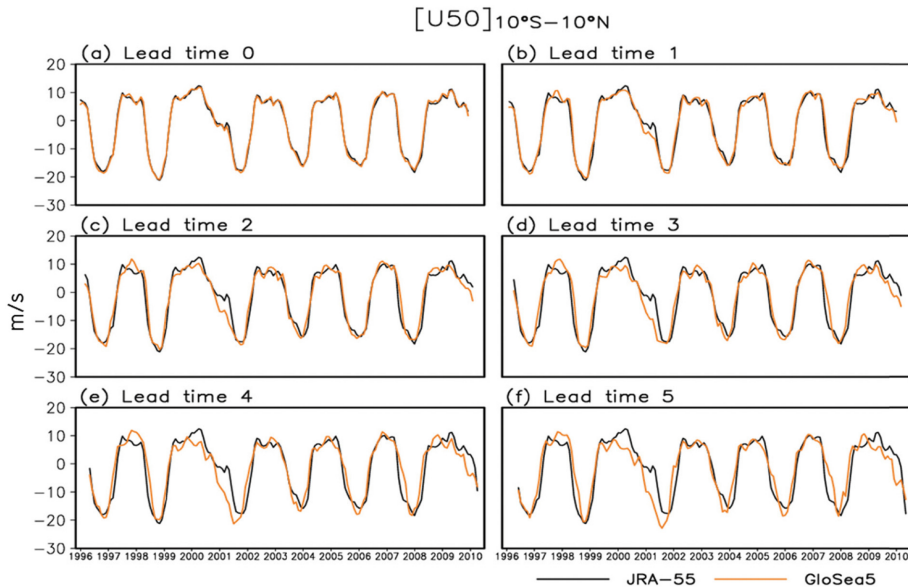


Fig. 5. Time series of QBO index from JRA-55 (black) and GloSea5 (orange) at each lead time.

전파해운 파동의 에디-평균류 상호작용으로 인해 급격히 약해지고, 서풍에서 동풍으로 동서방향 바람장이 급격히 변하면서 수 일 만에 40도 이상의 기온 상승이 발생하는 현상이다(Shindell et al., 2001). 이러한 변화는 대류권 하부의 북극 진동 패턴의 변화를 이끌어 북반구 중·고위도 기후에 지대한 영향을 미친다(Baldwin and Dunkerton, 2001; Thompson et al., 2002).

본 연구에서는 준2년주기진동과 극소용돌이의 계절 변동성을 1차적으로 살펴보았다. 준2년주기진동 지수는 10°S-10°N에 해당하는 50 hPa 동서바람의 동서평균으로 정의하였다. 이 지수는 적도 성층권의 변동성을 대표하는 지수로 예측성이 높게 나타나면 적도 성층권의 예측성 또한 높다고 판단할 수 있다. Figure 5는 GloSea5와 JRA-55 재분석 자료를 이용하여 lead time에 따라 준2년주기진동 지수를 구한 시계열이다. 검은색 실선은 재분석 자료를 주황색 실선은 모형 자료를 나타낸다. GloSea5는 준2년주기진동이 가지는 약 2년주기의 진동을 잘 모의하고 있으나 lead time이 커질수록 재분석 자료와 차이를 보인다. 그러나 그 차이가 크지 않아 2년주기의 진동을 제거하여도 예측성이 높게 나타난다. 따라서 GloSea5가 계절변동뿐 아니라 2년 주기 내에 존재하는 변동성 또한 잘 모의하는 것으로 보인다.

준2년주기진동이 적도 성층권을 대표하는 지수라면 극소용돌이 지수는 극 성층권의 변동성을 대표하는 지수이다. 극소용돌이는 65-90°N에 해당하는 50 hPa

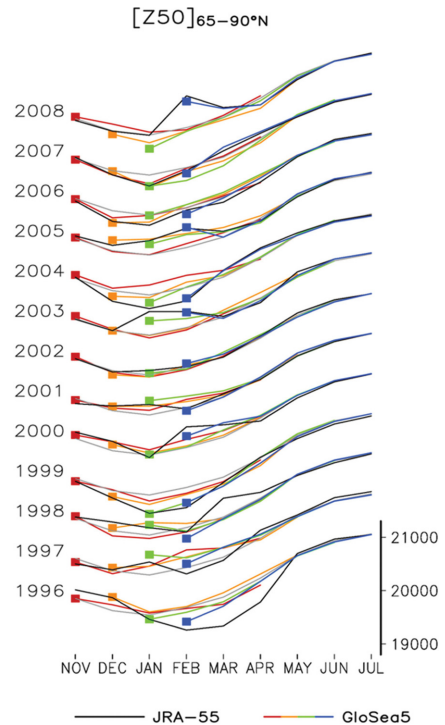


Fig. 6. Time series of NHPV index of JRA-55 (black) and GloSea5 in November (red), December (orange), January (green) and February (blue) in each year. Gray line indicates the climatology. Squares indicate the initialized months in each year.

지위고도의 동서평균으로 정의할 수 있으며 준2년주기진동과는 다르게 1년 주기의 계절적 변화를 가진다. GloSea5의 겨울철 극소용돌이 지수를 보았을 때(Fig. 6), 대체적으로 재분석 자료(검은색 실선)를 잘 모의하는 것으로 나타난다. 하지만, 간혹 모형이 극소용돌이의 변화를 제대로 모사하지 못하는 경우가 있다. 일례로 2008년 11월과 12월 그리고 2009년 1월에 예측된 극소용돌이 지수의 시간변화를 보면, 유독 2009년 2월을 잘 모의하지 못한다. 또한, 1996년 11월과 12월 그리고 1997년 1월과 2월에 예측된 지수의 변화를 보았을 때, 이 역시 GloSea5에서 모의하지 못하고 있다. 이를 통해 GloSea5는 극한 값을 가지는 극소용돌이를 잘 모의하지 못하며, 기후값(회색 실선)을 따라가려는 경향성을 보인다. 특히 양의 극한 값을 가질 때는 주로 성층권 돌연승은 시기와 겹친다. 성층권 돌연승은은 계절내 시간 규모를 가지며 이 현상이 발생한 시기의 성층권 예측성은 최대 1달이 넘지 않는다(Tripathi et al., 2015). GloSea5 또한 계절내 변동성을 가지는 돌연승은 발생 시기에 극소용돌이 지수의 변화를 잘 모의하지 못하고 있다. 이러한 낮은 예측성은 약한 극소용돌이 시기뿐만 아니라, 강한 극소용돌이 시기에도 나타난다. 약한 극소용돌이에 해당하는 돌연승은 및 강한 극소용돌이 시기에는 기후 값에 비하여 겨울철 극 성층권의 변동성이 커지게 된다. 겨울철 극 성층권 변동성이 큰 시기에 상대적으로 변동성이 작은 시기에 비해 예측성이 낮아지는 것은 선행연구에서 언급된 바 있다(Ichimaru et al., 2016). 결론적으로 GloSea5는 대체적으로 극소용돌이 지수의 계절적 변화를 잘 모의하지만, 극소용돌이가 급격히 변하는 시기에는 이를 대부분 모의하지 못한다.

7. 대류권과 성층권의 비교

본 연구에서는 GloSea5가 모의한 성층권의 변동성을 분석하기 위해 적도 성층권의 경년변동인 준2년주기진동과 북반구 극 성층권의 극소용돌이 변화를 중점적으로 살펴보았다. 이러한 성층권 기후지수는 비슷한 위도의 기후변수로 정의되는 대류권 기후지수와 관련이 있을 것으로 추측된다. 따라서 준2년주기진동은 적도 대류권의 변동성을 대표하는 엘니뇨-남방진동과 극소용돌이는 고위도 대류권의 변동성을 대표하는 북극진동과의 비교를 통해 대류권의 예측성도 살펴보았다.

적도 대류권의 기후변동인자인 엘니뇨-남방진동(본 연구에서는 구체적으로 Nino3.4 지수를 다룸)은 적도 부근의 해양과 대기의 상호작용으로 인해 일어나는 경년변동성으로 적도의 수문기상학적 변수들에 직접적인 영향을 준다(Horel and Wallace, 1981; Poveda et

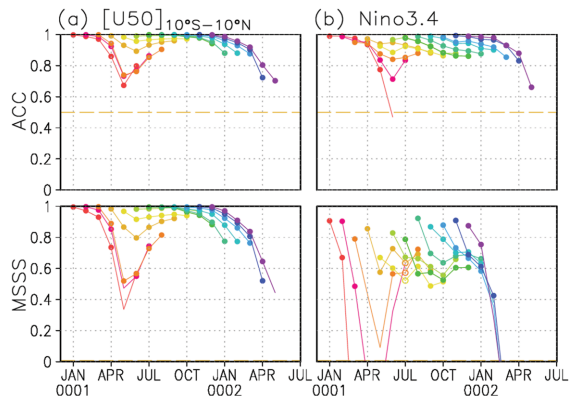


Fig. 7. The ACC and MSSS of (a) QBO and (b) Nino3.4 index predictions. Initialized month is indicated by the first circle in each month. Filled (open) circles denote the values that are statistically significant at the 95% (90%) confidence level.

al., 2001). 더 나아가 원격 상관을 통해 중위도 및 일부 고위도까지 영향을 주기도 한다(Rodo et al., 1997). 고위도 대류권의 기후변동을 설명하는 북극진동은 중위도와 극 지역 기압장의 상호 원격상관을 나타내는 현상으로 중위도 및 고위도 기후에 영향을 준다(Thompson and Wallace, 2000). 북극진동과 관련하여 고위도에 양의 아노말리가 존재하는 경우, 북대서양에 발생한 온도 이류에 의해 북유럽은 상대적으로 따뜻하고 습한 경향이 있고, 음의 아노말리가 존재하는 경우 이와 반대되는 현상이 나타난다. 이 북극진동은 북유럽뿐 아니라 동아시아 여름철 및 겨울철 몬순에 영향을 주기도 한다(Gong et al., 2001; Gong et al., 2011).

우선 GloSea5와 JRA-55 재분석 자료로 적도 변동성인 준2년주기진동과 Nino3.4 지수의 예측성을 평가하였다(Fig. 7). ACC와 MSSS의 예측성 평가에서 통계적으로 95% (90%) 유의수준 이상으로 유의한 것은 채워진 원(빈 원)으로 표시하였다. 빨간색부터 보라색 실선은 1월부터 12월의 초기장으로 적분하여 생산된 모형 자료로 평가한 예측성이다. 일례로 빨간색 실선 중 3번째 원은 1월의 초기장으로 예측한 3월의 예측성으로 1월의 lead time 2에 해당한다. ACC 평가를 통해 두 지수의 증가 혹은 감소 경향성이 6개월 이상 예측 가능함을 알 수 있다. 그리고 MSSS 평가를 살펴보면 준2년주기진동 지수는 여전히 6개월 이상 예측이 가능하나 Nino3.4 지수의 경우, 봄철 예측이 어렵다. 두 지수의 예측성 평가시, 평가 인자가 전반적으로 높게 나타나지만 lead time이 커질수록 그 값이 작아지며 계절적으로는 가을철에 예측성이 높다. 예

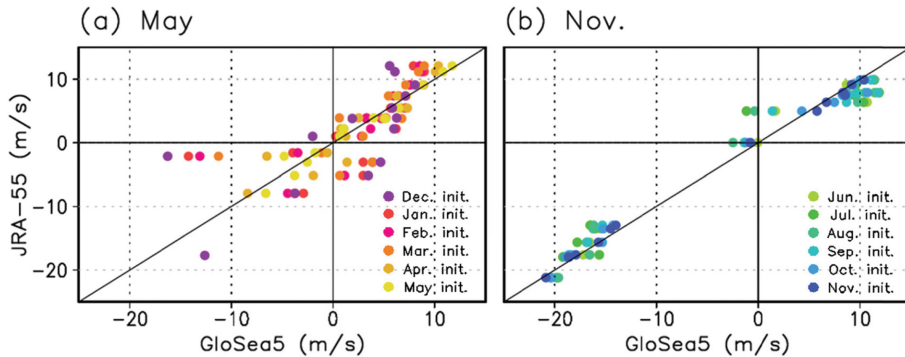


Fig. 8. The scatter plot of QBO index from GloSea5 and JRA-55 in (a) May predictions (poorly predicted) and (b) November predictions (well predicted).

측성이 낮은 봄철은 초기화 월에 따라 그 예측성의 퍼짐 정도가 다소 크게 나타난다. Scaife et al. (2014)은 30 hPa 준2년주기진동 지수를 이용하여, GloSea5의 준2년주기진동 예측성이 다른 계절에 비해 겨울철에 낮음을 보인바 있다. 준2년주기진동이 하층으로 내려가는 시간적 특성을 고려했을 때, 봄철 예측성이 낮은 본 연구의 결과는 Scaife et al. (2014)과 일관성이 있다.

Nino3.4의 예측성이 봄철에 감소하는 현상은 ‘엘니뇨-남방진동 봄철 예측성 장벽(ENSO spring predictability barrier)’이라고 한다. Moore and Kleeman (1996)은 이 현상의 원인을 ENSO의 성장률이 봄철에 크기 때문이라 본다. GloSea5의 Nino3.4 예측성은 봄철에 감소하였다 이후 다시 회복하는 ENSO spring predictability barrier를 보이며 준2년주기진동의 예측성도 이와 비슷한 회복 패턴을 보인다. 준2년주기진동은 동서바람 방향의 변화가 늦봄~여름철에 잘 나타나는 경향이 있으며(Dunkerton, 1990; Baldwin and Dunkerton, 2001), GloSea5 모형에서도 준2년주기진동의 위상이 4~7월에 집중적으로 바뀌었다. 이러한 현상으로 인해 이 지수의 예측성이 4~7월에 상대적으로 낮게 모의된 것으로 추정 하였다.

늦봄~여름철에 빈번한 동서바람 방향의 변화가 준2년주기진동의 예측성에 영향을 미치는지 확인하기 위해 5월과 11월 예측에 쓰인 GloSea5와 JRA-55 자료를 비교해 보았다. Figure 8은 예측성이 낮았던 5월과 높았던 11월의 준2년주기진동 지수로서 모형의 초기장으로 들어간 월에 따라 색으로 구분하였다. 예를 들어 14개의 보라색 원은 12월의 초기장으로 예측한 5월 예측으로 12월 예측의 lead time 5에 해당하는 총 14년간 준2년주기진동 지수이다. Figure 8을 통해 5월에 준2년주기진동의 위상이 집중적으로 바뀌고 GloSea5가 이를 잘 모의하지 못하는 것을 확인하였다. 반면

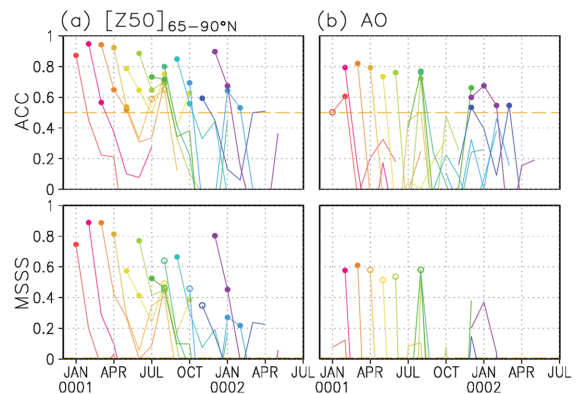


Fig. 9. Same as Fig. 7 but for (a) NHPV and (b) AO index predictions.

준2년주기진동이 강하게 발달한 11월의 준2년주기진동은 모형이 잘 모의하고 있으며 전반적으로 서풍보다 동풍의 준2년주기진동을 더 잘 모의하고 있다.

Figure 9는 극 및 고위도의 자연변동성을 보여줄 수 있는 극소용돌이와 북극진동 지수의 예측성을 보여준다. 두 지수 모두 lead time 0을 제외하면 통계적으로 유의한 예측성은 없는 것으로 진단되었다. 또한 늦겨울과 봄철의 예측성은 높고 가을철의 예측성은 낮은 계절적 특징을 보이며 이러한 계절적 차이는 ACC 뿐만 아니라 MSSS 평가에서도 동일하게 나타난다. 따라서 예측성의 지속력과 계절적 변화를 비교해 보았을 때, 두 지수의 예측성이 서로 연관되어 있는 것으로 보인다.

Figure 7과 Fig. 9를 살펴보면 결과적으로 대류권 지수의 예측성보다 성층권 지수의 예측성이 더 높게 나타난다. 이는 모형과 관측 자료의 선형 상관관계에 대한 예측성을 나타내는 ACC 뿐만 아니라 ACC 및 예측과 관측의 분산 비율을 고려한 MSSS에서도 두드

러지게 보인다. 즉, GloSea5 모형은 대기변수의 선형적인 경향성과 분산에 있어 대류권보다 성층권을 더 잘 모의한다.

8. 요약 및 토의

본 연구는 현업에서 활용중인 계절예측시스템 GloSea5의 6개월 과거기후 모의자료를 사용하여 성층권의 예측성에 대해 평가하였다. 예측성 평가인자로는 선형 상관관계를 나타내는 ACC와 분산차이를 고려한 MSSS를 사용하였다. 예측성을 평가하기 전, 기온 분석을 통해 GloSea5가 가지는 구조적 오차의 특성을 살펴보았다. GloSea5는 대류권을 다소 차갑게 모의하지만 성층권 하부는 따뜻하게 모의한다. 또한 겨울반구의 기온을 여름반구에 비해 더 과대 모의하고 있다. 이러한 구조적 오차의 특징은 모형의 물리과정 혹은 역학과정 등으로 야기될 수 있지만 본 연구에서 자세한 인과관계를 다루지 않았다. 구조적 오차를 제거한 모형 자료를 통해 기온의 예측성을 살펴보면 적도의 예측성이 가장 높게 나타난다.

성층권의 적도 변동성은 준2년주기진동 지수로 대표할 수 있고 대류권의 적도 변동성은 Nino3.4 지수로 대표할 수 있다. 그리고 성층권의 극 변동성은 극소용돌이 지수로 설명가능하며 대류권의 극 변동성은 북극진동 지수를 이용하여 그 예측성을 파악할 수 있다. 몇 개월 이상의 메모리를 가진 준2년주기진동과 Nino3.4의 예측성은 계절에 따른 차이가 존재하지만 전반적으로 ACC와 MSSS 평가에서 모두 95% 신뢰도 이상의 높은 결과를 보이며 6개월 이상 예측이 가능하다. 또한 봄철에 예측성이 감소하고 여름과 가을에 회복하는 현상도 비슷하게 나타난다. 반면 비교적 짧은 메모리를 가진 극소용돌이와 북극진동의 예측성은 대개 1달 정도로 짧게 나타난다. 이 두 지수 모두 늦겨울과 봄철의 예측성이 높은 계절적 특징이 나타나며 이를 통해 두 지수의 예측성이 서로 연관되어 있을 것으로 판단된다. 결론적으로 대류권과 성층권의 자연변동성을 설명하는 지수가 비슷한 위도를 대표한다면 두 지수는 연관이 있는 것으로 보인다. 본 연구에서는 성층권-대류권 지수의 연직적인 역학관계를 논의하지 않았으므로 이 역학과정을 살피고자 한다면 추후 연구가 진행되어야 한다.

성층권 및 대류권 기후지수의 예측성은 지역의 기후시스템을 바꾸어 경제활동에도 영향을 미치므로 그 예측성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 준2년주기진동과 Nino3.4 지수는 위도별 면적이 큰 적도의 변동성을 대표하므로 이 지수들의 높은 예측성은 전지구 평균된 기후변수의 예측성을 높이는데 핵심적인 역할을 한다. 이처럼 대기 및 해양의 현상에 대한 메모리

가 긴 지수는 비교적 오랜 기간에 걸쳐 변하므로 그 예측이 쉽다. GloSea5 모형에서도 대류권의 자연변동성을 대표하는 지수를 분석한 결과, 메모리가 긴 지수의 예측이 메모리가 짧은 지수에 비해 길게 나타난다(Jung et al., 2015). 따라서 예측성이 높은 지수는 다중 상관 관계 분석을 통해 모형의 전반적인 예측성 향상에 도움을 줄 수 있을 것이다. 또한 GloSea5의 성층권 예측성은 대류권에 비해 더 높게 나타나므로 이를 활용하면 대류권의 예측성을 높이는데 도움을 줄 것으로 기대된다. 따라서 이를 위해서 성층권-대류권의 역학과정에 대한 추가 연구가 요구된다.

성층권 돌연승온은 수 일 만에 기온이 급격히 상승하는 현상으로 준2년주기진동 및 극소용돌이와 마찬가지로 성층권의 자연변동성을 대표한다. 하지만 본 연구에서는 1달 이상의 계절적 시간 규모에서 GloSea5의 예측성을 평가하였기 때문에 성층권 돌연승온은 분석하지 않았다. 따라서 추후 성층권 돌연승온과 같이 1달 이내에 발생하는 시간 규모의 현상을 심층적으로 다룰 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 주요사업 “한영 공동기후예측시스템 진단체계 구축(III) (NIMR-2012-B-2)” 및 한국기상산업진흥원의 “겨울철 기후예측 정확도 향상을 위한 성층권 영향인자 기반 예측기술개발 (KMIPA 2015-2091-1)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- Collimore, C. C., D. W. Martin, M. H. Hitchman, A. Huesmann, and D. E. Waliser, 2003: On the relationship between the QBO and tropical deep convection. *J. Climate*, **16**, 2552-2568.
- Dunkerton, T. J., 1990: Annual variation of deseasonalized mean flow acceleration in the equatorial lower stratosphere. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **68**, 499-508.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597.
- Garfinkel, C. I., and D. L. Hartmann, 2011: The influence of the quasi-biennial oscillation on the troposphere in winter in a hierarchy of models. Part I: Simplified dry GCMs. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1273-1289.
- Gong, D.-Y., S. W. Wang, and J. H. Shu, 2001: East Asian winter monsoon and arctic oscillation. *Geophys. Res.*

- Lett.*, **28**, 2073-2076.
- _____, J. Yang, S.-J. Kim, Y. Gao, D. Guo, T. Zhou, and M. Hu, 2011: Spring arctic oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western north pacific. *Climate Dyn.*, **37**, 2199-2216.
- Gupta, S., A. P. Durack, J. N. Brown, S. E. Wijffels, D. Monselesan, and S. Phipps, 2012: Climate Drift in the CMIP3 models. *J. Climate*, **25**, 4621-4640.
- Holton, J. R., and C. Mass, 1976: Stratospheric vacillation cycles. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2218-2225.
- _____, and H.-C. Tan, 1980: The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2200-2208.
- Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1981: Planetary scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 773-788.
- Hurrell, J., A. M. Gerald, B. David, L. D. Thomas, K. Ben, and W. Bruce, 2009: A unified modeling approach to climate system prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1819-1832.
- Ichimaru, T., S. Noguchi, T. Hirooka, and H. Mukougawa, 2016: Predictability changes of stratospheric circulations in northern hemisphere winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**.
- Jin, E. K., and Coauthors, 2008: Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Climate Dyn.*, **31**, 647-664.
- Jung, M.-I., S.-W. Son, J. Choi, and H.-S. Kang, 2015: Assessment of 6-month lead prediction skill of the GloSea5 hindcast experiment. *Atmosphere*, **25**, 323-337 (in Korean with English abstract).
- Kidston, J., A. A. Scaife, S. C. Hardiman, D. M. Mitchell, N. Butchart, M. P. Baldwin, and L. J. Gray, 2015: Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nat. Geosci.*, **8**, 433-440.
- Kim, H.-M., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2012: Evaluation of short-term climate change prediction in multi-model CMIP5 decadal hindcasts. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L10701.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2014: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 1072-1084.
- Moore, A. M., and R. Kleeman, 1996: The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 1405-1446.
- Poveda, G., A. Jaramillo, M. M. Gil, N. Quiceno, and R. I. Mantilla, 2001: Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharge, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resour. Res.*, **37**, 2169-2178.
- Scaife, A. A., and Coauthors, 2014: Predictability of the quasi-biennial oscillation and its northern winter teleconnection on seasonal to decadal timescales. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1752-1758.
- Shindell, D. T., G. A. Schmidt, M. E. Mann, D. Rind, and A. Waple, 2001: Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, **294**, 2149-2152.
- Sigmond, M., J. F. Scinocca, V. V. Kharin, and T. G. Shepherd, 2013: Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. *Nat. Geosci.*, **6**, 98-102.
- Smith, D. M., R. Eade, and H. Pohlmann, 2013: A comparison of full-field and anomaly initialization for seasonal to decadal climate prediction. *Climate Dyn.*, **41**, 3325-3338.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- _____, M. P. Baldwin, and J. M. Wallace, 2002: Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *J. Climate*, **15**, 1421-1428.
- Tripathi, O. P., and Coauthors, 2015: The predictability of the extratropical stratosphere on monthly time-scales and its impact on the skill of tropospheric forecasts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 987-1003.
- Wang, B., and Coauthors, 2009: Advanced and prospectus of seasonal prediction: assessment of APCC/CLIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004). *Climate Dyn.*, **33**, 93-117.
- _____, B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2012: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, **110**, 2718-2722.
- Yoo, C., and S.-W. Son, 2016: Modulation of the boreal wintertime Madden-Julian Oscillation by the stratospheric Quasi-Biennial Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 1392-1398.