

GloSea5 모형의 계절내-계절 예측성 검증: Part 2. 성층권 돌연승온

송강현¹⁾ · 김혜라¹⁾ · 손석우^{1)*} · 김상욱¹⁾ · 강현석²⁾ · 현유경²⁾

¹⁾서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부, ²⁾국립기상과학원 지구시스템연구과

(접수일: 2018년 2월 20일, 수정일: 2018년 4월 3일, 게재확정일: 2018년 4월 27일)

Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Prediction of GloSea5 Model: Part 2. Stratospheric Sudden Warming

Kanghyun Song¹⁾, Hera Kim¹⁾, Seok-Woo Son^{1)*}, Sang-Wook Kim¹⁾,
Hyun-Suk Kang²⁾, and Yu-Kyung Hyun²⁾

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

²⁾Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 20 February 2018; revised 3 April 2018; accepted 27 April 2018)

Abstract The prediction skills of stratospheric sudden warming (SSW) events and its impacts on the tropospheric prediction skills in global seasonal forecasting system version 5 (GloSea5), an operating subseasonal-to-seasonal (S2S) model in Korea Meteorological Administration, are examined. The model successfully predicted SSW events with the maximum lead time of 11.8 and 13.2 days in terms of anomaly correlation coefficient (ACC) and mean squared skill score (MSSS), respectively. The prediction skills are mainly determined by phase error of zonal wavenumber 1 with a minor contribution of zonal wavenumber 2 error. It is also found that an enhanced prediction of SSW events tends to increase the tropospheric prediction skills. This result suggests that well-resolved stratospheric processes in GloSea5 can improve S2S prediction in the troposphere.

Key words: Stratospheric sudden warming, GloSea5, prediction skills, troposphere-stratosphere downward coupling

1. 서 론

최근 현업모형의 예측성능 향상을 위해 계절내~계절(subseasonal-to-seasonal; S2S) 시간규모에서의 예측성능의 중요성이 대두되기 시작하였다. S2S 예측성능에 대한 검증은 한계점에 봉착한 단/중기예보의 예측성을 향상시키고, 단/중기예보와 장기예보의 빈틈을 메우는 중요한 역할을 한다(예, Vitart et al., 2017). 이에 따라 S2S 시간규모의 예측성능을 검증하고 이를 향상

시키고자, WMO (World Meteorological Organization) 및 WCRP (World Climate Research Program) 등의 국제기구와 현업기관들이 협업하여 S2S 프로젝트를 시작하였다(Vitart et al., 2017). 국제적 흐름에 맞춰 한국에서는 국립기상과학원에서 도입한 한영 공동 기후예측시스템(global seasonal forecasting system; GloSea5)을 S2S 프로젝트에 참여시켜 S2S 예측성능에 관심을 두기 시작하였다.

극성층권 계절내진동으로 대표되는 성층권 돌연승온은 성층권-대류권 접합을 통해 최대 2달까지 대류권에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Baldwin and Dunkerton, 2001). 이러한 특성으로 인해 S2S 프로젝트 시작 이전에도 돌연승온의 예측성에 대한 연구는 상당부분 진행되어 왔다(예, Tripathi et al., 2015a). 돌

*Corresponding Author: Seok-Woo Son, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: [redacted] Fax: +82-2-883-4972
E-mail: seokwooson@snu.ac.kr

연승온의 경우 최소 수 일부터 최대 한달 전에 예측 가능성이 밝혀졌으며, 돌연승온 발생 후 성층권-대류권 접합 과정도 모형에서 예측됨이 밝혀졌다(Sigmond et al., 2013). 최근에는 현업모형에서 돌연승온이 발생한 시기에 대류권의 북반구환형모드(northern annular mode; NAM) 예측성능이 향상될 수 있음이 알려지면서(Tripathi et al., 2015b), 돌연승온 및 그와 연관된 대류권 접합과정에 대한 예측성 분석의 중요성이 더욱 부각되기 시작하였다. 이렇게 돌연승온 및 이에 따른 대류권 예측성 향상에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있는 상황에서, 국내 현업모형인 GloSea5에 대해서는 돌연승온 및 그에 따르는 대류권 예측성능에 관한 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다.

또한 대부분의 돌연승온 예측성 연구들은 통계 기술 혹은 돌연승온 사례 선정에서 다소 아쉬움이 있었다. 정량화된 통계 기술로 돌연승온 예측성을 분석한 경우에는 사례가 부족하여 통계적 유의성을 논하기 어려웠으며(Mukougawa and Hirooka, 2004; Marshall and Scaife, 2010; Noguchi et al., 2016), 다양한 사례에 대한 연구에서는 돌연승온 모의에서 발생한 정성적인 오차에 대해서만 논의하는 등 정량적인 예측성에 대한 논의가 부족하였다(Taguchi, 2015).

이에 따라 본 연구에서는 GloSea5 과거기후 모의자료에서 정량화된 통계 기술인 평균제곱근 예측성(mean squared skill score; MSSS) 및 이상상관계수(anomaly correlation coefficient; ACC)를 이용하였으며, 유의미한 예측성을 검증하기 위해 18개 돌연승온 사례에 대한 예측성을 검증하였다. 추가적으로 돌연승온 예측성 한계가 모형의 어떤 인자에 의해 기인하는지 살펴보고자 MSSS를 성분별로 나누어 분석하였다(예, Stan and Straus, 2009).

본 연구의 선행연구인 Kim et al. (2018)에서는 GloSea5의 중·고위도 예측성을 대류권부터 성층권까지 살펴보았으며, 예측성 한계에 대한 원인분석을 수행하였다. Kim et al. (2018) 분석에서 북반구 겨울철 극성층권의 강한 모형 오차가 확인되었는데, 이는 상당부분 성층권 돌연승온의 예측과 연관되어 있는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 이를 보다 정량적으로 검증하기 위해 돌연승온의 예측성에 대해 분석을 진행하였다. 추가적으로 예측 한계의 원인에 대해서 분석을 수행하였다. 마지막으로 선행연구에서 논의된 바와 같이, GloSea5에서도 돌연승온에 따르는 대류권 예측성능이 향상되는지 살펴보았다.

제시된 목표에 따라 GloSea5 과거기후 모의자료 및 재분석자료에 대한 정보를 2장에서 기술하였다. 또한 해당 장에서 돌연승온을 정의한 방법과 예측성능 검증 방법에 대해 자세히 기술하였다. 이어서 3장에서는 제시된 통계기술을 활용하여 GloSea5에서 나타난

돌연승온 예측성 및 예측성능의 한계를 부분적으로 규명하였다. 그리고 돌연승온이 발생함에 따라 발생하는 접합과정에 대한 논의를 진행하였으며, 대류권 예측성능과의 관계를 부분적으로 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 3장에서 제시된 결과에 대해 요약 및 정리하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 GloSea5 및 JRA-55 재분석 자료

돌연승온 예측성 평가를 위해 Kim et al. (2018)과 동일한 1991년부터 2010년까지의 GloSea5 과거기후 모형자료를 사용하였다. GloSea5는 $0.56^\circ \times 0.83^\circ$ 수평 격자 해상도와 85개 연직층으로 적분이 수행되었으며, 매 달 1일, 9일, 17일, 25일에 초기화되었다. 실험은 총 60일 동안 적분이 수행되었으며, 각각의 실험은 3개의 앙상블을 갖는다. 또한 S2S 프로젝트에서 제공하는 표준 연직 고도인 1000 hPa부터 10 hPa까지 10개에 해당하는 연직 자료만을 사용하였다. 재분석 자료와의 비교분석을 위해 모형 자료는 1.5° 로 선형 내삽하였다. 비교를 위한 재분석자료는 일본기상청에서 제공하는 JRA-55 (Japanese reanalysis 55-years) 재분석 자료(Kobayashi et al., 2015)를 사용하였으며, 극소용돌이의 변화에 대한 예측성능을 평가하기 위해 지위고도 자료를 주로 사용하였다. 사용된 재분석자료는 총 37개의 연직층을 갖으며, GloSea5에서 사용하는 10개의 연직층과 같은 층을 공유한다. 비록 GloSea5가 ERA-Interim 재분석자료로 초기화되었지만, 선행연구와의 일관성을 위해 JRA-55 재분석자료와 비교 분석하였다[See the details in Kim et al. (2018)].

2.2 성층권 돌연승온의 정의

기존 연구에서 돌연승온은 다양한 방법으로 정의되며(예, Butler et al., 2015), 그 중 성층권 특정 고도와 위도(10 hPa, 60°N)에서의 동서평균 동서바람의 역전이 대표적으로 많이 사용되고 있다(Charlton and Polvani, 2007). 하지만, 해당 정의는 일부 다른 정의와 달리 1980-90년대 돌연승온이 정의되지 않는 장기변동성을 보이기 때문에(Butler et al., 2015), GloSea5의 과거기후 모의자료 기간 동안(1990-2010년) 돌연승온 사례를 충분히 확보하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 사례 확장을 통한 통계적 유의성을 확보하기 위해, 동서바람 역전 정의가 아닌 Kolstad et al. (2010) 및 Woo et al. (2015)에서 제시한 극 지역 평균 지위고도 아노말리(polar-cap geopotential height index; PCI)를 고려한 돌연승온 정의를 사용하였다(Song et al., 2015). 여기에서 사용한 PCI는 구체적으로 북위 65° 에서 90° 까지 지역평균된 지위고도 아노말리의

Table 1. Central date of SSW events for the period of 1991~2010.

Number	SSW onset date
1	03 FEB 1991
2	13 JAN 1992
3	31 DEC 1993
4	01 FEB 1995
5	24 DEC 1997
6	13 DEC 1998
7	25 FEB 1999
8	14 DEC 2000
9	07 FEB 2001
10	23 DEC 2001
11	18 FEB 2002
12	16 JAN 2003
13	22 DEC 2003
14	11 JAN 2006
15	24 FEB 2007
16	22 FEB 2008
17	22 JAN 2009
18	26 JAN 2010

값을 의미한다. Song et al. (2015)에 따르면 PCI에 기반한 돌연승온 정의가 동서평균 동서바람 정의(Charlton and Polvani, 2007)와 합성장 분석에서 큰 차이가 없음을 밝혔기 때문에, 본 연구에서도 동서바람 정의 대신 PCI 정의를 사용함에 무리가 없다고 판단하였다. 돌연승온 발생일은 10 hPa PCI 값이 전체 기간 동안 정의된 겨울철 PCI의 90 백분위수 값보다 커지는 첫 번째 날로 정의하였으며, 돌연승온에 따르는 작은 요란이 돌연승온으로 정의되는 것을 방지하고자 서로 다른 돌연승온의 간격은 최소 30일이 되도록 하였다. 보다 자세한 방법론은 Song et al. (2015)에 기술되어 있으며, Song et al. (2015)와 달리 50 hPa이 아닌 10 hPa PCI를 기준으로 돌연승온을 사용하였다. 50 hPa를 사용하더라도 돌연승온 발생일에 큰 차이가 없기 때문에, 50 hPa PCI를 사용하더라도 본 연구의 결과와 큰 차이가 없음을 밝힌다. PCI 정의는 특정 위도의 순환이 아닌 극 지역 전반에 일어나는 극소용돌이 변화를 고려하였기 때문에 극소용돌이의 변화를 포함한 예측성 검정 방법인 MSSS 및 ACC와 일관성을 보여주는 장점이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 1991년부터 2010년 동안 정의된 18개의 돌연승온을 사용하였다(Table 1).

2.3 예측성 진단 기술

GloSea5 과거기후 모의실험에서 돌연승온 예측성을 검정하기 위해 Kim et al. (2018)에서 사용된 ACC 및 MSSS 기반의 예측성 검정방법을 사용하였다(Goddard

et al., 2013; Choi et al., 2016). 보다 구체적으로 북위 30도에서 90도까지의 10 hPa 지위고도장을 기반으로 구한 ACC 및 MSSS가 돌연승온 발생일까지 0.6 및 0.0 이상을 유지하였을 때, 해당 실험은 돌연승온을 예측한 것으로 간주하였다. 돌연승온이 예측된 실험 중 가장 먼저 초기화가 이루어진 실험이 돌연승온을 예측할 수 있는 한계에 해당하므로, 해당 초기화 일로부터 돌연승온 발생일과의 차이를 돌연승온의 예측성으로 정의하였다.

두 진단 기술은 돌연승온 발생시기에 성층권 극소용돌이의 강도 및 패턴을 모형에서 어느 정도 모의하는지를 정량적으로 보여준다. ACC는 기후값이 제거된 야노말리를 기반으로 계산되며, MSSS는 평균제곱오차(mean squared error; MSE)를 기반으로 계산된다. 그렇기 때문에 ACC는 극소용돌이 패턴의 오차를 대변할 수 있으며, MSSS는 극소용돌이의 강도의 오차를 대변할 수 있다(Ichimaru et al., 2016). 여기서 ACC 및 MSSS 계산시 북위 30도에서 90도까지를 계산영역으로 고려하였다. ACC와 MSSS에 대한 계산은 Kim et al. (2018)에서와 동일하며, 보다 자세한 방법론은 Kim et al. (2018)을 참고하면 된다. 본 연구에서는 MSSS를 기준으로 자세한 분석을 진행하였기 때문에, MSSS 예측 기술에 대해 아래에 자세히 기술하였다.

여기서 MSSS는 Eq. 1에서와 같이 관측에서 나타난 지위고도장의 변동성으로 표준화된 MSE를 1에서 뺀 값으로 정의된다(Choi et al., 2016).

$$MSSS(\tau) = 1 - \frac{MSE_M(\tau)}{MSE_O(\tau)} \tag{1}$$

$$MSE_M(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_{M,i}(\tau) - Z_{O,i}(\tau))^2 \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i} \quad \text{and}$$

$$MSE_O(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_{O,i}(\tau) - Z_{C,i}(\tau))^2 \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i}$$

여기에서 i, N, τ 그리고 θ 는 각각 격자 지점, 전체 격자 수, 적분 시간, 위도를 의미한다. 또한 M, O 는 각각 모형과 재분석자료에서 얻은 결과를, Z 는 지위고도를 의미한다. 계산된 N 은 북위 30도부터 90도까지 1.5도 간격의 격자로 구성된 지역에서의 격자 개수에 해당한다.

Kim et al. (2018)에서 기술된 바와 같이, MSSS 정의에 사용된 MSE는 동서평균 오차와 에디 오차로 나눌 수 있으며, 에디 오차는 크기 오차와 위상 오차로 나눌 수 있다(Eq. 3; Stan and Straus, 2009). 추가적으

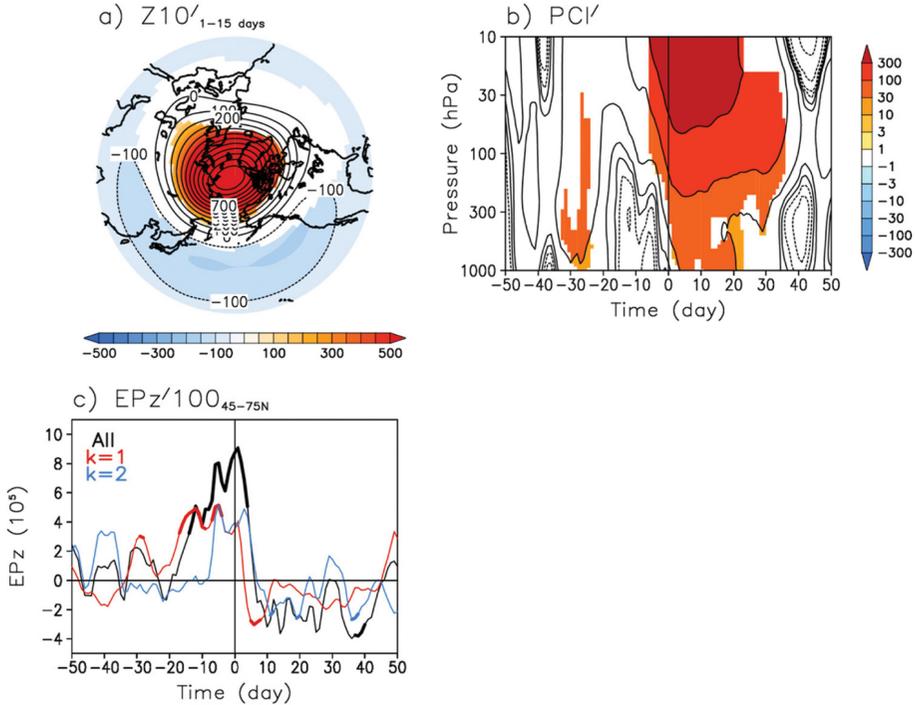


Fig. 1. (a) Geopotential height anomalies (m) at 10 hPa for 15 days after SSW onset date, (b) polar-cap averaged geopotential height anomalies (m), and (c) Eliassen-Palm flux anomalies ($\text{Pa m}^2 \text{s}^{-2}$) at 100 hPa averaged over 45–75°N. The shading and thick lines denote statistically significant values at 95% confidence level.

로 크기 및 위상 오차는 동서파수(k)에 따라 나눌 수 있다(Eqs. 3 and 4).

$$\frac{MSE_M(\tau)}{MSE_O(\tau)} = \frac{[MSE_M(\tau)]}{MSE_O(\tau)} + \frac{MSE_M(\tau)_{amp}^*}{MSE_O(\tau)} + \frac{MSE_M(\tau)_{phs}^*}{MSE_O(\tau)} \quad (2)$$

$$\frac{MSE_M(\tau)_{amp}^*}{MSE_O(\tau)} = \frac{MSE_M(\tau, k=1)_{amp}^*}{MSE_O(\tau)} + \frac{MSE_M(\tau, k=2)_{amp}^*}{MSE_O(\tau)} + \dots \quad (3)$$

$$\frac{MSE_M(\tau)_{phs}^*}{MSE_O(\tau)} = \frac{MSE_M(\tau, k=1)_{phs}^*}{MSE_O(\tau)} + \frac{MSE_M(\tau, k=2)_{phs}^*}{MSE_O(\tau)} + \dots \quad (4)$$

여기에서 $[\]$ 는 동서평균을 의미하며, *는 동서평균으로부터의 편차를 의미한다.

MSE를 성분별로 나누었을 때의 장점은 모형의 오차 원인을 정량적으로 분석할 수 있고, 향후 모형의 개선 방향을 제시할 수 있다는 점이다. 예를 들어 동서평균 오차의 경우 배경장의 오차를 의미하며, 성층권에서는 주로 모형의 물리과정과 파동의 비선형과정과 연관이 있다고 볼 수 있다. 에디 오차의 경우 주로 파동 모의와 연관된 모형의 역학과정과 관련이 있다고 볼 수 있다. 따라서 주된 모형 오차의 원인을 찾아낸다면 향후 필요한 모형의 개선사항을 부분적으로 제시할 수 있으며, 이를 통해 모형의 예측성을 향상

시킬 수 있을 것으로 보인다.

3. 결 과

Figure 1은 18개 돌연승온 사례에서 나타난 돌연승온 발생 후 15일 평균 지위고도 아노말리를 보여주며, 돌연승온 발생 전후 시간에 따른 PCI의 연직구조와 100-hPa Eliassen-Palm (EP) flux의 연직 성분을 보여 준다. 돌연승온 발생 후 15일 동안은 성층권에 누적된 파동에너지로 인한 극소용돌이 깨짐이 반영되기에 충분한 시간에 해당한다. 또한 10일 혹은 30일의 다른 시간 규모를 사용해도 결과에 큰 차이가 없음을 밝힌다. EP flux의 연직성분은 파동에너지의 전파를 의미하며, 극소용돌이의 변동성과 직접적으로 연관이 있는 변수로 알려져 있다(Polvani and Waugh, 2004). Figure 1a에서 확인할 수 있듯이 돌연승온 발생 후 15일 동안 극소용돌이가 약화된 것(양의 아노말리)을 알 수 있다. Figure 1a에서 보여주는 극 지역의 양의 지위고도 아노말리와 중위도의 음의 지위고도 아노말리는 음의 NAM과 유사한 구조를 보인다. 선행 연구에 따르면 PCI는 NAM과 -0.9 이상의 강한 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(Baldwin and Thompson,



Fig. 2. Spatial structure of polar vortex edge for SSW events in terms of 30-km geopotential height at 10 hPa from lag -7 to the onset date in JRA-55 (leftmost) and GloSea5. The contour colors denote the lead time from the onset date (rainbow and black). Each color in the titles indicates four different initializations (red, yellow, green, and purple).

2009). 따라서 돌연승은 발생 후 PCI의 연직구조를 살펴보면 NAM이 어떻게 변하는지 확인할 수 있다. 성층권에서 나타난 음의 NAM이 대류권에 어떻게 나타

나는지 확인하기 위해 PCI를 시간 변화에 따른 연직구조로 나타냈다(Fig. 1b). Figure 1b에서 확인할 수 있듯이 성층권에서 기인한 음의 NAM은 성층권-대류권



Fig. 2. Continued.

접합을 통해 통계적으로 유의한 수준의 음의 NAM이 대류권에 자리잡고 있다. 구체적으로 돌연승온 발생 후 하부 성층권에서는 유의한 수준의 PCI가 35일가량 유지되며, 대류권에서는 약 20일 정도 유지되는 것을 알 수 있다. 음의 NAM은 지표에서 음의 극 진동

에 해당하기 때문에, 돌연승온 발생 후 음의 NAM을 음의 극 진동에 대응해서 생각할 수 있다. 일반적으로 음의 극 진동에서는 온도 이류에 의해 북유라시아 지역은 한랭 기온이, 북동미 지역은 온난 기온이 존재하는 것으로 알려져있다(Thompson and Wallace,

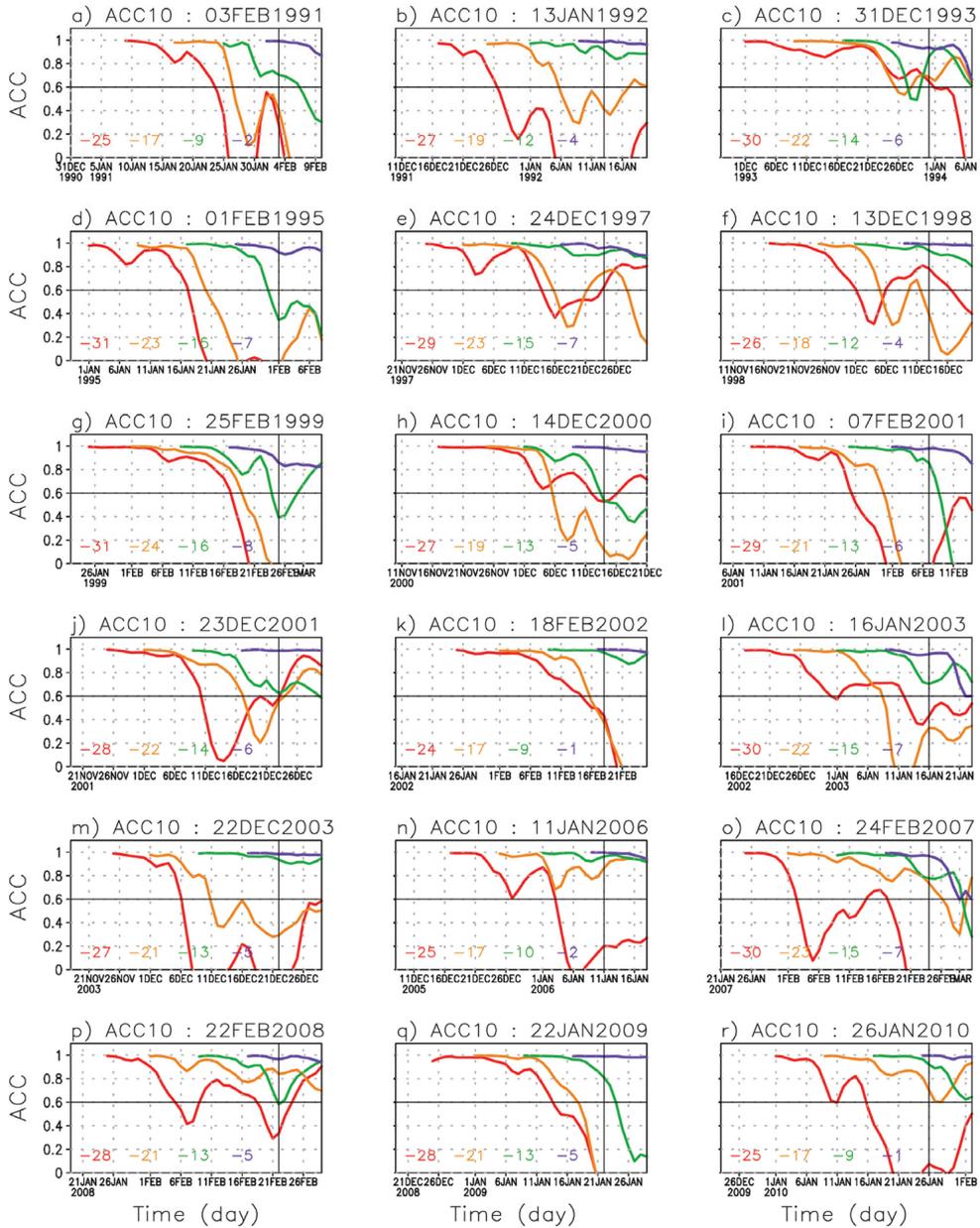


Fig. 3. ACC of 10-hPa geopotential height. Vertical lines in each panel denote the onset date of SSW events. Note that each colored line is shown from the initialization date (red, yellow, green, and purple).

2000).

또한, 성층권에서 극소용돌이가 약화되는 현상은 하층에서 전파된 행성파(planetary-scale wave)의 파쇄(break)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Matsuno, 1971). 행성파의 파동활동에 의한 극소용돌이의 약화는 100 hPa의 EP flux의 연직성분을 통해 간접적으로

알 수 있으며(Polvani and Waugh, 2004), 이를 Fig. 1c에 나타냈다. 그림을 보면 EP flux의 연직성분이 돌연승은 발생 15일 전부터 통계적으로 유의한 수준으로 강해짐을 확인할 수 있다. 돌연승은에 관여하는 행성파는 대부분 동서파수 1 ($k=1$)과 2 ($k=2$)의 행성파로 설명이 된다. Figure 1c에서 $k=1$ 과 $k=2$ 의 EP

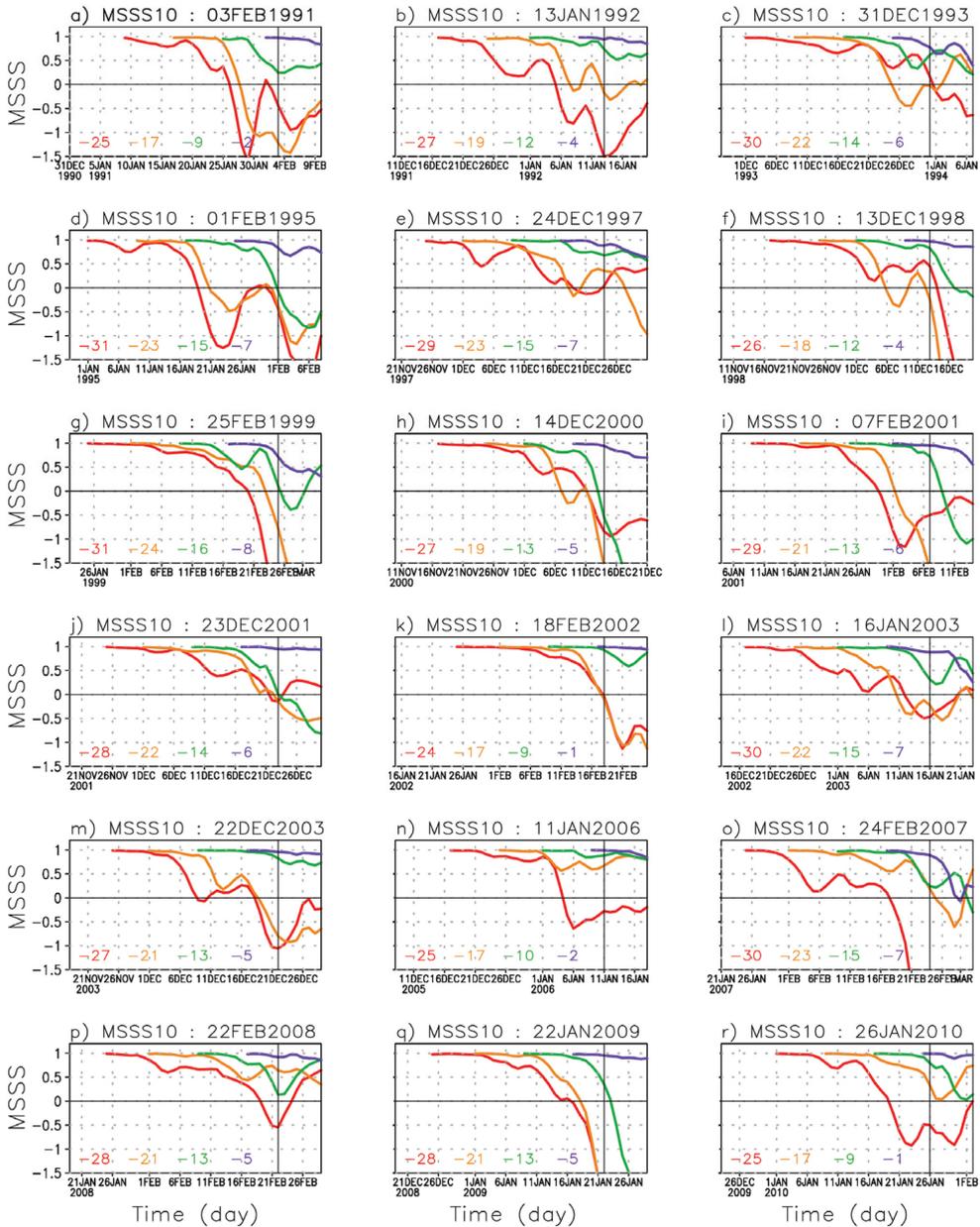


Fig. 4. Same as Fig. 3, but for MSSS.

flux 연직성분을 각각 빨간색과 파란색으로 표시하였다. 분석기간 동안 발생한 돌연승온의 경우, 발생 과정에서 $k=1$ 의 파동이 약 15일 가량 선행하였으며, $k=2$ 의 파동이 그 뒤를 따라 전파하고 있다. $k=1$ 의 파동은 통계적으로 유의한 수준으로 강하게 상충전파되었음을 알 수 있지만, $k=2$ 의 파동은 그 크기가 동서파수 1과 비슷함에도 통계적으로 유의한 값을 보이

지 않았다. 돌연승온 발생 후 $k=1$ 및 $k=2$ 파동 모두 빠르게 약화되었으며, 30일 이상 유의하지 않은 수준의 약한 음의 값을 보였다. 파동활동이 0에 가까울수록 순환장이 파동활동에 의해 변하지 않게 된다. 따라서 돌연승온 발생 후 약한 음의 파동활동은 순환장이 더 이상 유의미한 수준으로 변하기 어려움을 의미하며, 이는 돌연승온 발생 후 약 한 달 가량 유지

되는 양의 PCI를 부분적으로 설명한다(Martineau and Son, 2015).

Figure 2는 모든 돌연승은 사례에서 나타난 극소용돌이 약화과정을 보여준다. 마지막 열은 재분석자료의 극소용돌이 변화를 보여주며, 나머지 열은 GloSea5 과거기후 모의자료에서 나타난 극소용돌이 변화를 보여준다. GloSea5 자료에서 각 열은 각 사례의 여러 시기에 초기화된 모형 적분 결과를 보여준다. 예를 들어 1991년 2월 사례에서 ‘26-day prediction’은 1991년 돌연승은 발생 26일 전 초기화된 모형의 결과를 의미하며, 해당 그림은 돌연승은 발생 26일 전에 초기화된 GloSea5의 결과 중 돌연승은 발생 7일 전부터 발생일까지 변화한 극소용돌이만 보여준다. 그림에서 25~32일 전 초기화의 경우 빨간색으로, 17~24일 전 초기화는 노란색으로, 9~16일 전 초기화는 녹색으로, 1~8일 전 초기화는 보라색으로 표시하였다. Figure 2를 보면 GloSea5 과거기후 모의자료가 돌연승은 발생 전 극소용돌이의 약화 과정을 어느 정도 정성적으로 모의하는지 알 수 있다. 대부분의 사례에서 빨간색(25~32일 전) 결과를 보면 전반적으로 극소용돌이의 이동 및 패턴을 잘 모의하지 못하고 있다. 반면, 노란색 및 녹색(9~24일 전) 초기화에서는 극소용돌이의 변화를 어느 정도 모의하기 시작하였다. 사례에 따라 예측성의 차이가 있지만 전반적으로 대략 2주 내외의 예측성을 보였다고 할 수 있다.

보다 정량적인 분석을 위해, 앞서 언급한 통계기법인 ACC 및 MSSS를 활용해 예측성 검정을 시행하였다. Figure 3은 10 hPa 지위고도에 기반한 ACC 값의 시간에 따른 변화를 각 사례별로 보여준다. 각 그림별 왼쪽 하단의 숫자는 초기화된 날을 의미한다. 예를 들어 ‘-30’은 돌연승은 발생 30일 전에 초기화된 모형 결과를 의미한다. ACC는 모형과 재분석자료의 공간적 유사성을 보여주기 때문에 시간이 지남에 따라 1에서 감소하는 경향을 보인다. 또한 MSSS도 시간에 따라 증가하는 MSE로 인해 시간이 지남에 따라 1에서 감소하게 된다. 이러한 경향성은 대부분의 돌연승은 사례에서 확인할 수 있다. 간혹 실험에 따라 ACC 및 MSSS 값이 감소하다가 다시 증가하기도 하는데, 이는 통계기술의 특성상 값이 높아지는 것일 뿐 실제로 모형의 예측성능이 좋아진 것이 아니다. 그렇기 때문에 돌연승은은 ACC 값이 돌연승은 발생일까지 0.6 이상을 유지하였을 때 모형에서 예측되었다고 정의하였다(Ichimaru et al., 2016). 예측성은 앞서 언급한 바와 같이, 돌연승은이 예측된 가장 첫 초기화 날로부터 돌연승은 발생일의 차이로 정의하였다. 예를 들어, 1991년 사례의 경우 ACC 값이 17일 초기화(노란색) 결과에서는 돌연승은 발생일까지 0.6 이상을 유지하지 못한다. 하지만 그 다음 초기화된 9일 전

Table 2. Prediction skills of SSW events in GloSea5 in terms of MSSS = 0 and ACC = 0.6.

SSW onset date	ACC	MSSS
03 FEB 1991	9	9
13 JAN 1992	12	12
31 DEC 1993	6	14
01 FEB 1995	7	7
24 DEC 1997	15	15
13 DEC 1998	12	12
25 FEB 1999	8	16
14 DEC 2000	5	5
07 FEB 2001	13	13
23 DEC 2001	14	6
18 FEB 2002	9	9
16 JAN 2003	15	15
22 DEC 2003	13	13
11 JAN 2006	17	17
24 FEB 2007	23	23
22 FEB 2008	5	21
22 JAN 2009	13	13
26 JAN 2010	17	17
Mean ± std.	11.8 ± 4.7	13.2 ± 4.7

에 초기화(녹색)된 결과는 돌연승은 발생일까지 0.6 이상을 유지한다. 따라서 1991년 돌연승은의 정량적인 예측성은 9일에 해당한다(Fig. 3a). 1998년 사례와 같이 18일 전 초기화 결과에서 ACC 값이 감소하다가 다시 증가하여 0.6 값 이상으로 다시 회복되었다 하더라도, 이는 통계적인 값에 의해 구현된 결과이기 때문에 모형의 예측성이 좋아진 것이라 보기 어렵다(Fig. 3f). 따라서 1998년 사례의 돌연승은 예측성은 18일이 아닌 12일로 결정된다. Figure 4는 Fig. 3과 같으나, MSSS에 대한 변화를 보여준다. MSSS의 변화 역시 상당부분 ACC와 비슷한 경향을 따르나, 부분적으로 ACC와 차이가 있는 경우도 존재한다. 이는 ACC가 재분석자료와 모형의 지위고도 아노말리의 차이를 반영하는 반면, MSSS는 재분석자료와 모형에서 지위고도의 차이를 반영하였기 때문이라 볼 수 있다. MSSS를 기반한 돌연승은 예측성은 ACC에서와 같은 방법으로 정의되었으나 기준 값을 0.0으로 선정하였다.

ACC 및 MSSS 정량적인 예측성은 각각 11.8일 및 13.2일에 해당한다(Table 2). 하지만 이 값들은 약 8일의 낮은 모형 초기화 빈도수로 인해 정확한 값이라 보기 어렵다. 예를 들어 2000년 사례의 경우 ACC 기준으로 예측성이 5일로 나타났다(Fig. 3h). 이는 5일 전에 초기화된 실험은 돌연승은을 예측하였으나, 바

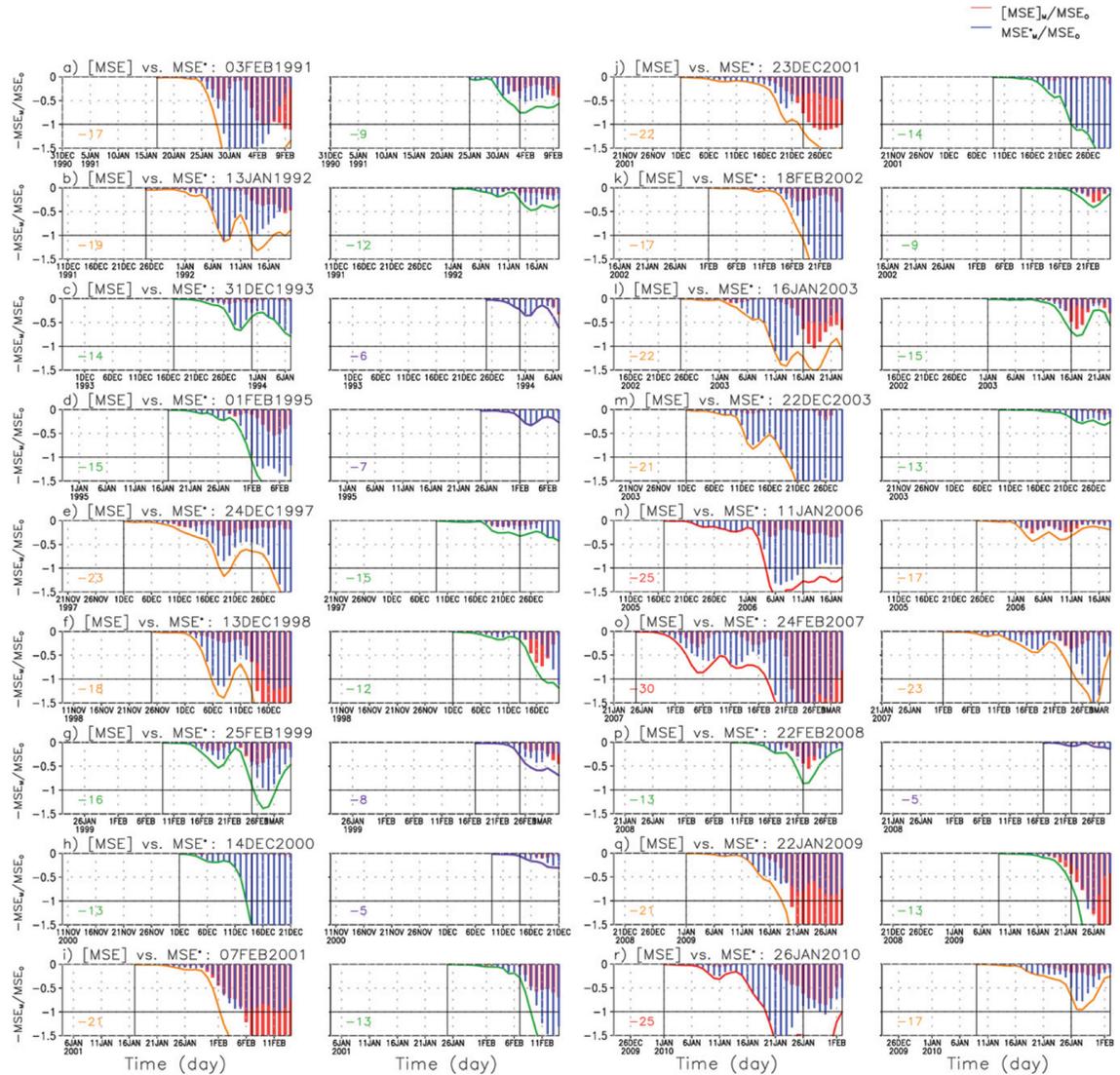


Fig. 5. MSE decomposed into zonal-mean (red) and eddy (blue) components initialized at the predictability limit and right before predictability limit. Colored lines denote the MSE. Note that all values are multiplied by -1 .

로 전 초기화 실험인 13일 전에 초기화된 실험은 돌연승은을 예측하지 못했음을 의미한다. 하지만 이 실험들만으로는 돌연승은이 예측된 시기가 5일 전인지 6일전인지 혹은 12일 전인지 구체적으로 알 수 없다. 다시 말해, 2001년 돌연승은은 그 예측성이 최소 5일에서 최대 12일 사이이며, 정확히 5일이라 단정지을 수 없다는 것을 의미한다. 이는 초기화 빈도수가 낮을 경우 예측성의 불확실성이 커지게 됨을 의미하며, GloSea5에서 약 8일의 초기화 빈도수로 인해 돌연승은 예측성에 8일 내외의 불확실성이 존재한다고 할 수 있다.

GloSea5의 낮은 초기화 빈도수(약 8일)를 고려한다면, 각 예측성은 Table 2에서 값보다 실제 더 높을 것으로 보인다. MSSS가 ACC보다 예측성이 높게 나타났으나, 사례간의 편차로 인해 유의미한 차이라고 보기엔 어렵다. 또한 낮은 초기화 빈도수로 인해 ACC와 MSSS간의 예측성 차이가 두드러지게 나타나기도 하였다. ACC와 MSSS 사이에 예측성 차이를 보이는 사례들은 1993년, 1999년, 2001년, 그리고 2008년 총 4개가 이에 해당한다. 앞선 세 사례들은 8일의 차이가 나타났으며, 2008년에는 16일의 예측성 차이를 보였다. 이러한 극단적인 차이는 약 8일이라는 낮은

초기화 빈도수로 인한 결과라 할 수 있으며, 그로 인해 예측성 차이도 8의 배수를 보인다. 만약 8일보다 높은 빈도수로 초기화를 진행한다면 ACC와 MSSS 사이의 예측성 차이는 상당부분 줄어들 것으로 보인다.

본문에 보여주지 않았지만 돌연승은 발생일에 따라 예측성이 민감할 수 있기 때문에, PCI의 95 백분위로 정의된 돌연승온에 대한 예측성도 검증하였다. 18개의 사례 중 13개의 사례가 95 백분위로 정의된 돌연승온에도 포함되었으며, 이 중 10개의 사례에서 90 백분위와 95 백분위 발생일 차이가 6일 이내로 나타났다. 즉 95 백분위 사례 중 대부분이 90 백분위 사례와 비슷한 시기에 발생했다고 볼 수 있다. 예측성 검증결과 95 백분위 정의를 사용하였을 때, ACC와 MSSS에서 각각 15.4일과 16.0일의 예측성이 나타났다. 이 결과를 통해 강한 돌연승온에서 예측성이 향상된다고 보기에 다소 무리가 있다. 왜냐하면 대부분의 사례가 90 백분위와 95 백분위 기준 발생일에 큰 차이가 없었으며, 90 백분위 발생일을 예측한 실험은 95 백분위 발생일도 예측할 수 있었기 때문이다. 즉, 극소용돌이 약화 패턴을 예측한 실험은 동일하지만, 발생일만 뒤로 밀려났기 때문에 그 차이만큼 예측성이 향상된 것처럼 보였다고 할 수 있다. 예를 들면, 1992년 사례에서 90 백분위를 기준으로 ACC는 12일 전 초기화 실험(녹색)부터 돌연승온을 예측한 것을 확인할 수 있다(Fig. 3b). 12일 전 초기화 실험은 90 백분위 기준인 1992년 1월 13일까지 ACC가 0.6 이상을 유지하였을 뿐만 아니라, 95 백분위 기준인 1992년 1월 19일까지도 0.6 이상을 유지하였다. 즉, 12일 전 초기화에서 이미 약화되는 극소용돌이 패턴을 합리적으로 모의하였기 때문에, 19일까지는 ACC가 0.6 이상 유지 되었다고 볼 수 있다. 이는 초기화 빈도수와 연관이 있는데, 1992년 사례를 기준으로 12일 전과 19일 전 사이에 초기화된 실험이 있다면, 일부 실험은 1992년 1월 13일(90 백분위 발생일)과 1월 19일(95 백분위 발생일) 모두를 잘 모의할 것이며, 다른 실험들은 90 백분위 발생일만 잘 모의했을 것이다.

모형의 예측성 검증에 이어, 모형의 예측성 한계가 어디에서 기인하는지 확인하고자 MSSS를 성분별로 나누어 분석을 진행하였다. MSSS 계산에 기반이 되는 MSE는 앞서 방법론에서 소개한 바와 같이, 동서평균 오차와 에디 오차로 나눌 수 있다(Eq. 3). 또한 에디 오차는 크기 오차와 위상 오차로 나눌 수 있으며, 각 오차는 동서파수에 따라 더욱 세분화할 수 있다.

Figure 5는 모든 돌연승온 사례에 대해 동서평균 및 에디 오차의 시간에 대한 변화를 보여준다. 각 그림에서 왼쪽 열은 돌연승온 예측성 한계를 보이는 모형 실험 바로 이전 초기화 실험 결과이며, 오른쪽 열은 예측성을 보이는 모형 실험에 대한 결과이다. 예측성

한계를 기준으로 앞뒤의 두 실험을 보여줌으로써 어떤 성분의 오차가 돌연승온 예측을 결정하였는지 확인할 수 있다. 표준화된 MSE 값은 각각 동서평균 오차와 에디 오차로 나눌 수 있으며 이를 Fig. 5에 표시하였다. 빨간색이 동서평균 오차이며, 파란색이 에디 오차를 나타낸다. 모형 적분과정에서 특정 시기나 혹은 특정 사례에 따라 그 차이는 존재하지만, 전반적으로 동서평균 오차(빨간색)보다 에디 오차(파란색)가 큰 것을 알 수 있다. 이를 통해 돌연승온의 예측성 한계는 동서평균 오차보다는 에디 오차에 기인한 것임을 알 수 있다.

겨울철 극성층권의 동서평균 배경장은 주로 대기복사에 의해 결정된다. 따라서 배경장 오차를 의미하는 동서평균 오차는 상대적으로 모형의 물리과정에서 발생한 오차를 대변한다고 볼 수 있다. 반면 에디 오차는 파동활동을 반영하기 때문에, 모형의 역학과정에서 나타난 오차를 대변하게 된다. 따라서 에디 오차가 동서평균 오차보다 크게 나타난 것은 모형 적분과정에서 물리과정보다 역학과정에서 발생하는 오차가 더 클 수 있음을 의미한다. 하지만, 물리과정과 역학과정 사이에 존재하는 오차를 정확히 구분할 수 없다는 점, 그 두 오차 사이에 존재할 수 있는 비선형 오차가 있다는 점 등을 고려한다면 단정적으로 역학 과정에 뚜렷한 문제가 있다고 보기 어렵다.

에디 오차를 더욱 자세하게 살펴보고자, 이를 위상 및 크기 오차로 나누었다. Figure 6은 모든 돌연승온 사례에 대한 위상 및 크기 오차를 보여주는 그림이다. 그림의 형식은 Fig. 5와 같으나, 빨간색은 위상 오차를 파란색은 크기 오차를 각각 나타낸다. 전체적으로 위상 오차(빨간색)가 두드러지는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다. 전반적으로 위상 오차가 크다는 것은 파동활동 중에서도 파동의 크기 보다는 위상이 모형에서 정확히 모의되지 못함을 의미한다. 즉, 파동활동을 잘 구현하였다 하더라도, 파동이 깨지는 위치가 모형에서 다를 수 있음을 시사 한다.

그리고 위상 오차는 더 나아가 각각 동서파수에 대한 오차로 쪼갤 수 있다. 본 연구에서는 크기 오차가 상대적으로 많이 작기 때문에 위상 오차만 고려하였다. 또한 대부분의 오차는 동서파수 1과 2에서 대부분을 차지하기 때문에 더 높은 파수의 오차는 고려하지 않았다. Figure 7은 위상 오차 중 동서파수 1과 동서파수 2에 대한 오차를 보여준다. 각 오차는 각각 빨간색 및 파란색으로 표시되었다. 그림에서 알 수 있듯이, 위상 오차 중에서도 동서파수 1에 대한 오차(빨간색)가 더 지배적인 것을 알 수 있다.

정리하자면, 돌연승온의 예측성은 대략 2주 내외로 나타났으며, 2주의 예측성은 주로 동서평균 오차보다는 에디 오차에 해당하는 파동활동 모의와 연관 지을

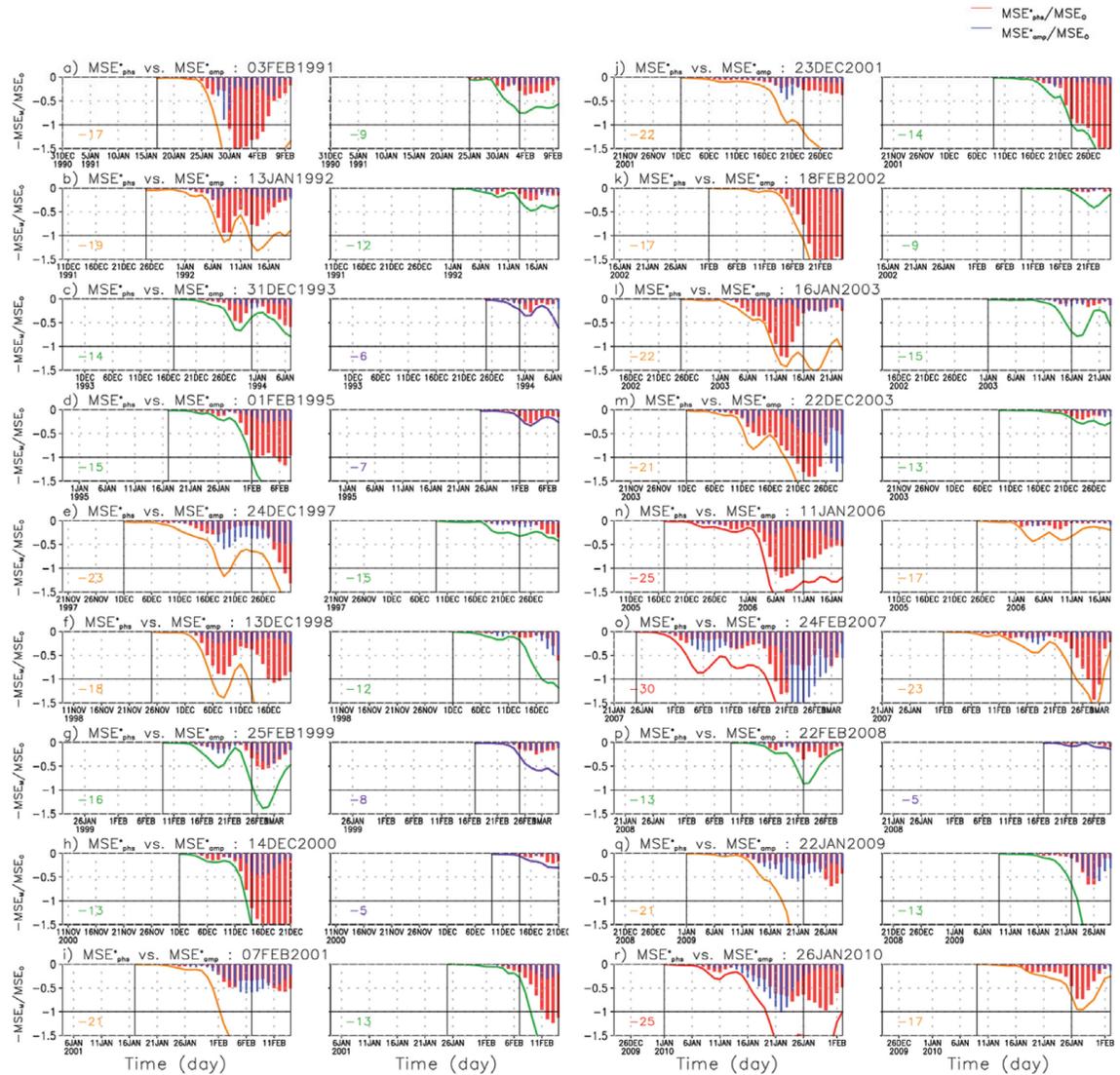


Fig. 6. Same as Fig. 5, but for eddy-phase (red) and eddy-amplitude (blue) MSE.

수 있다. 더 나아가 에디 오차 중에서도 위상 오차가 크기 오차보다 상대적으로 큰 비율을 보였으며, 위상 오차 중에서도 동서파수 1의 오차가 더 중요한 것으로 나타났다. 이러한 분석은 정성적인 결과이기 때문에 향후 정량화된 지수를 이용하여 보다 객관적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

지금까지 모형에서 성층권 돌연승온의 예측성 및 예측성 한계 원인에 대한 분석을 진행하였다. 그러나 궁극적으로 대류권의 예측성능을 향상시키기 위해서는, 모형의 성층권 자체 예측성뿐만 아니라 성층권 변동성에 따르는 대류권 예측성에 대한 분석도 수행되

어야 한다. 따라서 본 연구에서는 성층권 예측성 분석에만 그치지 않고, 상대적으로 더 중요한 성층권-대류권 접합과정에 대한 예측성을 추가적으로 분석하였다. 성층권 돌연승온은 이미 널리 알려져 있듯이, 대류권에 약 2달가량의 영향을 미친다(예, Baldwin and Dunkerton, 2001). 약 2달에 해당하는 대기 영향은 대류권 예측성 향상에 충분히 기여할 수 있다(Sigmond et al., 2013). 다시 말해, 모형이 성층권을 예측하고, 이에 따른 대류권 영향도 잘 예측한다면 대류권 예측성을 길게는 2달까지 향상시킬 수 있음을 의미한다.

Figure 8은 재분석 자료 및 모형에서 돌연승온 기

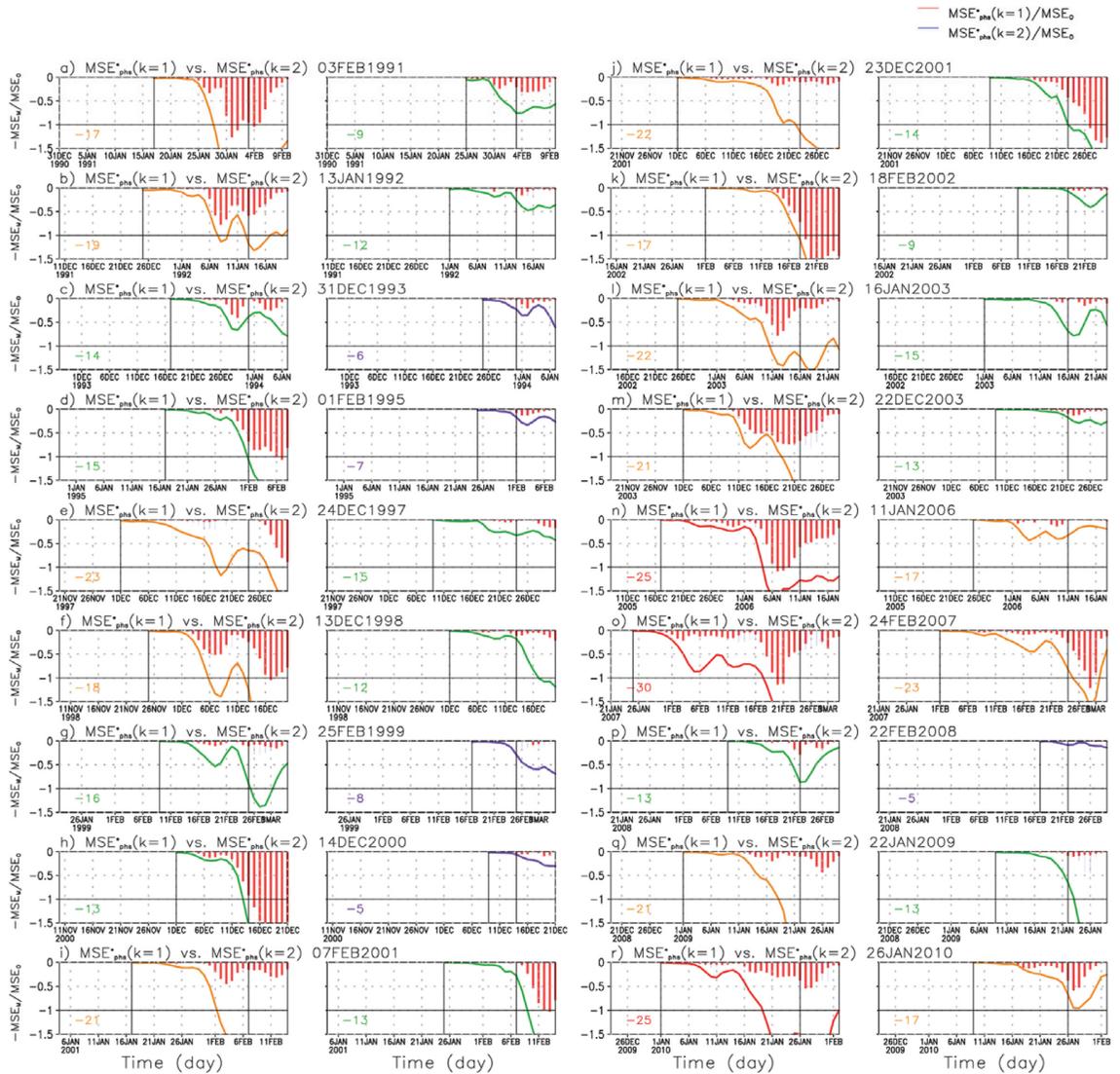


Fig. 7. Same as Fig. 5, but for eddy-phase MSE in zonal wavenumber 1 ($k = 1$; red) and 2 ($k = 2$; blue).

간에 나타난 성층권-대류권 접합과정을 보여주는 그림이다. 성층권-대류권 접합은 PCI를 사용하여 나타내었다. PCI의 시간에 따른 연직구조를 파악함으로써 성층권에 있던 음의 NAM이 대류권에도 음의 NAM으로 영향을 준다(Fig. 1). 앞서 Fig. 1에서는 전체 사례에 대한 평균을 보여주었다면, Fig. 8의 첫 번째 행의 재분석자료 결과는 각 사례에서 나타난 성층권-대류권 접합과정을 보여준다고 할 수 있다. 2007년 및 2001년 사례를 제외하고, 나머지 사례들에서는 성층권-대류권 접합과정이 나타난 것을 확인할 수 있다. 2행부터는 모형의 결과를 보여주며, 붉은색 테두리는 돌연승운이 예측된 실험에서의 결과를 의미한다. 이

를 바탕으로 그림을 살펴보면, 전반적으로 모형이 돌연승운을 예측하였을 때 성층권-대류권 접합을 어느 정도 맞춘 것을 확인할 수 있다. 앞서 돌연승운 예측 성과 연결지어 본다면, 돌연승운이 예측 되었을 때인 대략 2주 전부터 돌연승운 발생 후에 나타나는 대류권 영향이 모형에서 모의될 수 있음을 의미한다. 다시 말해 성층권 영역에 대한 예측성 향상은 대류권 예측성능을 2주 이상 향상시킬 수 있음을 의미한다. 하지만, 2009년 돌연승운 사례에서 13일 전 초기화된 모형 결과의 경우, 돌연승운이 예측되었음에도 성층권-대류권 접합과정이 잘 모의되지 못한 경우가 있었다. 이러한 일부 사례들은 추후 접합 유무가 결정되

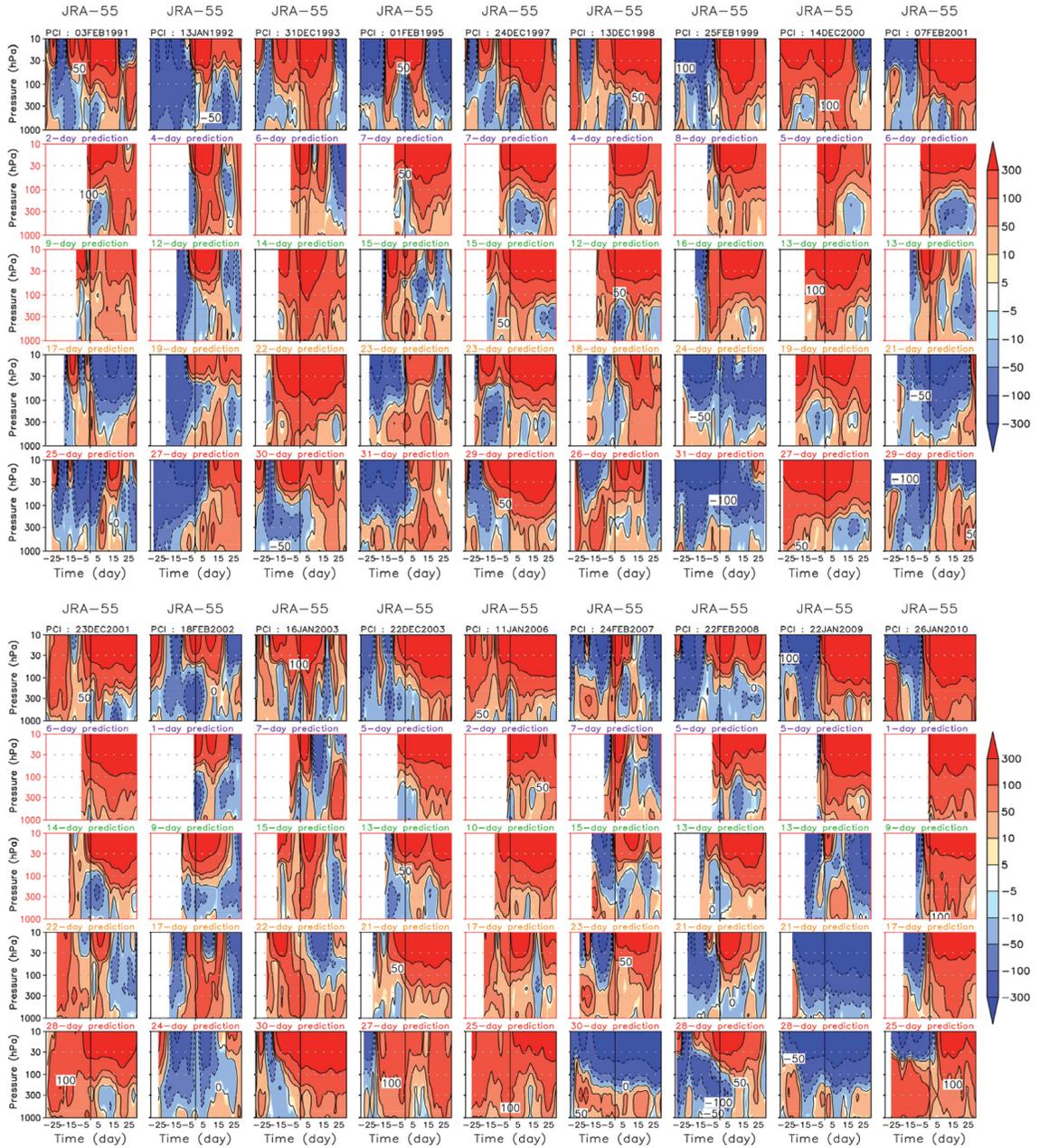


Fig. 8. Time evolution of PCI for four different initializations before SSW onset date (red, yellow, green, and purple).

는 인자에 대해 연구할 필요가 있다.

앞선 정성적인 결과를 보다 정량적으로 확인하기 위하여, Fig. 9에서 돌연승온 발생 후 15일 동안 평균된 850-hPa PCI를 모형 및 재분석 자료에서 보여주었다. Figure 9a는 모형에서 돌연승온이 예측된 실험에서의 결과이며, Fig. 9b는 돌연승온이 예측되지 않

은 사례에서의 PCI를 보여준다. 모형과 재분석자료에 대한 산점도이기 때문에 그림에서 표시된 대각선에 위치할수록 모형이 재분석자료를 잘 모의했다고 할 수 있다. 오른쪽과 왼쪽 그림을 비교해 보았을 때, 상대적으로 왼쪽 그림에서 점들이 대각선에 더 가깝게 위치한 것을 확인할 수 있다. 이는 돌연승온이 예측

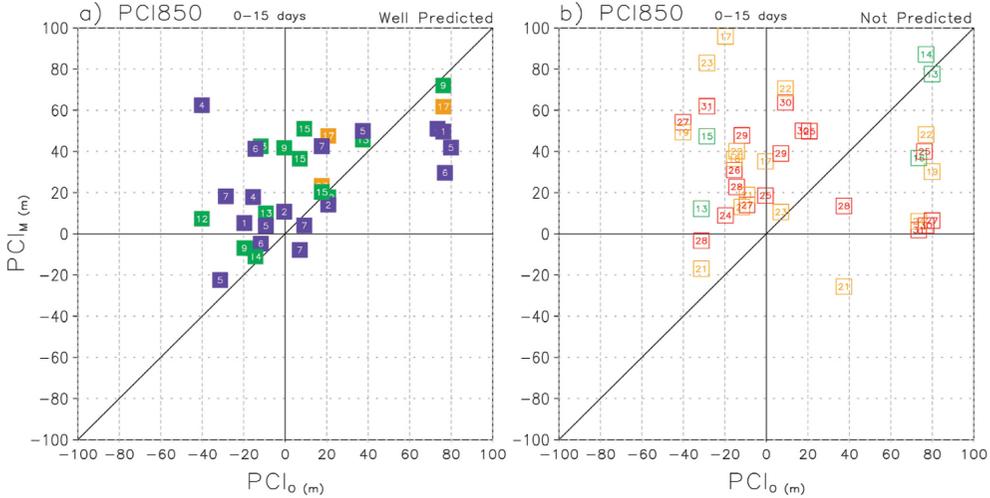


Fig. 9. Scatter plot of 850-hPa PCI in JRA-55 and GloSea5 when (a) SSW evens are well predicted and (b) not predicted. X- and Y-axes denote the results of JRA-55 and GloSea5, respectively. The number on the each mark indicates the lead time from the onset date, and the marks are colored accordingly.

되었을 때 상대적으로 대류권 순환장을 잘 모의한다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 성층권 극한 변동성이 예측되었을 때, 그에 따르는 대류권 순환장 역시 예측성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 향후 이를 이용한다면 겨울철 계절 및 계절내 변동에 대한 예측성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 요약 및 토의

GloSea5에서 1991년부터 2010년까지 발생한 18개의 성층권 돌연승온에 대하여 ACC를 기준으로 약 11일, MSSS를 기준으로 약 13일의 예측성이 나타났다. MSE를 성분별로 분석하였을 때, 돌연승온에 대한 예측성능은 주로 에디 오차에 의해 결정된 것을 확인할 수 있었다. 특히 에디 오차 중에는 위상 오차가 주된 요인이었으며, 동서파수로는 행성과 규모에 해당하는 동서파수 1의 오차가 가장 컸던 것을 확인할 수 있었다. 위상 오차는 파동의 속도 혹은 파동이 전파되거나 깨지는 위치에 따라 결정되기 때문에, 돌연승온을 유발하는 파동의 전파 속도 혹은 깨지는 위치를 모형에서 정확히 모의하지 못하였기 때문으로 보인다. 이에 대한 정량적인 분석이 향후 연구에서 필요할 것으로 보인다.

또한 돌연승온 예측을 통한 대류권 예측성능 향상을 확인하기 위하여, 돌연승온 후 성층권-대류권 접합에 대한 예측성능을 GloSea5에서 살펴보았다. 우선, 돌연승온 발생 후 성층권-대류권 접합은 GloSea5에서 모의가 된 것을 확인할 수 있었다. 대체적으로 돌연

승온이 예측된 과거모의 실험에서는 접합과정을 잘 모의한 것으로 확인할 수 있었다. 이는 약 10일에서 2주 전에 예측된 돌연승온을 바탕으로 대류권 순환장에 대한 예측성능을 향상시킬 수 있음을 의미하며, 이를 적절히 활용한다면 겨울철 대류권 S2S 시간규모 변동에 대한 예측성능을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

보다 직접적인 예측성능에 대한 검정을 위해 동아시아 기온 예측성능과 돌연승온 예측성능에 대한 분석을 수행하였다. 선행연구에 따르면 동아시아 지역(105~140°E, 45~65°N)은 돌연승온 발생 후 한랭한 기온이 존재하지만(Woo et al., 2015), 한반도를 중심으로 한 동아시아 지역(110~145°E, 30~45°N)에서는 뚜렷한 한랭 기온 반응이 나타나지 않았다(Song et al., 2015). 본 연구에서 사용한 돌연승온 사례에서도 돌연승온 발생 후 한반도 중심의 동아시아 지역에서 유의미한 한랭 기온 결과를 찾을 수 없었다. 또한 GloSea5에서도 돌연승온 예측 유무에 따라 유의미하게 향상된 동아시아 기온 예측성능을 확인할 수 없었다(not shown). 하지만, 강한 돌연승온 사례에서는 한반도 중심의 동아시아 지역에서도 유의미한 수준의 한랭 기온이 확인된 바가 있기 때문에(Song et al., 2015), 강한 돌연승온과 같이 동아시아 지역에 유의미한 한랭 기온을 보이는 돌연승온 사례들에 대한 예측성능을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 진행되지 않았지만, 추후 이에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다.

GloSea5의 과거기후 모의자료는 총 3개의 앙상블만 제공되기 때문에, 본 연구에서 3개의 앙상블을 사용

한 것이 다소 아쉬운 점이라 할 수 있다. 이는 본 연구의 결과를 해석할 시에 유의해야할 점이며, 향후 더 많은 앙상블 수 혹은 더 많은 돌연승온 사례에 대해 분석한다면 보다 정확한 GloSea5에서의 돌연승온 예측성을 확인할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- _____, and D. W. J. Thompson, 2009: A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 1661-1672.
- Butler, A. H., D. J. Seidel, S. C. Hardiman, N. Butchart, T. Birner, and A. Match, 2015: Defining sudden stratospheric warmings. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 1913-1928, doi:10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Climate*, **20**, 449-469.
- Choi, J., S.-W. Son, Y.-G. Ham, J.-Y. Lee, and H.-M. Kim, 2016: Seasonal-to-interannual prediction skills of near-surface air temperature in the CMIP5 decadal hindcast experiments. *J. Climate*, **29**, 1511-1527, doi:10.1175/JCLI-D-15-0182.1.
- 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.
- Ichimaru, T., S. Noguchi, T. Hirooka, and H. Mukougawa, 2016: Predictability changes of stratospheric circulations in Northern Hemisphere winter. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **94**, 7-24, doi:10.2151/jmsj.2016-001.
- Kim, S.-W., H. Kim, K. Song, S.-W. Son, Y. Lim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction skills of GloSea5 model: Part 1. Geopotential height in the Northern Hemisphere extratropics. *Atmosphere*, submitted (in Korean with English abstract).
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Kolstad, E. W., T. Breiteig, and A. A. Scaife, 2010: The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 886-893, doi:10.1002/qj.620.
- Marshall, A. G., and A. A. Scaife, 2010: Improved predictability of stratospheric sudden warming events in an atmospheric general circulation model with enhanced stratospheric resolution. *J. Geophys. Res.*, **115**, D16114, doi:10.1029/2009JD012643.
- Martineau, P., and S.-W. Son, 2015: Onset of circulation anomalies during stratospheric vortex weakening events: The role of planetary-scale waves. *J. Climate*, **28**, 7347-7370, doi:10.1175/JCLI-D-14-00478.1.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
- Mukougawa, H., and T. Hirooka, 2004: Predictability of stratospheric sudden warming: A case study for 1998/99 winter. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1764-1776.
- Noguchi, S., H. Mukougawa, Y. Kuroda, R. Mizuta, S. Yabu, and H. Yoshimura, 2016: Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009. *J. Geophys. Res.*, **121**, 3388-3404, doi:10.1002/2015JD024581.
- Polvani, L. M., and D. W. Waugh, 2004: Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *J. Climate*, **17**, 3548-3554.
- 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, doi:10.1038/ngeo1698.
- Song, K., S.-W. Son, and S.-H. Woo, 2015: Impact of sudden stratospheric warming on the surface air temperature in East Asia. *Atmosphere*, **25**, 461-472 (in Korean with English abstract).
- Stan, C., and D. M. Straus, 2009: Stratospheric predictability and sudden stratospheric warming events. *J. Geophys. Res.*, **114**, D12103.
- Taguchi, M., 2015: Connection of predictability of major stratospheric sudden warmings to polar vortex geometry. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 33-38, doi:10.1002/asl.595.
- Thompson, D. W., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part 1: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Tripathi, O. P., and Coauthors, 2015a: 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, doi:10.1002/qj.2432.
- _____, A. Charlton-Perez, M. Sigmond, and F. Vitart, 2015b: Enhanced long-range forecast skill in boreal winter following stratospheric strong vortex conditions. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 104007, doi:10.1088/1748-9326/10/10/104007.
- Vitart, F., and Coauthors, 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163-173, doi:10.1175/BAMS-D-16-0017.1.
- Woo, S.-H., B.-M. Kim, and J.-S. Kug, 2015: Temperature Variation over East Asia during the lifecycle of weak stratospheric polar vortex. *J. Climate*, **28**, 5857-5872, doi:10.1175/JCLI-D-14-00790.1.