

GloSea6 모형에서의 성층권 돌연승온 하층 영향 분석: 2018년 성층권 돌연승온 사례

홍동찬¹⁾ · 박현선²⁾ · 손석우^{1)*} · 김주원²⁾ · 이조한³⁾ · 현유경³⁾

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾공주대학교 대기과학과, ³⁾국립기상과학원 기후연구부

(접수일: 2023년 8월 24일, 수정일: 2023년 10월 9일, 게재확정일: 2023년 10월 10일)

Downward Influences of Sudden Stratospheric Warming (SSW) in GloSea6: 2018 SSW Case Study

Dong-Chan Hong¹⁾, Hyeon-Seon Park²⁾, Seok-Woo Son^{1)*}, Joowan Kim²⁾,
Johan Lee³⁾, and Yu-Kyung Hyun³⁾

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

²⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

³⁾Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 24 August 2023; revised 9 October 2023; accepted 10 October 2023)

Abstract This study investigates the downward influences of sudden stratospheric warming (SSW) in February 2018 using a subseasonal-to-seasonal forecast model, Global Seasonal forecasting system version 6 (GloSea6). To quantify the influences of SSW on the tropospheric prediction skills, free-evolving (FREE) forecasts are compared to stratospheric nudging (NUDGED) forecasts where zonal-mean flows in the stratosphere are relaxed to the observation. When the models are initialized on 8 February 2018, both FREE and NUDGED forecasts successfully predicted the SSW and its downward influences. However, FREE forecasts initialized on 25 January 2018 failed to predict the SSW and downward propagation of negative Northern Annular Mode (NAM). NUDGED forecasts with SSW nudging qualitatively well predicted the downward propagation of negative NAM. In quantity, NUDGED forecasts exhibit a higher mean squared skill score of 500 hPa geopotential height than FREE forecasts in late February and early March. The surface air temperature and precipitation are also better predicted. Cold and dry anomalies over the Eurasia are particularly well predicted in NUDGED compared to FREE forecasts. These results suggest that a successful prediction of SSW could improve the surface prediction skills on subseasonal-to-seasonal time scale.

Key words: Sudden Stratospheric Warming, GloSea6, Prediction skill

1. 서 론

최근 단/중기예보와 장기예보의 사이에 해당하는 계절내·계절(subseasonal-to-seasonal, S2S) 시간규모 예측

의 수요가 꾸준히 증가함에 따라, S2S 시간규모의 예측성을 향상시킬 수 있는 인자들 또한 주목받고 있다 (White et al., 2017; Meehl et al., 2021). 이 인자들은 지면, 해양, 해빙, 대기, 그리고 적도, 극지방 등 다양한 권역과 지역에 위치하고 있다. 그 중 하나는 극지방 겨울철에서 발생하는 성층권 돌연승온(Stratospheric Sudden Warming, SSW)이다. 돌연승온은 극 소용돌이가 약화되며 수일 내에 성층권 온도가 수십 도까지 오르는 현상으로, 서풍에서 동풍으로의 바람 역전이

*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

동반된다(Baldwin et al., 2021). 돌연승은 발생 시 성층권-대류권 접합을 통해 최대 2달까지 대류권에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(Baldwin and Dunkerton, 2001), 대류권에서 음의 북반구 환형모드(Northern annular mode, NAM) 또는 북대서양 진동(North Atlantic oscillation, NAO)을 수반한다(Butler et al., 2017). 뿐만 아니라 돌연승은 중위도 지역의 한파, 홍수와 같은 극한 기상의 발생 가능성과 강도를 증가시키는 것으로 보고되었다(Domeisen and Butler, 2020b).

이러한 특성으로 인해 현업 S2S 예측 모형에서 성층권 돌연승은을 활용한 예측성 진단 연구들이 활발히 진행되었다. 돌연승은이 발생했을 때 S2S 시간 규모에서 지표의 예측성이 일부 개선되거나(Tripathi et al., 2015; Domeisen et al., 2020a), 한파 발생 가능성이 증가함을 보였다(Statnaia et al., 2022). 또한 특정 사례에 대하여 S2S 모형들의 돌연승은 예측성능과 그에 따른 대류권 순환장 반응을 확인하였으며(Karpechko et al., 2018; Rao et al., 2020), 성층권을 통제하는 수치적 방법을 활용하여 돌연승은에 의한 지표 영향을 확인하기도 하였다(Knight et al., 2021; Huang et al., 2022). 다만 선행 연구들은 각기 다른 사례에 대해 각기 다른 방법론을 적용했기 때문에, 결과를 일반화하기 어려운 단점이 있다. 따라서 성층권 돌연승은에 의한 하층 영향과 그 과정에 대한 역학적 이해를 위해, 다양한 S2S 모형들에서 통일된 실험 구성과 분석이 필요한 실정이다.

최근 현업 S2S 모형들에서 돌연승은에 의한 지표 예측성을 평가하고 비교하는 Stratospheric Nudging And Predictable Surface Impacts (SNAPSI) 프로젝트가 계획되었다(Hitchcock et al., 2022). SNAPSI 프로젝트는 초기화 날, 출력 변수, 앙상블 개수 등을 통일하여 서로 다른 모형들에서 객관적 비교를 가능하게 한다. 일반적인 모형 적분 실험뿐만 아니라, 각 모형의 성층권 동서평균장을 동일하게 강제하여 성층권 변동성을 통제할 실험을 제안하였다. 비록 성층권 돌연승은 사례로는 최근 발생한 2018년 2월 북반구 돌연승은, 2019년 1월 북반구 돌연승은, 2019년 남반구 약한 돌연승은 사례 3개만을 선정하였지만, 각 사례마다 서로 다른 지표 영향을 보이기 때문에 돌연승은의 하층 영향에 대한 복합적인 분석이 가능하다.

본 연구에서는 기상청에서 운영 중인 모형을 활용하여 SNAPSI 프로젝트의 첫 번째 돌연승은 사례인 2018년 돌연승은 사례를 분석하였다. 정성 및 정량 분석을 통해 현실적인 성층권 모의가 대류권 순환장과 지표의 예측성 개선에 미치는 영향을 확인하였다. 2장에서는 실험 설계 및 예측성능 검증 방법에 대해 기술하였다. 이어서 3장에서는 모형의 돌연승은 모의

성능과 그에 따른 대류권 예측 성능을 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 연구 결과를 요약 및 정리하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 수치모형 및 자료

S2S 시간규모에서 성층권 돌연승은의 하층 영향을 확인하기 위하여, 기상청 국립기상과학원에서 현업 운영 중인 전지구 기후예측시스템(Global Seasonal forecasting system version 6, GloSea6)을 활용하였다. GloSea6 모형은 계절예측을 목적으로 개발된 대기-지면-해양-해빙 접합 모형이다. 다층 지면과 해빙 열역학 과정이 적용되었으며, 오존 강제력으로 기후 평균값이 아닌 변동값을 사용하는 등 최근 예측시스템 개편과정을 거친 바 있다(Kim et al., 2021). 본 연구에 사용된 GloSea6 모형의 결합모형 구성 버전은 Global Coupled version 3.2 (GC3.2; Williams et al., 2017)이다. GloSea6 모형의 각 구성 성분은 대기 모형인 Unified Model (UM vn.11.5; Walters et al., 2019), 지면 모형인 Joint UK Land Environment Simulator (JULES vn.5.6; Walters et al., 2019), 해양 모형인 Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO vn.3.6; Storkey et al., 2018), 그리고 해빙 모형인 Los Alamos Sea-ice Model (CICE vn.5.1.2; Ridley et al., 2018)이며, 이들은 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil 3 - Model Coupling Toolkit (OASIS3-MCT; Larson et al., 2005) 결합자로 연결되어있다. GloSea6의 대기 모형은 수평으로 $0.83^\circ \times 0.56^\circ$ (N216), 연직으로 85개 층(최상층 고도 85 km)의 해상도를 가진다.

돌연승은 모의 유무에 따른 GloSea6 모형의 예측성 검증을 위한 기준 자료로는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 생산한 재분석 자료인 ECMWF Reanalysis version 5 (ERA5; Hersbach et al., 2020)를 사용하였다. 두 자료 모두 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 의 동일한 수평해상도로 보간하여 사용하였으며, 연직으로는 두 자료 모두 공통으로 가지는 1000 hPa와 10 hPa 사이의 17개 고도(1000/925/850/700/600/500/400/300/250/200/150/100/70/50/30/20/10 hPa)를 사용하였다. 검증에는 지위고도(Geopotential height, Z), 지상기온(Surface Air Temperature, SAT), 그리고 강수(Precipitation, PRCP) 자료가 사용되었다. 1979년부터 2018년까지 40년의 ERA5 자료를 사용하여 기후값을 정의하였으며, 기후값은 GloSea6 모형 적분 결과에도 동일하게 적용하였다.

2.2 성층권 너징 실험 설계

돌연승은의 대류권 영향을 분석하기 위해, SNAPSI 프로젝트에서 진행하는 너징 방법론을 따라 너징 없

이 적분되는 실험(FREE)과 성층권의 동서바람과 기온의 동서평균장을 너징하는 실험(NUDGED)을 수행하였다(Hitchcock et al., 2022). NUDGED 실험에서 사용된 너징 혹은 뉴턴 완화법(Newtonian relaxation)은 특정 변수를 기준 상태의 값을 가지도록 강제하는 방법으로, (식 1)의 우변 두 번째 항과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = F(X) - \frac{X - X_r}{\tau} \quad (\text{식 1})$$

여기서 X 와 X_r 는 대상 변수와 변수의 기준 상태를 의미하며, τ 는 너징 시간 규모로 너징의 강도를 조절하는 상수이다. 너징은(식 1) 우변의 첫 번째 항인 모형의 역학과정 및 물리과정에 추가적으로 작용되며, 너징 시간 규모가 작을수록 기준 상태로 빠르게 완화된 다. 너징을 통해 대기에 존재하는 파동에 영향을 주지 않고, 전파 조건에만 영향을 주기 위하여 동서평균 동서바람과 기온만을 너징하였다. 기준 자료로는 ERA5를 사용하였으며, 너징 시간 규모로는 6시간을 사용하였다. Hitchcock and Simpson (2014)에서는 6시간의 너징 시간 규모를 통한 실험으로 돌연승운의 하층 영향을 모의한 바 있어, SNAPSI 프로젝트에서도 동일하게 사용하였다.

NUDGED 실험에서 성층권 지역만 너징하기 위하여, 너징 시작 고도(p_b , 90 hPa)에서부터 너징이 최대가 되기 시작하는 고도(p_t , 50 hPa)까지 삼차함수를 따라 증가하는 함수($\frac{p_b - p}{p_b - p_t}$)³를 고려하였다. 돌연승운이 극지방에서 발생하는 현상이지만 적도 성층권과의 상호작용을 고려하기 위해, 전 위도대에서 너징을 진행하였다.

돌연승운 너징 실험을 위한 사례로는 2018년 2월 12일에 발생한 북반구 성층권 돌연승운을 선정하였다. 해당 사례는 SNAPSI 프로젝트의 3개 돌연승운 사례 중 첫 번째 사례로, 돌연승운 이후 대류권에 음의 NAM과 NAO가 확인되었다. 또한 2월 후반에 북 유라시아 지역에서 한파 및 강수의 패턴 변화가 나타나 대류권에 강한 영향을 준 사례이다. 예측 선행기간에 따른 돌연승운 모의 여부와 그에 따른 영향을 확인하기 위해 돌연승운 발생일(2018년 2월 12일)의 18일 이전인 2018년 1월 25일과 4일 이전인 2018년 2월 8일에 모형을 초기화하였다. 두 초기화날은 SNAPSI 프로젝트에서 제시하는 초기화 날을 따랐으며, 첫 번째 초기화 날짜는 극 소용돌이 약화를 이끄는 파동 사례 이전 날짜로 선정하였다. 두 번째 초기화 날짜는 돌연승운 이후의 극한 기상의 발달 과정을 확인하고자, 발생일에 근접한 날짜로 선정하였다. 또한 현업에서 사용 중인 Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB)

기법을 사용하여 초기장과 물리과정에 섭동을 주는 방식으로 각 실험 별 50개 앙상블을 생산하여 통계적 유의성을 확보하였다.

2.3 모형 예측성 평가

모형의 예측성을 객관적·정량적으로 평가하기 위해 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 장기에보 표준 평가 방법에 사용되는 평균 제곱 오차(Mean Squared Error, MSE)를 활용하였다(Goddard et al., 2013).

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

$$MSE_M(t) = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_{M,i}(t) - Z_{O,i}(t))^2 \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i} \quad (\text{식 3})$$

위 식에서 t 는 적분 기간을 나타내며, i 와 N 는 각각 격자 지점과 전체 격자의 개수를 의미한다. O , C , 그리고 M 은 각각 관측, 기후값, 모형을 의미하며, Z 는 지위고도를 나타낸다. (식 3)의 모형의 예측 오차를

관측의 변동성으로 표준화시킨 값 ($\frac{MSE_M}{MSE_O}$)을 사용하여 적분 기간에 따른 상대적인 예측 오차를 평가한다. 관측을 정확하게 모의할 경우에는 MSE 값이 0을 가지며, 관측과 벌어질수록 값이 양의 무한대까지 상승하게 된다. MSE는 오차의 원인에 대한 정량 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 본 연구에서는 모형의 오차를 동서평균과 그에 대한 편차인 에디 성분으로 나누어 예측 성능 개선의 원인을 확인하였다(Kim et al., 2018; Kim et al., 2018; Song et al., 2018; Gang et al., 2021).

3. 결 과

먼저, GloSea6 모형의 2018년 2월 성층권 돌연승운 모의 성능을 확인하였다. 돌연승운의 발생을 탐지하는데 널리 사용되는 Charlton and Polvani (2007)의 방법을 따라 10 hPa 고도의 북위 60°N에서 동서 평균된 동서바람을 각 실험 및 앙상블 별로 나타냈다(Fig. 1). 해당 돌연승운 사례는 성층권 극 소용돌이가 급격히 약화되었던 사례로, 다양한 현업 S2S 모형에서 예측성의 한계가 약 1~2주로 보고된 바 있다(Karpechko et al., 2018). 돌연승운이 발생하면서 성층권 온도의 급격한 상승과 그로 인한 동서바람의 역전이 ERA5에서 나타났으나(Fig. 1a의 검정색 실선), 2018년 1월 25일 초기화한 FREE 실험은 긴 선행일수(18일)로 인하여 대부분의 앙상블 멤버가 돌연승운을 모의하지

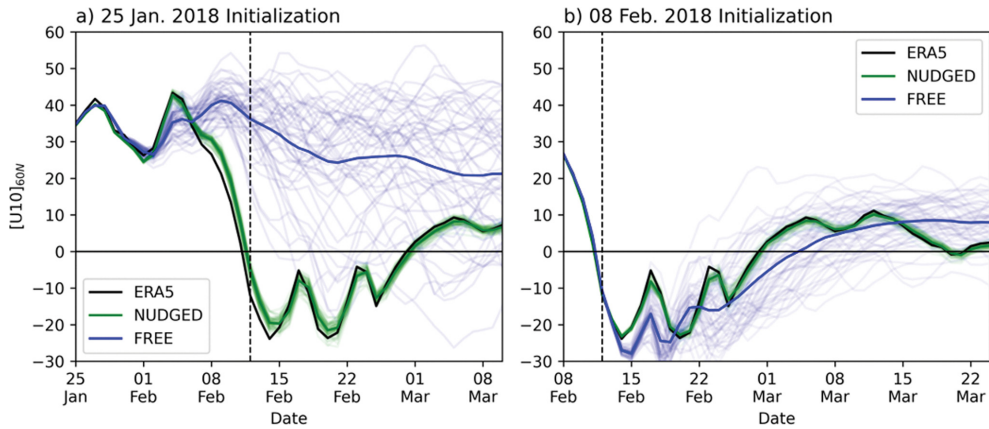


Fig. 1. Time series of 10 hPa zonal-mean zonal wind at 60°N in ERA5 and GloSea6 forecasts for two initialization dates; (a) 25 January 2018 and (b) 8 February 2018. Black, blue, and green lines indicate ERA5, FREE, and NUDGED, respectively. Colored thick lines indicate the ensemble mean, whereas colored thin lines indicate individual ensemble members. Vertical dashed lines indicate the onset date of the SSW.

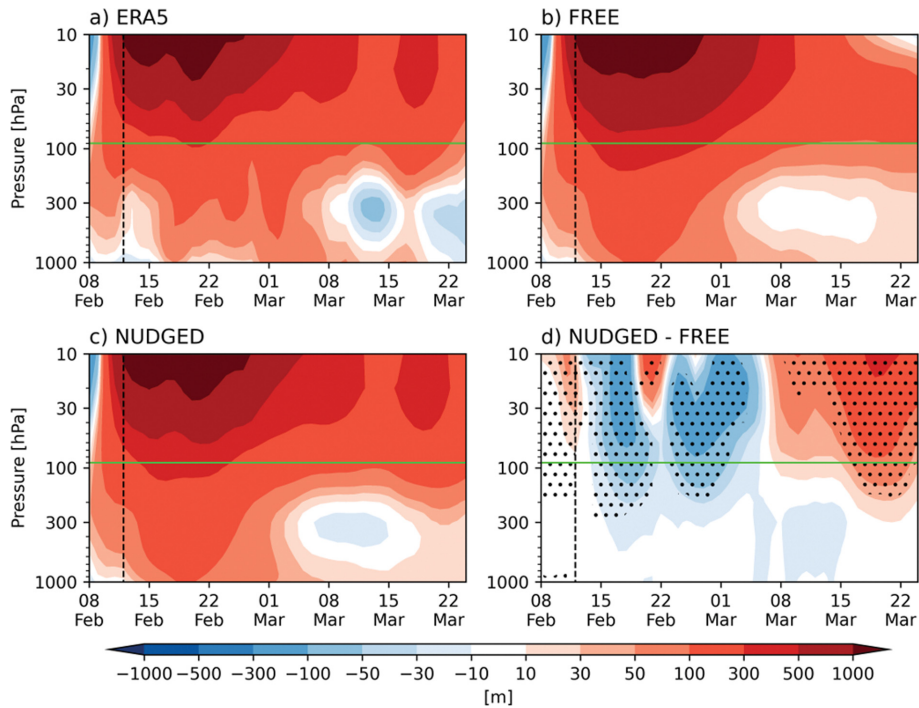


Fig. 2. Time-pressure development of the polar-cap (65–90°N) geopotential height anomalies in (a) ERA5, (b) FREE, (c) NUDGED, and (d) NUDGED minus FREE for 8 February initializations. The climatology calculated from ERA5 data is applied to ERA5 and model experiments. The dashed lines indicate the onset date of the SSW, and the green lines indicate the 90 hPa pressure level. Dotted values indicate statistically significant values at the 95% confidence level according to a Student's t-test.

못하였다(Fig. 1a의 파란색 실선). 반면 NUDGED 실험은 성층권 동서평균장 너징으로 인해 모든 앙상블

멤버가 ERA5와 유사한 동서바람을 모의하였다(Fig. 1a의 초록색 실선). 1월 25일 초기화와 달리, 2월 8일

초기화의 경우에는 짧은 선행일수(4일)로 인하여 FREE와 NUDGED 실험 모두 돌연승온을 성공적으로 모의하였다(Fig. 1b의 파란색, 초록색 실선).

앞서 확인한 돌연승온의 모의 여부에 따른 대류권 하층 영향을 확인하기 위하여, Fig. 2에서는 2018년 2월 8일 초기화한 실험에서의 극지방(Polar cap; 65~90°N) 지위고도 편차를 나타냈다. 양의 극지방 지위고도 편차는 NAM 지수와 음의 상관 관계를 가지며 (Baldwin and Thompson, 2009), NAM 지수를 대체하여 사용되기도 한다(Martineau and Son, 2015; Karpechko et al., 2017). ERA5에서는 발생일(Fig. 2의 검정색 점선) 직전부터 성층권 지위고도 상승이 나타나고, 대류권에서는 지위고도가 소폭 감소하다 증가하였다(Fig. 2a). 이후 성층권에서의 양의 지위고도 편차가 대류권까지 하향 전파하는 모습을 보인다. 앙상블 평균한 FREE와 NUDGED 실험은 모두 돌연승온을 성공적으로 모의하면서 ERA5와 유사한 지위고도 편차 구조를 모의하였다(Figs. 2b, c). Karpechko et al. (2017)을 따라 개별 앙상블의 하향 전파 유무를 확인하였을 때, FREE 실험은 다수의 앙상블(41개)에서 ERA5에서와 유사한 하향 전파가 확인되었다. 즉 짧은 선행기간(4일)을 통해 돌연승온을 성공적으로 모의하면서, 성층권(Fig. 2의 초록색 실선 위)에서의 너징이 없더라도 현실적인 성층권-대류권 연직 접합을 모의할 수 있음

을 보여준다. 유사한 결과가 GloSea6뿐만 아니라 다양한 현업모형에서도 동일하게 나타났다(Karpechko et al., 2018). 다만 두 실험 모두 돌연승온을 모의하더라도, 적분 시간이 지나면서 성층권 지위고도의 차이가 나타난다. FREE 실험의 성층권 변동성 모의는 3월 8일까지 잘 유지되나 그 이후에는 약하게 모의한 반면(Fig. 2b), NUDGED 실험에서는 3월 8일 이후에도 ERA5와 같은 편차가 나타나면서 FREE 실험 보다 현실적으로 모의하였다(Fig. 2c). 두 실험 간의 차이(NUDGED-FREE)를 확인했을 때, 3월 8일 이전에는 FREE 실험에서 NUDGED 실험 대비 강한 돌연승온을 모의하여 음의 지위고도 차이가 나타난다(Fig. 2d). 이후에는 FREE 실험의 극 소용돌이가 기후값으로 회복되면서, 성층권 지위고도 차이가 음에서 양으로 전환되고 대류권에서는 이와 반대인 음의 차이가 나타난다.

긴 선행 시간에서의 결과를 확인하기 위하여, 동일한 방식으로 2018년 1월 25일 초기화 실험의 결과를 Fig. 3에 나타냈다. FREE 실험은 긴 선행기간(18일)으로 인하여 돌연승온을 모의하지 못하고 오히려 평년대비 강한 극 소용돌이(음의 지위고도 편차)를 모의하였다(Fig. 3b). 대류권에서도 발생일 이전부터 존재하던 양의 지위고도 편차가 감소하는 형태로 나타나, 성층권과의 연관성은 보이지 않았다. 이러한 대류권의 지위고도 변화는 2월 1일 초기화한 다양한 현업

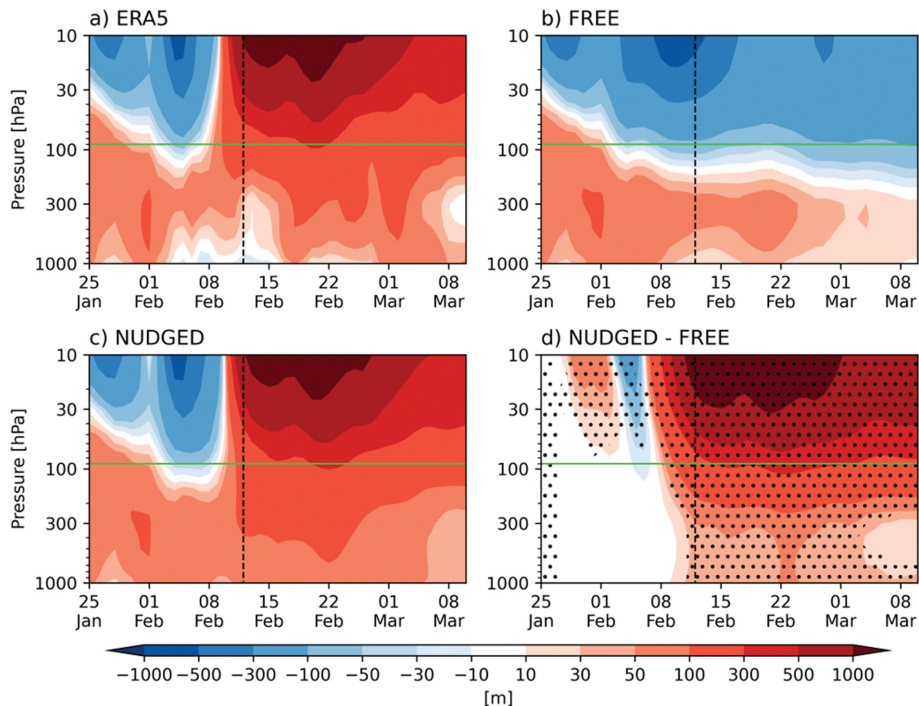


Fig. 3. Same as Fig. 2, but for 25 January initializations.

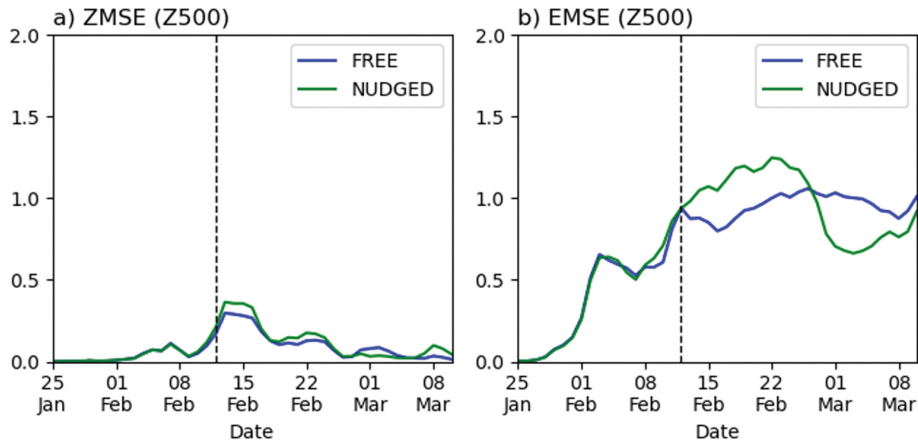


Fig. 4. Temporal evolution of (a) zonal-mean MSE, and (b) eddy MSE for 500 hPa geopotential height in FREE and NUDGED initialized on 25 January 2018. Blue and green lines indicate FREE and NUDGED ensemble means, respectively. The vertical dashed lines indicate the onset date of the SSW.

모형들의 다중모형평균에서도 확인된 바 있다(Karpechko et al., 2018). 앞선 초기화 실험과 동일한 방법으로 하향 전파 유무를 확인했을 때, FREE 실험은 37개 앙상블에서 지위고도 편차의 하향 전파가 발생하지 않았다. FREE 실험과 달리 NUDGED 실험은 성층권 동서평균장 너징으로 인하여 ERA5와 동일한 성층권 지위고도의 양의 편차를 모의하고, 성층권에서부터 지표까지 이어지는 양의 지위고도 차이를 보였다(Fig. 3c). 두 실험간 지위고도 차이는 95% 유의수준에서 유의하게 나타났으며 발생일 직전부터 전 고도에 걸쳐 나타났다(Fig. 3d).

본 연구와 유사하게 성층권 너징을 진행한 실험에서도 유사한 형태의 성층권 변동성 하향 전파를 보인다(Knight et al., 2021). 이는 성층권 동서평균상태만 너징해도 성층권-대류권 연직접합을 강제적으로 만들어줄 수 있음을 보여준다. 그러나 모든 돌연승온이 하향 전파를 하는 것은 아니기 때문에 정확한 메커니즘에 대한 연구가 여전히 필요하다. Karpechko et al. (2017)은 돌연승온이 발생하였을 때 절반 정도(57%)의 사례에서만 지위고도 편차의 하향 전파가 발생함을 보였다. 연직 접합을 설명하기 위해 중관 규모의 에디 운동속과 행성파의 흡수/반사 등 다양한 메커니즘이 제시되었지만 아직 이해가 부족한 상황이다(Baldwin et al., 2021).

돌연승온이 대류권에 미치는 영향을 자세히 분석하기 위해, FREE 실험에서 돌연승온을 모의하지 못한 2018년 1월 25일 초기화 실험 결과에 집중하였다. 앞서 정성적인 방법보다 정량적인 대류권 예측 성능 비교를 위하여, 모형의 적분 시간에 따른 500 hPa 북반구 중, 고위도(30~60°N) 지위고도의 MSE를 동서 평

균에서 기인한 성분(Zonal-mean MSE, ZMSE)과 에디에서 기인한 성분(Eddy MSE, EMSE)으로 분리하여 각 실험별로 나타냈다(Fig. 4). 먼저 ZMSE의 경우 돌연승온 발생 직후에 NUDGED 실험이 FREE 실험보다 약 0.1 정도 큰 오차를 모의하는 것을 제외하고 큰 차이점을 보이지는 않았다(Fig. 4a). 반대로 EMSE에서는 두 실험이 뚜렷한 차이를 보이는데, 발생일 직후 NUDGED 실험의 EMSE가 FREE 보다 최대 약 0.3까지 보다 큰 값을 보인다(Fig. 4b). 하지만 2월 27일을 전후로 NUDGED 실험의 EMSE가 크게 감소하면서 FREE 실험보다 최대 약 0.3 정도의 개선을 보였다. 이를 통해 돌연승온 발생 이후의 예측 성능에는 EMSE가 상대적으로 중요하게 작용함을 확인할 수 있다. EMSE뿐만 아니라 지위고도 공간 패턴의 상관성과 유라시아 지역의 지상기온에서도 유사한 예측 오차의 개선을 보였다(보여주지 않음). 이를 통해 동서평균 성분보다 공간 분포의 예측성이 전반적인 대류권 예측성에 중요하게 작용한 것을 확인하였다.

앞서 지위고도의 MSE 분석을 통해 동서방향의 공간 패턴(에디 성분)의 예측성이 중요함을 확인하였다. 해당 패턴의 지역분포를 확인하기 위해 Fig. 5에서는 ERA5와 각 실험, 그리고 실험간 차이를 북반구 500 hPa 지위고도를 기준으로 확인하였다. Hitchcock et al. (2022)에서는 연직 접합 기간을 대류권 NAM이 음의 값을 보인 2월 중순부터 3월 중순까지로 언급한 바 있다. 본 연구에서도 이를 반영하여, 지표 지위고도의 편차가 음에서 양으로 바뀐 2월 16일부터 적분 기간의 끝인 3월 10일까지를 평균하여 분석을 진행하였다. ERA5에서는 극지방에 강한 양의 지위고도 편차와 북대서양 및 유럽에 음의 지위고도 편차가 나타났고, 이

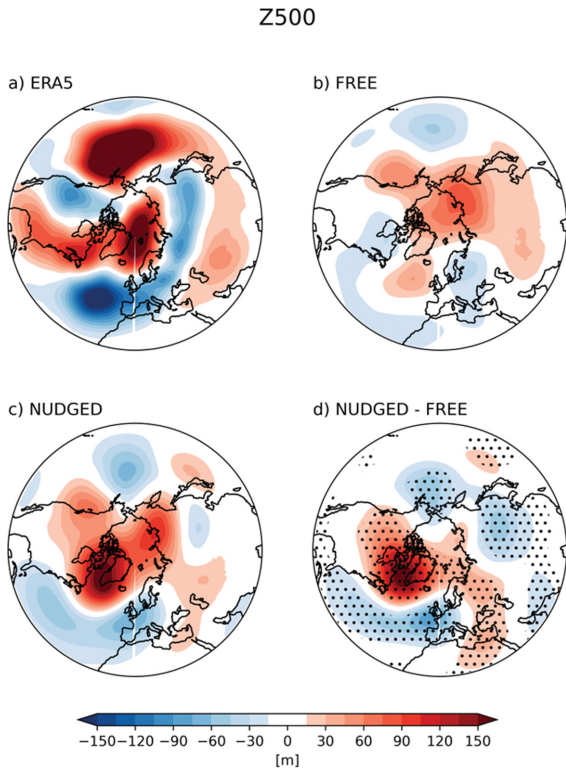


Fig. 5. 500 hPa geopotential height anomalies averaged from 16 February to 10 March in (a) ERA5, (b) FREE, (c) NUDGED, and (d) NUDGED minus FREE for 25 January initializations. The climatology calculated from ERA5 data is applied to ERA5 and model experiments. Dotted values indicate statistically significant values at the 95% confidence level according to a Student's t-test.

는 전형적으로 돌연승온이 발생하면서 음의 NAM (양의 극지방 지위고도 편차)이 북대서양에 집중되어 투영되는 음의 NAO와 관련된 것으로 보인다(Fig. 5a). 다만 북태평양과 북아메리카 지역에서 보이는 지위고도 편차는 돌연승온과는 별개로, 2017년 가을부터 이어진 라니냐의 영향으로 보인다(Knight et al., 2021). FREE 실험에서는 극지역에서 양의 지위고도 편차가 나타나나, 북대서양 해역에서도 양의 편차를 모의하면서 ERA5와 차이를 보였다(Fig. 5b). NUDGED 실험은 FREE 실험보다 극에서 양의 편차와 북대서양 지역에서 음의 편차를 모의하면서, FREE 실험보다 현실적인 NAO 패턴을 모의하였다(Fig. 5c). 즉 성층권의 동서 평균장만을 너정하더라도 대류권 지위고도의 동서방향 공간분포에도 영향을 줄 수 있으며, 에디 성분도 너정한 실험과 유사한 결과를 보였다(Knight et al., 2021). 그러나 두 실험 모두 라니냐의 영향으로

보이는 북태평양과 북아메리카지역에서 음의 Pacific-North Ameracian (PNA) 형태의 지위고도 편차는 모의하지 못하였다. 이는 현재 GloSea6 모형이 해당 기간의 라니냐에 의한 원격상관 패턴을 현실적으로 모의하지 못하여 발생한 것으로 추정된다. 두 실험 간의 차이에서는 Butler et al. (2017) 등에서 보인 전형적인 음의 NAO 패턴이 나타나면서, 성층권 돌연승온 발생 시 이에 의한 영향이 대류권까지 하향 전파함을 확인하였다(Fig. 5d).

지위고도 공간 패턴 모의 결과를 예측성 변화와 연결시켜 이해하기 위해, 돌연승온 발생 직후 일주일간 그리고 2주 후부터의 일주일간을 평균하여 지위고도를 확인하였다(그림으로 보이지 않음). 발생 직후 ERA5에서는 음의 NAO 패턴이 두드러지지 않고 라니냐에 의한 PNA 형태의 공간 패턴이 두드러졌다. 반면 NUDGED 실험에서는 돌연승온 발생 직후에서부터 음의 NAO 패턴이 두드러지게 나타나면서 Fig. 4c에서의 EMSE가 커진 것으로 보인다. 반면 발생 2주 이후부터는 ERA5와 NUDGED 실험 모두 NAO 패턴이 두드러지면서, NUDGED 실험의 EMSE가 개선되었다. 비록 돌연승온 발생 직후부터 음의 NAO 패턴을 모의하면서 예측성의 하락이 보였지만, 그 이후 기간에서는 돌연승온 이후 평균적으로 나타나는 NAO를 모의하면서 예측성의 개선이 이루어졌다. 즉 성층권 돌연승온 모의는 대류권의 중기 예측성능을 향상시킬 수 있으며, 계절내-계절 시간 규모에서 중요한 예측성 제공 인자임을 확인할 수 있다.

2018년 2월 돌연승온 발생 이후, 2월 후반부터 3월 초기까지 유라시아 지역의 지상 기온은 기후값 대비 약 10 K 낮은 한파가 발생하고(Kautz et al., 2020; Huang et al., 2022), 로마와 이베리아 반도에 각각 폭설과 지속적인 강수가 내렸다(Hitchcock et al., 2022). 본 연구에서도 Fig. 5에서와 동일하게 2월 16일부터 3월 10일까지 지상기온과 강수 편차를 평균하여 돌연승온 모의 여부에 따른 지표 예측 성능을 확인하였다(Figs. 6, 7). ERA5의 지상기온에서는 극지역과 북아메리카 동부지역에서 온난 편차, 유라시아 지역(Fig. 6의 초록색 상자)에서는 한랭 편차가 나타났다(Fig. 6a). 이는 기존에 알려진 돌연승온 이후의 평균적인 지상기온 편차와는 극지역으로 차이를 보인다. FREE 실험에서는 유라시아 지역에서 매우 약한 한랭 편차와 북아메리카 북동부 지역에서 한랭편차를 모의하면서 ERA5와는 다른 지상기온 편차를 보였다(Fig. 6b). 반면 NUDGED 실험에서는 유라시아 지역의 한랭 편차를 보다 현실적으로 모의했고, FREE 실험에서 나타난 북아메리카 북동부지역의 한랭 편차도 개선되었다(Fig. 6c). NUDGED와 FREE 실험과의 차이는 관측에서 보인 지상 기온 편차와 극지역으로 차이를 보

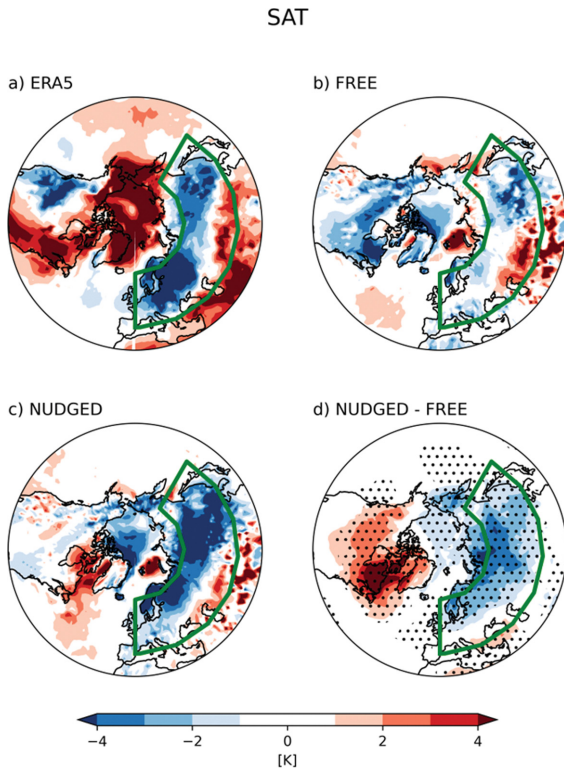


Fig. 6. Same as Fig. 5, but for surface air temperature anomalies. Green boxes indicate the Eurasian (40~65°N; 0~150°E) region.

였으나, 전형적으로 돌연승은 이후 관측되는 지상기온 편차에 매우 유사하게 나타났다(Fig. 6d). 실험에서 보다 강한 유라시아 한랭 편차가 잘 모의된 이유는 성층권 너징에 의해 발생한 극지방 고기압이 남향의 기압경도를 유도하면서 유라시아 지역에 북동풍 계열의 바람을 발생시켰기 때문으로 추정된다.

돌연승은 발생 후 나타났던 로마에서의 폭설과 이베리아 반도에서의 지속적인 강수는 ERA5의 강수 편차에서 북대서양과 유럽 남부의 많은 강수로 나타났다(Fig. 7a). FREE 실험에서는 유럽에서의 강수 증가를 약하게 모의하는데 그쳤지만(Fig. 7b), NUDGED 실험에서는 보다 강한 강수를 대서양과 유럽지역에서 모의하였다(Fig. 7c). 두 실험간 강수 차이도 그린란드와 아이슬란드 주변 해역에서는 적은 강수를, 서유럽과 북대서양에서는 많은 강수를 모의하였다. 이는 음의 NAO와 스톱트랙의 남하에 의해 발생한 것으로 보인다(Fig. 7d). 지상기온과 강수 편차를 통해 GloSea6에서 모의된 돌연승은의 영향이 대기 상층뿐만 아니라 지표에서도 나타남이 확인되었으나, 해당 연도의 편차보다 음의 NAO 형태를 가지는 돌연승은의 평균

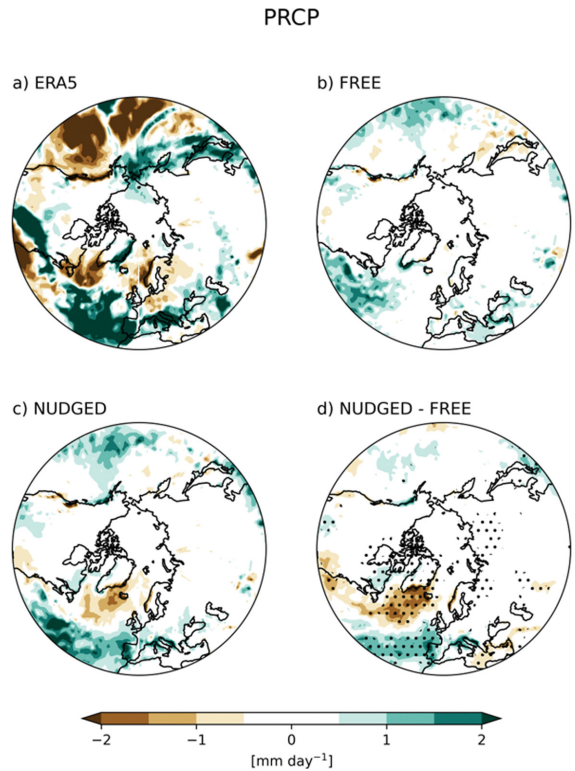


Fig. 7. Same as Fig. 5, but for precipitation anomalies.

적인 영향과 유사하게 나타나는 특징을 보였다.

Figure 8에서는 극지방의 지표 기압과 유라시아 지역의 지상기온 간의 관계를 정량적으로 확인하기 위해 동일한 기간에 대해 유라시아 지역(40~65°N; 0~150°E)의 지상기온 편차와 북극 지역(65~90°N)의 1000 hPa 지위고도 편차를 산점도와 각 변수별 확률 밀도 분포로 나타냈다. ERA5에서는(지상기온, 지위고도) 편차를(-1.8 K, 45.8 m)로 보이면서, 돌연승은 이후 극지역에서는 고기압성 편차와 유라시아 지상에서는 평년보다 낮은 기온이 나타났음을 보여준다(Fig. 8a의 검정색 원). FREE와 NUDGED 실험의 앙상블 평균에서는 각각(-0.6 K, 18.7 m)와 (-2.4 K, 60.1 m)를 모의하였고(Fig. 8a의 파란색, 초록색 원), NUDGED 실험은 FREE 실험 대비(-1.8 K, 41.4 m) 저온 현상과 고기압을 모의하였다. ERA5와 비교하여서는 각각 FREE 실험(1.2 K, -27.1 m), NUDGED 실험(-0.6 K, 14.3 m)의 오차를 보이면서, NUDGED 실험의 오차가 절반 크기로 ERA5에 보다 근접하였다. 또한 각 실험의 앙상블들에 대해 지상기온과 지표 지위고도의 편차에 대한 상관계수를 구하였을 때, FREE와 NUDGED 실험은 각각 -0.6과 -0.7의 강한 음의 상관성을 보였다. 이는 음의 NAM(양의 지상 지위고도 편차)에 따른 유

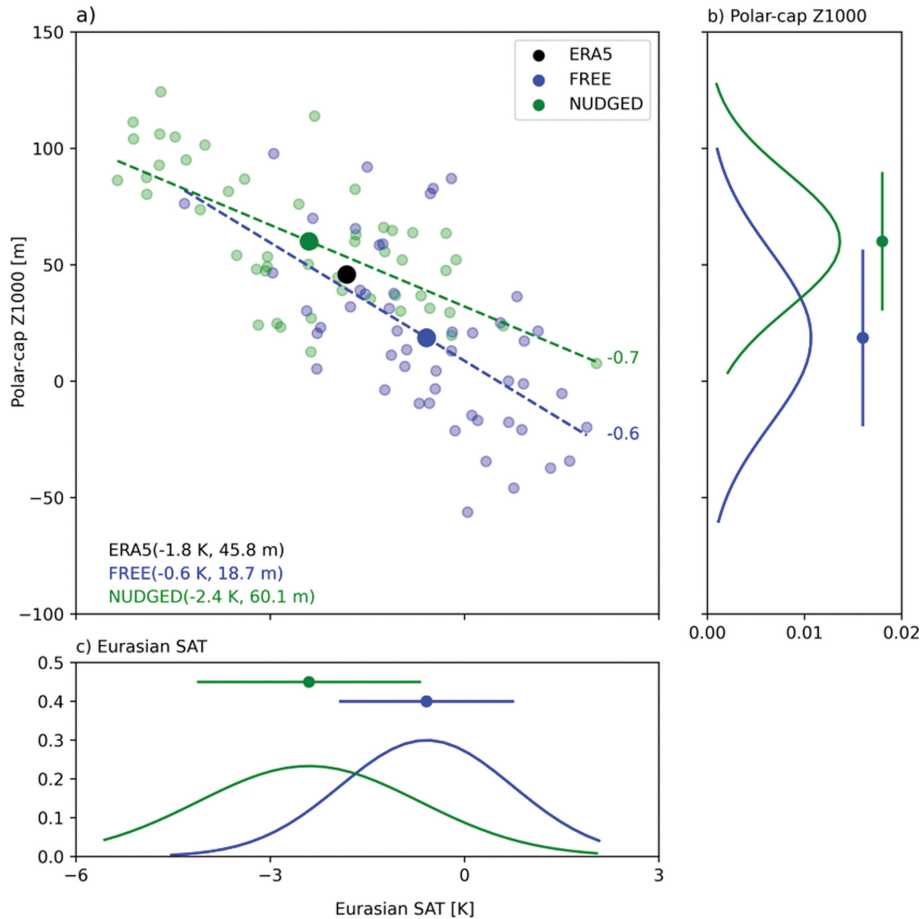


Fig. 8. (a) Scatter plot of Eurasian (40~65°N; 0~150°E) surface air temperature and polar-cap (65~90°N) geopotential height anomalies averaged from 16 February to 10 March. Black, blue, and green dots indicate ERA5, FREE, and NUDGED, respectively. Large colored dots indicate the ensemble mean, whereas small dots indicate individual ensemble members. Dashed lines indicate the regression lines for each experiment. Probability density function of (b) polar-cap geopotential height anomalies and (c) Eurasian surface air temperature anomalies are also illustrated. In (b, c), colored lines indicate the one standard-deviation bars.

러시아 한랭편차가 모형에서 잘 모의됨을 시사한다. 참고로 ERA5에서 해당 시기 유라시아 지상기온과 극지방 지표 지위고도의 1979~2018년 상관관계는 -0.44 로 확인되었다. 결국 NUDGED 실험이 FREE 실험보다 높은 극지방 고기압을 모의하면서, 유라시아 저온 현상 또한 보다 현실적으로 모의하였음을 알려준다. 이는 산점도 뿐만 아니라 각 변수별 분포도에서도 잘 나타나며(Figs. 8b, c), 성층권 너짐이 지상 순환장과 기온 예측에 긍정적인 효과를 미침을 보여준다.

4. 요약 및 토의

본 연구는 현업 S2S 모형인 GloSea6를 이용하여 돌

연승은 모의에 따른 대류권 예측성 변화를 분석하였다. 현업 S2S 모형에서 돌연승온에 의한 지표 예측성 영향을 평가하는 SNAPSI 프로젝트 프로토콜을 따라 FREE와 NUDGED 실험을 수행하였다. FREE와 NUDGED 실험은 각각 너짐이 없는 실험과 성층권의 동서평균장을 너짐하는 실험으로, 성층권이 대류권 예측성에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 연구 사례로는 SNAPSI 프로젝트의 사례 중 돌연승온 이후 하층 영향이 가장 뚜렷하게 나타난 2018년 2월 12일 돌연승온 사례를 선정하였다. 돌연승온 발생 4일 전인 2018년 2월 8일에 초기화한 FREE와 NUDGED 실험은 모두 돌연승온을 잘 예측하면서, 돌연승온과 관련된 극지방 지위고도 편차의 하층 전파를 잘 예측하였다. 반

면 18일 이전인 1월 25일에 초기화한 경우 FREE 실험은 돌연승온을 예측하지 못했지만, NUDGED 실험은 성층권 동서평균장 너징으로 인하여 돌연승온과 그에 따른 지위고도 편차의 하향 전파를 정성적으로 예측하였다. 정량적인 예측성 비교를 위해 각 실험에서 동서평균 및 에디 오차에서 기인한 MSE를 계산하였다. 비록 발생일 직후에는 두 실험 모두 높은 MSE를 보였지만, NUDGED 실험은 2월 27일 이후로 EMSE가 크게 감소하면서 최대 0.3의 MSE 개선을 보였다. 이는 2월 27일 직전부터 NUDGED 실험이 ERA5에서 보이는 음의 NAO 패턴을 모의하면서 지위고도 동서분포를 잘 예측한 결과다.

대류권 순환장뿐만 아니라 지상기온과 강수 편차 또한 NUDGED 실험이 FREE 실험보다 더 현실적으로 모의하였다. 지상기온 편차에서는 유라시아 지역의 한랭 편차가 확인되며, FREE 실험에서 보인 북아메리카 북부의 온난 오차 또한 개선되는 모습을 보였다. 강수 편차에서도 유럽 남부 지역과 이베리아 반도의 강수량을 보다 현실적으로 모의하였으나, 지상기온에 비해 예측성 개선이 뚜렷하지는 않았다. 유라시아 지상기온과 극지방 지상 기압과의 관계를 확인하였을 때, FREE와 NUDGED 모두 음의 북극지수에 따른 유라시아의 한랭 편차 관계를 잘 모의하였다. 또한 NUDGED 실험이 보다 강한 극지방 고기압을 모의하면서 유라시아 한랭 편차가 개선되었다. NUDGED 실험이 보인 오차(-0.6 K, 14.3 m)는 FREE 실험의 오차(1.2 K, -27.1 m)보다 절반 정도의 크기를 보였다. 이를 통해 돌연승온이 강제되었을 때, GloSea6는 음의 북극 지수에 따르는 순환장을 잘 예측하며 대류권 순환장과 지상 예측성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 SNAPSI 프로젝트 중 첫 번째 사례인 2018년 2월 돌연승온에 대한 사례 분석을 수행하였다. 그러나 모든 돌연승온 사례가 2018년 사례처럼 대류권에 음의 NAM을 보이지는 않는다(Karpechko et al., 2017). 실제로 SNAPSI 프로젝트 2번째 사례인 2019년 1월 돌연승온은 대류권에서 약한 음 혹은 양의 NAM을 보인다. 따라서 본 연구에서 확인한 돌연승온 너징에 따른 대류권 반응들이 일반적인 결과라고 확신하기 어렵고, 향후 다양한 돌연승온 사례로의 확장 및 비교 분석이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 기후예측 현실시스템 운영 및 개발(KMA2018-00322)과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2020M1A5A1110579).

REFERENCES

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581-584, doi:10.1126/science.1063315.
- _____, and D. W. J. Thompson, 2009: A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1661-1672, doi:10.1002/qj.479.
- _____, and Coauthors, 2021: Sudden stratospheric warmings. *Rev. Geophys.*, **59**, e2020RG000708, doi:10.1029/2020RG000708.
- Butler, A. H., J. P. Sjoberg, D. J. Seidel, and K. H. Rosenlof, 2017: A sudden stratospheric warming compendium. *Earth Syst. Sci. Data*, **9**, 63-76, doi:10.5194/essd-9-63-2017.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part 1: Climatology and modeling benchmarks. *J. Climate*, **20**, 449-469, doi:10.1175/JCLI3996.1.
- Domeisen, D. I. V., and Coauthors, 2020a: The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal prediction: 1. Predictability of the stratosphere. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD030920, doi:10.1029/2019JD030920.
- _____, and A. H. Butler, 2020b: Stratospheric drivers of extreme events at the Earth's surface. *Commun. Earth Environ.*, **1**, 59-66, doi:10.1038/s43247-020-00060-z.
- Gang, D.-W., H.-O. Cho, S.-W. Son, J. Lee, Y.-K. Hyun, and K.-O. Boo, 2021: Evaluation of sea surface temperature prediction skill around the Korean peninsula in GloSea5 hindcast: Improvement with bias correction. *Atmosphere*, **31**, 215-227, doi:10.14191/Atmos.2021.31.2.215.
- Goddard, L., and Coauthors, 2013: A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. *Clim. Dyn.*, **40**, 245-272, doi:10.1007/s00382-012-1481-2.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Hitchcock, P., and I. R. Simpson, 2014: The downward influence of stratospheric sudden warmings. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3856-3876, doi:10.1175/JAS-D-14-0012.1.
- _____, and Coauthors, 2022: Stratospheric nudging and predictable surface impacts (SNAPSI): A protocol for investigating the role of stratospheric polar vortex disturbances in subseasonal to seasonal forecasts. *Geosci. Model Dev.*, **15**, 5073-5092, doi:10.5194/gmd-15-5073-2022.

- Huang, J., P. Hitchcock, W. Tian, and J. Sillin, 2022: Stratospheric influence on the development of the 2018 late winter European cold air outbreak. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD035877, doi:10.1029/2021JD035877.
- Karpechko, A. Y., P. Hitchcock, D. H. W. Peters, and A. Schneidereit, 2017: Predictability of downward propagation of major sudden stratospheric warmings. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 1459-1470, doi:10.1002/qj.3017.
- _____, A. Charlton-Perez, M. Balmaseda, N. Tyrrell, and F. Vitart, 2018: Predicting sudden stratospheric warming 2018 and its climate impacts with a multi-model ensemble. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 13538-13546, doi:10.1029/2018GL081091.
- Kautz, L.-A., I. Polichtchouk, T. Birner, H. Garny, and J. G. Pinto, 2020: Enhanced extended-range predictability of the 2018 late-winter Eurasian cold spell due to the stratosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1040-1055, doi:10.1002/qj.3724.
- Kim, H., S.-W. Son, K. Song, S.-W. Kim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: 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.
- 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*, **28**, 233-245, doi:10.14191/Atmos.2018.28.3.233.
- Kim, H., J. Lee, Y.-K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021: The KMA Global Seasonal Forecasting System (GloSea6) - Part 1: Operational System and Improvements. *Atmosphere*, **31**, 341-359, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.341.
- Knight, J., and Coauthors, 2021: Predictability of European winters 2017/2018 and 2018/2019: Contrasting influences from the Tropics and stratosphere. *Atmos. Sci. Lett.*, **22**, e1009, doi:10.1002/asl.1009.
- Larson, J., R. Jacob, and E. Ong, 2005: The model coupling toolkit: A new Fortran90 toolkit for building multiphysics parallel coupled models. *Int. J. High Performance Computing Appl.*, **19**, 277-292, doi:10.1177/1094342005056115.
- 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.
- Meehl, G. A., and Coauthors, 2021: Initialized Earth system prediction from subseasonal to decadal timescales. *Nature. Rev. Earth Environ.*, **2**, 340-357, doi:10.1038/s43017-021-00155-x.
- Rao, J., C. I. Garfinkel, and I. P. White, 2020: Predicting the downward and surface influence of the February 2018 and January 2019 sudden stratospheric warming events in subseasonal to seasonal (S2S) models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031919, doi:10.1029/2019JD031919.
- Ridley, J. K., E. W. Blockley, A. B. Keen, J. G. L. Rae, A. E. West, and D. Schroeder, 2018: The sea ice model component of HadGEM3-GC3.1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 713-723, doi:10.5194/gmd-11-713-2018.
- Song, K., H. Kim, S.-W. Son, S.-W. Kim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction of GloSea5 model: Part 2. Stratospheric sudden warming. *Atmosphere*, **28**, 123-139, doi:10.14191/Atmos.2018.28.2.123.
- Statnaia, I., A. Karpechko, M. Kämäräinen, and H. Järvinen, 2022: Stratosphere-troposphere coupling enhances subseasonal predictability of Northern Eurasian cold spells. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **148**, 2769-2783, doi:10.1002/qj.4335.
- Storkey, D., and Coauthors, 2018: UK Global Ocean GO6 and GO7: A traceable hierarchy of model resolutions. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 3187-3213, doi:10.5194/gmd-11-3187-2018.
- Tripathi, O. P., A. Charlton-Perez, M. Sigmond, and F. Vitart, 2015: 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.
- Walters, D., and Coauthors, 2019: The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 1909-1963, doi:10.5194/gmd-12-1909-2019.
- White, C. J., and Coauthors, 2017: Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. *Meteor. Appl.*, **24**, 315-325, doi:10.1002/met.1654.
- Williams, K. D., and Coauthors, 2017: The Met Office Global Coupled model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) configurations. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **10**, 357-380, doi:10.1002/2017MS001115.