

겨울철 동아시아 지역 기온의 계절 예측에 눈깊이 초기화가 미치는 영향

우성호^{1),3)} · 정지훈²⁾ · 김백민^{1),*} · 김성중¹⁾

¹⁾극지연구소 극지기후연구부

²⁾스웨덴 예테보리대학교 지구과학과

³⁾서울대학교 지구환경과학부

(접수: 2011년 11월 21일, 수정: 2011년 12월 26일, 게재확정일: 2011년 12월 28일)

Impact of Snow Depth Initialization on Seasonal Prediction of Surface Air Temperature over East Asia for Winter Season

Sung-Ho Woo^{1),3)}, Jee-Hoon Jeong²⁾, Baek-Min Kim^{1),*}, and Seong-Joong Kim¹⁾

¹⁾Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, Incheon

²⁾Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Sweden

³⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul

(Received: 21 November 2011, Revised: 26 December 2011, Accepted: 28 December 2011)

Abstract Does snow depth initialization have a quantitative impact on sub-seasonal to seasonal prediction skill? To answer this question, a snow depth initialization technique for seasonal forecast system has been implemented and the impact of the initialization on the seasonal forecast of surface air temperature during the wintertime is examined. Since the snow depth observation can not be directly used in the model simulation due to the large systematic bias and much smaller model variability, an anomaly rescaling method to the snow depth initialization is applied. Snow depth in the model is initialized by adding a rescaled snow depth observation anomaly to the model snow depth climatology. A suite of seasonal forecast is performed for each year in recent 12 years (1999-2010) with and without the snow depth initialization to evaluate the performance of the developed technique. The results show that the seasonal forecast of surface air temperature over East Asian region sensitively depends on the initial snow depth anomaly over the region. However, the sensitivity shows large differences for different timing of the initialization and forecast lead time. Especially, the snow depth anomaly initialized in the late winter (Mar. 1) is the most effective in modulating the surface air temperature anomaly after one month. The real predictability gained by the snow depth initialization is also examined from the comparison with observation. The gain of the real predictability is generally small except for the forecasting experiment in the early winter (Nov. 1), which shows some skillful forecasts. Implications of these results and future directions for further development are discussed.

Keywords: Snow depth initialization, Seasonal prediction, Global climate model, Snow-albedo feedback, East Asian winter climate

1. 서 론

눈덮임 (snow cover)은 알베도와 같은 지표면의 물리적 특성을 변화시키고, 눈녹음에 따른 상변화, 열에 대한 차폐효과 (high conductivity), 열속 변화 등 지면

*Corresponding Author: Baek-Min Kim, Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea
Phone: +82-32-260-6226, Fax: +82-32-260-6109
E-mail: bmkim@kopri.re.kr

의 복사 및 에너지 균형을 변화시켜 지역적인 기온 변동에 직접적 영향을 주고 있음이 잘 알려져 있다 (Cohen and Rind, 1991; Leathers and Robinson, 1993; Leathers *et al.*, 1995; Gong *et al.*, 2004; Armstrong and Brun, 2008). 또한, 최근 연구에 따르면 이러한 지역적인 효과에 더해, 유라시아 대륙의 가을철 눈덮임은 겨울철 극진동의 위상 및 강도를 변화시킨다고 알려져 있다 (Cohen and Entekhabo, 1999; Saito and Cohen, 2003; Cohen and Barlow, 2005; Cohen *et al.*, 2009). 뿐만아니라 대규모 대기 강제력으로 작용하여 성층권을 비롯한 전 지구적 기후 변동에도 영향을 미친다는 연구결과가 최근 발표되고 있는 등 그 중요성이 더욱 부각되고 있다 (Cohen *et al.*, 2001; Gong *et al.*, 2004; Allen and Zender, 2010). 한편, 동아시아 기상현상과도 직접적인 관련성이 밝혀지고 있는데, 기상청 (2010)은 관측 자료 분석을 통해 한반도에서 발생하는 한파가 가을철 시베리아 지역 눈덮임과 밀접한 관련성이 있음을 규명하였다.

정확한 눈덮임, 혹은 눈깊이 (snow depth)를 모의하는 것은 기후모델의 실험결과에도 큰 영향을 준다. Cohen and Rind (1991)는 전구 기후모델에서의 눈덮임과 지상기온 사이의 관계를 조사한 결과, 눈이 많이 덮인 지역에서의 단파 반사 효과와 눈이 녹으면서 생기는 잠열의 흡수는 모델의 지상기온을 낮추는 효과가 있음을 제시하였다. Kumar and Yang (2003)은 기후모델을 이용하여 중위도 지역에서의 눈덮임의 영향을 조사하였는데, 특히 저층 대기에서의 기온의 계절 변동은 눈덮임과 연관된 알베도 효과에 크게 영향 받음을 제시하였다. Walsh and Ross (1988)는 미국 기상연구소 (NCAR; National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 CFM (Community Forecast Model)을 활용하여 관측 눈덮임이 많을 때와 적을 때를 각각 미리 처방하고 30일간 겨울철 예측을 수행한 결과, 초기 눈덮임의 차이가 예측기간동안 지상기온과 기압 변화에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 최근에는 극진동과 연관된 모델링 연구가 많이 이루어졌는데 (Gong *et al.*, 2002, 2003; Fletcher *et al.*, 2007, 2009a) 관측된 유라시아 눈덮임을 기후모델에 처방하여 관측에서 나타났던 가을철 눈과 극진동 사이의 관계를 유사하게 모의하였다. 또한 이러한 기후모델에 의 눈덮임과 극진동 사이의 관계는 지표 강제력에 의한 로스비파 반응과 평균적인 배경 정상과 사이의 선형 간섭이 중요한 역할을 함이 Smith *et al.* (2010)에 의해 밝혀졌다.

그러나, 계절예측 시스템의 관점에서 눈덮임은 단지 진단 변수 (diagnostic)일 뿐이고, 예측에는 예단변수 (prognostic)인 눈깊이가 필요하다. 따라서 눈덮임 자료를 이용한 모델 연구들에서도 가정을 통해 눈덮

임으로부터 눈깊이로의 변환이 필요하고, 이 과정에서 오차를 수반하게 된다. 하지만 신뢰성 있는 관측 눈깊이 자료의 부재로 눈깊이의 대기 영향에 대한 연구는 아직까지 많이 부족한 실정이다. 현재까지 소수의 관측 연구에서 눈깊이에 따른 기온 하강을 조사한 결과, 깊은 눈이 얇은 눈에 비하여 기온의 하강을 더욱 강하게 일으킴을 확인하였다 (Baker *et al.*, 1992; Fallot *et al.*, 1997). Gong *et al.*, (2004)은 눈깊이와 눈덮임을 구분하여 모델에 삽입하고 그 효과를 조사한 바 있다. 이러한 기존 연구들은 눈덮임 뿐만 아니라 눈깊이의 변동 또한 대기와의 상호작용에서 중요하게 고려되어야 함을 제시하고 있다.

눈의 지역적인 효과와 원격 (remote) 상관에 대한 이러한 연구 결과들을 볼 때, 눈깊이는 기후모형을 이용한 겨울철 계절 예측의 인자로서 활용가능성이 충분하다고 판단되지만 실제적인 활용의 예는 많지 않다. 앞에서 소개한 대부분의 연구들은 계절 예측이 아닌 눈덮임의 효과에 대한 진단적 연구들이어서 본격적인 계절예측 활용가능성을 살펴본 연구는 극소수에 불과하다. 더욱이, 그 중요성에도 불구하고, 현재 기상청 등에서 한반도 겨울철 계절예보에 사용되는 예측 시스템들은 시베리아 눈덮임 자료조차 활용하지 못하고 있어서 계절예측성 향상에 뚜렷한 한계가 있는 실정이다. 이러한 눈깊이를 예측에 활용하는 것이 어려운 이유는 전 지구적인 관측 자료의 부족 및 실시간 모니터링의 한계 등이 큰 원인으로 생각된다. Orsolini *et al.* (2011)이 재분석 자료의 가을철 유라시아 지역의 눈상당수량 (snow water equivalent)을 기후모델에 너징 (nudging)하여 고위도 지역 기후변동의 계절 예측성 향상을 기대할 수 있음을 제시하였지만, 재분석자료를 사용하였고 또한 예측기간 동안 관측 강설을 지속적으로 공급하여 주었으므로 진정한 의미의 계절 예측효과에 대한 평가는 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 이러한 초기단계에 있는 눈깊이 자료를 활용한 계절예측 연구를 시도하고 그 가능성을 조사하는데 그 의의가 있으며, 북반구 겨울철 관측 눈깊이 정보를 모델 예측 초기장에 적용시켜 발생하는 문제점을 인지하고 해결 방안을 제시하였다. 또한 적용된 초기화 방안으로 실제 계절예측을 수행함으로써 초기 눈깊이에 따른 동아시아 지역에서의 기온변동 정도를 조사하였다. 이를 통하여 겨울철 동아시아 지역 기온 계절 예측에 눈깊이 초기화의 활용가능성을 검토해 보았다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료

본 연구에 사용된 눈 관측 자료는 캐나다 기상센터

(CMC: Canada Meteorological Centre)에서 제공하는 눈깊이 자료이다 (Brown and Brasnett, 2010; nsidc.org/data/nsidc-0447.html). 이 자료는 세계기상기구로부터 얻어진 GTS (Global Telecommunication System)에 포함된 북반구 중관 기상 관측자료와 상시특별항공관측 (METAR, METeoro logical Aviation routine weather Report) 등의 자료를 분석하여 생산된다. 또한 관측이 부족한 지점에서는 자료 분석 시스템의 겨울철 강설 (0°C 이하에서의 강수)과 눈의 밀도를 고려하여 눈깊이를 추정하고 이렇게 확보한 자료로부터 최적 내삽 기법 (optimal interpolation)을 활용하여 격자자료로 생산한다 (Brasnett, 1999). 이 자료는 1998년 3월부터 2010년 12월까지 약 12년간의 기간 동안 일간격으로 제공되고 공간해상도는 북반구 ($180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$) 영역에서 $24\text{km}\times 24\text{km}$ 의 고해상도를 가진다. 본 자료를 모델의 초기조건으로 사용하기 위하여 모델 해상도인 $2.5^{\circ}\times 2.0^{\circ}$ 단위격자 내에 존재하는 눈깊이 값들을 격자 평균하여 해상도를 일치시켰다. 또한 본 자료는 눈깊이의 기후값과 변동성 그리고 기후모델의 바이어스 조사에도 활용되었다. 사용된 눈깊이 자료와 지상기온 사이의 관련성을 조사하기 위하여 눈깊이 자료와 같은 기간 동안의 ERA-interim 재분석 일별, 월별 2m-기온 (지상기온) 자료를 사용하였다 (Dee *et al.*, 2009).

모델 수행에 필요한 기타 경계조건으로 영국 해들리 센터의 월별 해수면 기온 자료와 해빙 자료 (Rayner *et al.* 2003)가 사용되었으며 예측에 필요한 대기 초기장은 NCEP (National Center for Environmental Prediction) R2 재분석 자료를 사용하였다 (Kanamitsu *et al.*, 2002).

2.2. 모델과 눈깊이 초기화 기법

본 연구에서 눈깊이 초기화의 영향을 조사하기 위해 사용된 기후모델은 CAM3 (Community Atmospheric Model Version 3.0; Collins *et al.*, 2004)이다. CAM3는 NCAR에서 개발되었고 전 세계적으로 기후 변화와 변동성 연구뿐만 아니라 기후 예측 분야에서도 활발히 활용되고 있다. 본 연구에서는 유한 볼륨 역학 (finite volume dynamics) 코어를 사용하여 수평적으로 144×91 ($2.5^{\circ}\times 2.0^{\circ}$)의 격자를 가지고 있으며 연직으로는 표층에서 하부 성층권까지 26층을 가지고 있다. 이러한 공간 해상도는 동아시아 지역 기온의 특성모의와 계절 예측에 있어 충분한 해상도로 판단된다. CAM3는 지면 모델 (land surface model)로 CLM3 (Community Land Model Version 3.0)를 채용하고 있는데, 이 모델은 눈을 포함한 수문, 토양 그리고 식생의 물리과정 등이 모수화되어 있다. CLM3은 CAM3에서 생산된 대기 상태와 CLM3에서의 눈과 수문학

적 상태를 활용하여 지면 에너지와 모멘텀 그리고 복사속을 계산한 후 대기와 상호작용하도록 구성되어 있다 (Olsen *et al.*, 2004).

본 연구에서는 관측에서 얻어진 눈깊이 자료를 활용하여 NCAR CAM3의 지면 모형인 CLM3의 초기장에 효과적으로 삽입하는 방식을 택하였다. 이 방안은 강수 계절 예측에 있어 여름철 토양 수분 초기화의 효과가 있는지를 판단하기 위해 국제적으로 진행된 GLACE 실험 (Koster *et al.*, 2004)에서 제안한 방법을 눈깊이 변수에 적용한 것이다. CLM3 모형은 지표면 위에 쌓인 눈의 변화를 기술하기 위해 최대 5개의 눈층 (snow layer)을 구성하고 각 층을 시간에 따라 적분한다 (Olsen, *et al.*, 2004). 눈층의 개수는 눈깊이와 눈의 용해에 따라 증가 혹은 감소하게 되며, 각 층마다 눈의 나이, 눈 속의 물 함량, 그리고 얼음 함량 등의 변수들을 계산하게 된다. 따라서 관측 눈깊이를 모델에 삽입하기 위해서는 눈층의 구조뿐만 아니라 관련된 변수들도 초기화 해주어야 한다. 본 연구에서 초기화 되는 눈의 양은 새로 쌓인 눈으로 가정하였고, 이에 따라 초기화된 눈의 나이는 0으로, 눈층에 물과 얼음 함량은 0이고 순수한 눈만 존재하는 것으로 처리하였다. 눈층 구조의 선언은 CLM3의 소스코드에 기술되어 있는 모델 눈깊이와 눈 관련 변수 사이의 관계식으로부터 역으로 아래 식 (1)과 같이 처리하였다.

$$\begin{aligned}
 &\text{For } 0.01\leq D\leq 0.03 && \text{nsf}=1, \text{d1}=D \\
 &\text{For } 0.03\leq D\leq 0.04 && \text{nsf}=2, \text{d2}=D/2, \text{d1}=d2 \\
 &\text{For } 0.04\leq D\leq 0.07 && \text{nsf}=2, \text{d2}=0.02, \text{d1}=D-d2 \\
 &\text{For } 0.07\leq D\leq 0.12 && \text{nsf}=3, \text{d3}=0.02, \text{d2}=(D-0.02)/2, \text{d1}=d2 \\
 &\text{For } 0.12\leq D\leq 0.18 && \text{nsf}=3, \text{d3}=0.02, \text{d2}=0.05, \text{d1}=D-d3-d2 \\
 &\text{For } 0.18\leq D\leq 0.29 && \text{nsf}=4, \text{d4}=0.02, \text{d3}=0.05, \text{d2}=(D-d4-d3)/2, \text{d1}=d2 \\
 &\text{For } 0.29\leq D\leq 0.41 && \text{nsf}=4, \text{d4}=0.02, \text{d3}=0.05, \text{d2}=0.11, \text{d1}=D-d4-d3-d2 \\
 &\text{For } 0.41\leq D\leq 0.64 && \text{nsf}=5, \text{d5}=0.02, \text{d4}=0.05, \text{d3}=0.11, \text{d2}=(D-d4-d3-d2)/2, \text{d1}=d2 \\
 &\text{For } 0.64\leq D && \text{nsf}=5, \text{d5}=0.02, \text{d4}=0.05, \text{d3}=0.11, \text{d2}=0.23, \text{d1}=D-d5-d4-d3-d2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, D 는 눈깊이 (m), nsf 는 눈층의 총 갯수, d_n 은 각 층 (n 번째 층)의 깊이를 나타낸다. 즉, 주어진 관측량 D 로부터 눈 관련 모델변수인 눈 층수의 결정 (nsf), 각 층의 두께 결정 과정을 수행한다. 한편, 본 관측에서 얻어진 눈깊이를 기후 모델에 대입하여 눈깊이 초기화 효과를 기대하기 위해서는 특별한 보정

단계를 거쳐야만 한다. 이는 모델에서 모의하는 눈깊이와 관측 눈깊이의 평년값과 변동성 사이에 큰 차이 즉, 모델이 바이어스를 지니고 있기 때문이다. 이러한 차이를 보정 없이 원시 관측 자료 상태로 직접 모델에 삽입할 경우, 이 차이가 큰 강제력으로 작용하여 예측기간 동안 모델 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 모델의 눈깊이 바이어스의 특징에 대해서는 다음장에 자세히 기술한다. 일반적으로 대기장이나 지면 습윤 조건 등을 모델 기후값과 큰 차이가 있는 관측값을 사용하여 초기화하고 적분을 시작하면 모델이 모의하는 상태는 이들 값으로부터 모델의 기후값 방향으로 진행하게 되는데, 이를 기후 표류 (climate drift) 라고 한다. 따라서 초기화를 사용한 예측에서 기후 표류 현상이 나타나면 모델은 초기 조건의 영향을 제대로 반영하지 못한다. 이를 피하기 위해 본 연구에서는 Koster *et al.* (2004)이 기후모델에 토양수분 (soil moisture)를 초기화하여 계절 예측에 활용한 연구에서 고안한 재정규화 방안을 사용하였다.

$$\frac{SD_i^m - \overline{SD}^m}{\sigma(SD^m)} = \frac{SD_i^o - \overline{SD}^o}{\sigma(SD^o)} \quad (2)$$

$$SD_i^m = \overline{SD}^m + \sigma(SD^m) \left(\frac{SD_i^o - \overline{SD}^o}{\sigma(SD^o)} \right) \quad (3)$$

여기서, SD는 눈깊이, 위첨자 m은 모델, o는 관측, σ 는 표준편차, 그리고 바는 기후값을 의미한다. 식 (2)와 (3)에 기술된 바와 같이, 먼저 관측값을 정규화(normalize)하고 모델의 표준편차를 곱한 후, 모델의 평균을 더하는 방식으로 관측값의 아노말리가 모델이 모의하는 기후 평균값 및 변동성을 갖도록 조절하였다. 위 계산에서 사용된 모델 눈깊이의 기후값(SD^m)과 모형의 눈깊이 변동성의 척도인 $\sigma(SD^m)$ 을 구하기 위해 관측 해수면 온도와 해빙을 경계조건으로 1979년부터 2010년까지 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 타입 모델 적분을 수행하였다. 사용한 경계자료는 영국 해들리 센터에서 제공하는 해수면 온도와 해빙 자료이다. 이때 대기의 비선형성을 고려하고 통계적 유의성을 확보하기 위해 8개의 앙상블 멤버를 구성하였다. 앙상블 멤버는 NCEP R2 6시간 간격 자료를 활용하여 서로 다른 8개의 대기 초기장을 삽입하여 적분하는 것으로 구성하였다. 관측의 경우 1999~2010년 사이의 CMC 눈깊이 자료로부터 기후값과 표준을 생산하였다. 이렇게 얻어진 눈깊이 아노말리 값 (SD_i^m)이 식 (1)에서 눈깊이 (D)로 사용되었다.

본 연구에서 고안된 눈깊이 초기화 방법의 유효성

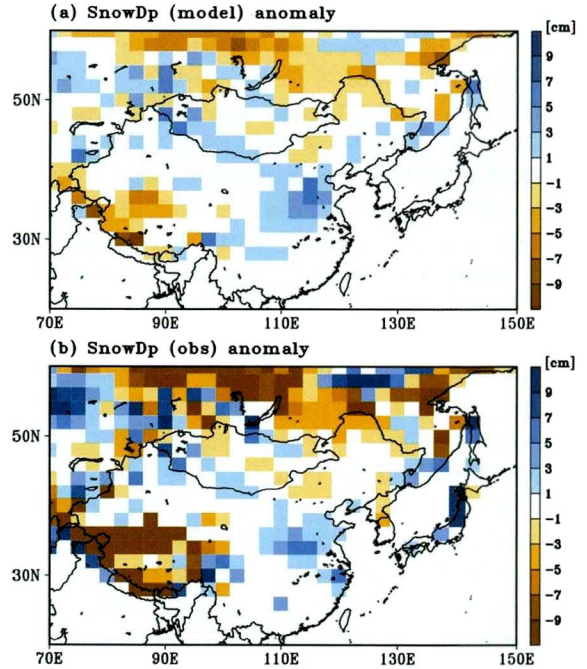


Fig. 1. (a) Initialized model snow depth anomaly [cm] for seasonal forecast starting from 2005.1.1. The scaled snow depth anomaly is prepared using the observed snow depth anomaly shown in (b). Anomaly scaling method described in sec. 2.2 is applied to the (b) observed snow depth anomaly [cm] (CMC snow depth anomaly) used for the initialization.

을 설명하기 위하여 2005년 1월 눈깊이 초기값을 관측자료 값과 비교하여 살펴보았다 (Fig. 1). 앞에서 서술한 바와 같이 최종적으로 모델에 투입되는 눈깊이 초기값은 모델의 평년값과 변동성을 고려해 재정규화 (renormalization) 되었기 때문에 수평적 분포는 비교적 관측과 유사하여야 하며, 아노말리의 크기는 모델 눈깊이 변동 특성을 반영하게 된다. Fig. 1(b)의 관측 눈깊이 분포를 보면 바이칼호 북쪽에 평년에 비하여 7cm 이상 눈이 적게 내렸으며 티벳 서부 지역 또한 눈이 매우 적게 내렸다. 반면 중국 중부지역과 일본 중부, 그리고 블라디보스톡 지역은 평년에 비하여 많은 눈이 내렸다. Fig. 1(a)는 모델 실험에 사용된 눈깊이 아노말리이며, 관측 아노말리와 같이 바이칼호 북쪽과 티벳 지역에 음의 아노말리가 보이고 중국 서부 지역 눈깊이의 양의 아노말리가 잘 반영되어 있다. 그러나 재정규화된 모델의 눈깊이는 관측에 비해 전반적으로 양, 음의 아노말리 모두 보다 적게 나타나는 특성을 보인다. 이는 본 사례의 특수한 경우가 아니라 눈깊이 변동성의 과소모의하는 CAM3의 특징임을 4장에서 보일 것이다. 더욱이 일반적으로 기후모형이

관측에 비하여 눈깊이 변동성을 적게 모의하는 결과는 이미 잘 알려져 있다 (Hardiman *et al.*, 2008).

2.3. 계절예측 실험설계

동아시아 겨울철 기온 예측에 있어서 눈깊이 초기화의 영향을 조사하기 위해 1999년부터 2010년까지 12년의 겨울을 선정하고 매해 9월 1일부터 이듬해 4월 1일까지 매월 1일의 초기조건으로 3개월간의 예측을 수행하였다. 또한 눈깊이 초기화 효과를 조사하기 위해 각각의 계절예측에 있어 눈깊이 초기화된 실험 (S1)과 눈깊이 초기화를 적용하지 않은 실험 (S2)를 구성하였다. 두 실험에서 해수면 온도와 해빙 등의 경계조건과 대기 초기장, 그리고 눈깊이를 제외한 지면 초기조건은 모두 동일하게 사용하였다. 두 실험의 유일한 차이는 S1 실험의 경우 눈깊이 초기화가 적용된 지면 초기장을 삽입하여 예측하였고 S2는 표준실험인 AMIP 타입 실험에서 추출된 지면 초기장을 사용하여 예측하였다는 점이다. Fig. 2는 예측 실험설계와 사용된 경계 및 초기자료에 대해 요약하여 보여준다. 두 실험 세트에서 계절예측을 위해 해수면 온도는 예측 시작일의 해수면 온도 아노말리를 예측기간 동안 동일하게 유지시키는 아노말리 지속 방법 (anomaly persistent method)을 적용하였고, 해빙 자료는 1979-2010년 기후값을 사용하였다. 대기의 비선형성을 고려하기 위해, 각 실험당 8개의 앙상블 예측을 실시하였는데, 필요한 대기 초기장은 예측 시작일로부터 가장 가까운 이전 6시간 간격의 NCEP R2 자료를 사용하여 8개의 앙상블 멤버를 구성하였다. 따라서 총 실험의 개수는 1536 (12년 × 8개월 × 앙상블 개수 (8) × 실험 종류 (2)) 개에 달한다. 본 연구에서는 늦가을과 한겨울, 늦겨울의 눈깊이 초기화 효과를 조사하기 위해 11월과 1월 그리고 3월에 대하여 각각 예측결과를 조사하였다.

3. 관측 눈깊이 자료의 특성

눈깊이 자료를 예측에 활용하기에 앞서, 자료에서 나타나는 동아시아 지역 눈깊이의 기후학적 시공간적인 분포 특성과 변동성을 살펴보았다.

Fig. 3은 동아시아 지역에서의 분석 기간 동안 10월~3월 사이의 눈깊이 월별 기후값과 표준편차의 공간분포를 보여준다. 눈깊이 기후값의 변동을 살펴보면 (Fig. 3 좌측열) 시베리아 북쪽에서 눈덮임이 발달하기 시작하여 11월에는 45°N까지 눈이 덮이고 눈덮임의 경계는 1월까지 점점 남하하여 한반도까지 눈덮임이 발생한다. 눈덮임 경계의 남하와 더불어 눈깊이의 증가도 뚜렷하게 관측된다. 시베리아 북부지역 특히, 러시아 중부와 우랄 산맥 부근에서 눈이 10월 이

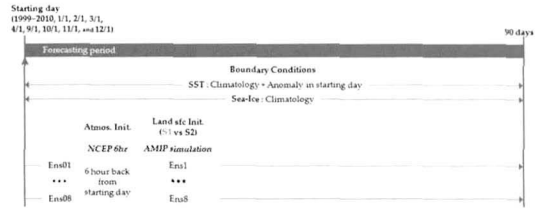


Fig. 2. Experiment design for each seasonal forecast. S1 (red) experiment indicates the model simulation with the land initial condition including the scaled snow depth anomaly. S2 is uninitialized run.

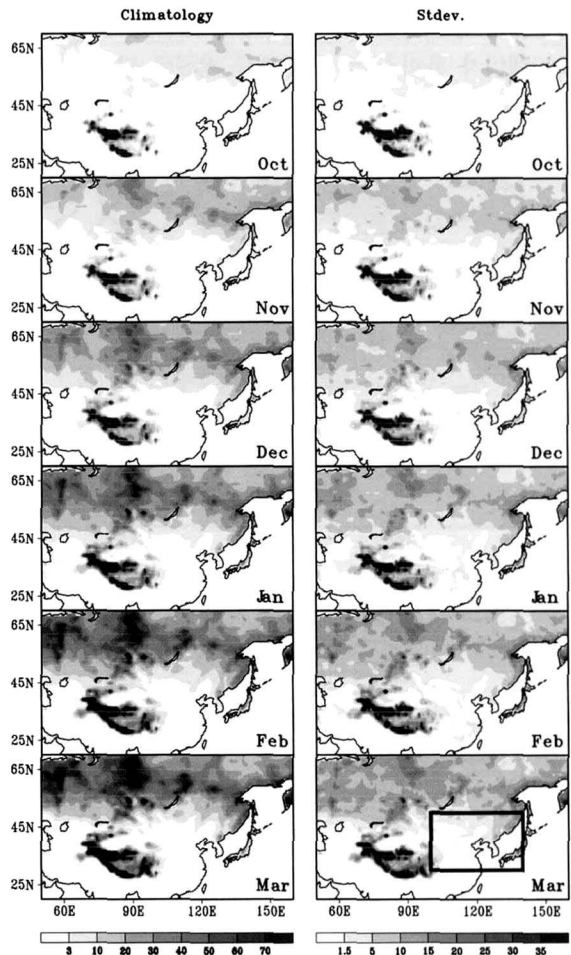


Fig. 3. Climatology (left column) and standard deviation (right column) of monthly averaged snow depth from October to March. Data are provided by Canadian Meteorological Center (<http://nsidc.org/data/nsidc-0447.html>). The box indicates the East Asia region in this study.

후 급격히 증가하여 1월에서 3월까지의 70cm 이상의 많은 눈이 쌓인다. 눈덮임 경계지역에서의 눈깊이는 1월 이후에도 10cm 정도의 눈이 유지되다가 3월부터는 눈이 녹아 눈덮임 경계의 위도가 높아짐을 알 수 있다.

각 월별 눈깊이 변동성의 크기 (Fig. 3 우측열)는 기후값 변동에 비해 작지만 기후값의 분포와 비슷한 공간 특성을 나타낸다. 특히 우랄 산맥 주변과 시베리아 고원 등의 고위도 지역에서 눈깊이가 가장 큰 시기인 1월~3월 동안에 큰 변동성이 나타난다. 고위도 지역과 비교하였을 때, 동아시아 지역을 포함한 눈의 경계지역에서의 변동성은 그 크기가 작았다. 하지만 눈덮임 경계지역에서의 변동성은 고위도에 비해 기후값 대비 상대적으로 큰 변동성을 지닌다. 지면 모델의 에너지 플럭스 및 지면복사 계산에 영향을 주는

눈덮임은 눈깊이로부터 모델에서 추정되는데, 평균 눈깊이가 크지 않은 경계지역에서의 작은 눈깊이 변화는 눈덮임에는 상당한 영향을 미치게 된다. 따라서 이 지역의 에너지 플럭스 및 복사속 등의 변화에 영향을 미치게 되고 결과적으로 지상기온의 변동에 큰 영향을 미치리라 판단된다.

Fig. 3에서 박스로 표시된 동아시아 영역 (100°E~140°E, 30°N~50°N)은 이러한 눈덮임의 경계지역에 해당한다. 이 영역에 대해 평균된 11월3월 눈깊이와 지상기온 변동 사이의 상관관계를 맵으로 나타내었다 (Fig. 4). 일자료와 월자료를 11월에서 3월까지 분석해 본 결과, 한반도를 포함한 화중 및 만주 지역에서 눈깊이와 지상 기온사이에는 유의한 수준의 상관관계를 보이고 있음을 확인하였다. 특히 월자료의 경우 한반도 인접 만주지역에서 상관관계 0.5 이상의 높은 상관계수를 나타내고 있어 한반도 기온 변동과 눈깊이 사이에는 큰 관련이 있음을 알 수 있다. 대체적으로 월자료에서 보다 높은 상관관계가 나타나는 것은, 눈깊이가 겨울철 강수와 기온의 함수일 뿐만 아니라 앞선 기간의 눈깊이의 영향을 받게 되므로 기온의 장기 변동과 보다 밀접한 관계가 있기 때문으로 여겨진다 (Beniston, 1997).

그런데 이러한 눈깊이와 기온 사이의 관계는 평균된 위도대에 따라 큰 차이를 보임을 확인하였다. Fig. 3에 표시된 동아시아 영역인 박스를 위도대에 따라 30°N~50°N, 40°N~60°N, 50°N~70°N의 세 박스로 나눈 뒤 각각의 박스에서 평균한 눈깊이와 기온 사이의 상관관계를 조사하였다 (Table 1). 위도대가 10°N 높아질 때마다 눈깊이와 기온사이의 상관관계는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 심지어 50°N~70°N 영역에서는 부호가 바뀌어 양의 상관관계가 나타났으나 이는 유의하지 않다. 이러한 현상은 크게 두 가지 이유 때문으로 판단된다. 먼저 위도에 따른 평균 눈깊이 그리고 그 변동성의 차에 의한 영향을 생각할 수 있다. 북쪽으로 갈수록 평균 눈깊이가 깊어지므로 10

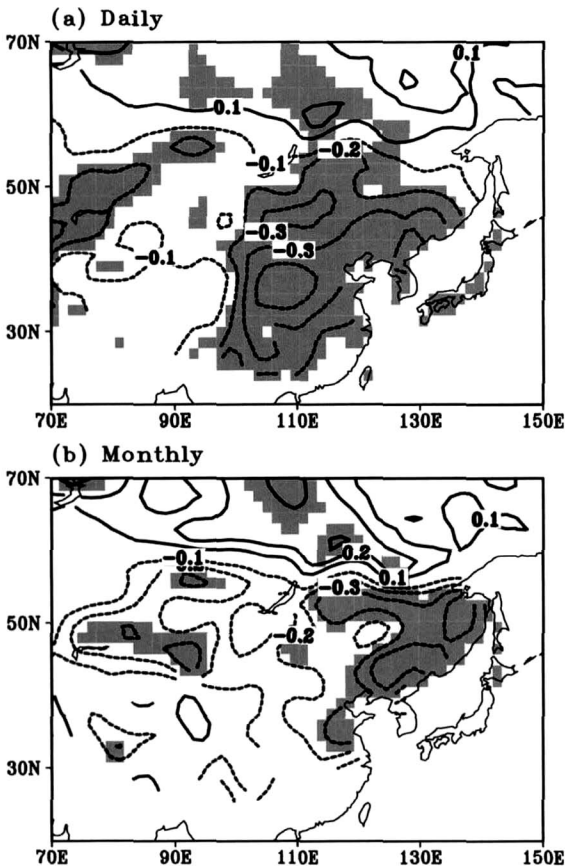


Fig. 4. (a) Correlation map between daily snow depth and surface air temperature averaged over East Asia in winter season (November to March). (b) Same as (a) except for monthly. Shading in (1) and (2) represents the area satisfying 95% confidence level.

Table 1. Correlation coefficients between the snow depth and surface air temperature averaged over the three latitude bands of 20° each in the eastern Eurasian continent. The eastern Eurasian continental region is divided by East Asia, Central Siberia and Northern Siberia. Statistically significant values at 95% confidence level are indicated by asterisk.

Mean Area	Correlations	
	Daily	Monthly
East Asia (30°N-50°N)	-0.514*	-0.686*
Central Siberia (40°N-60°N)	-0.197*	-0.311
Northern Siberia (50°N-70°N)	0.133	0.155

월 이후로는 거의 항상 눈이 덮여 있기 때문에 실제 변동에 의한 눈깊이 혹은 눈덮임 효과는 상대적으로 작게 나타날 수 있다. 따라서 기온 변동과의 연관성도 낮아지는 것으로 추정된다. 둘째로, 위도에 따른 태양 복사량의 차이를 들 수 있다. 60°N 이상의 고위도에서는 겨울에 태양으로부터의 입사량 자체가 매우 적으므로 눈깊이 혹은 눈덮임 증감에 따른 지면 알베도의 변화, 그리고 이에 의한 기온변동의 효과가 상대적으로 작다. 이러한 결과는 태양이 떠있는 시간과 입사량에 따라 알베도의 효과가 달라지므로 눈의 효과에 차이가 있다는 Marshall *et al.* (2003)과 Smith *et al.* (2010)의 결과와도 부합한다.

4. 기후모델의 눈깊이 편향과 변동성

눈깊이는 실제 강설뿐만 아니라 기온과 바람 그리고 에너지 교환 등에 의해 쌓인 눈이 얼고 녹는 물리 과정들에 의해 결정되므로 정확한 모의가 매우 어렵다고 알려져 있다 (Amstrong and Brun, 2008). 이 장에서는 사용된 모형 (CAM3)에서의 눈깊이 바이어스 (bias)을 계산하여 눈깊이 모의 성능이 어느 정도인지를 조사하고, 결과를 계절 예측에 필요한 눈깊이 초기장 생산과 결과 분석에 활용하고자 하였다.

모델 눈깊이 바이어스를 조사하기 위해 규준실험인 AMIP 타입 실험에서의 결과로부터 계산된 눈깊이의 기후값과 1999~2010년 CMC 눈깊이 자료로부터 계산된 관측 눈깊이 값을 비교하였다. Fig. 5는 모델이 모의하는 10월부터 3월까지의 월평균 눈깊이 기후값의 바이어스 (좌측열)과 관측과의 변동성의 차이 (우측열)을 보여준다. 모델은 눈깊이의 공간분포나 계절변동의 전반적인 특성은 잘 모의하지만 특징적인 바이어스가 나타나고 전반적으로 관측에 비해 약한 변동성을 가지는 특성을 보인다. 전체적인 패턴은 고위도 지방의 강한 양의 바이어스와 눈이 덮힌 영역의 경계지역, 특히 중서부 유라시아, 동유럽, 그리고 티벳 지역에서의 음의 바이어스이다. 시베리아 북부에 눈이 덮이기 시작하는 10월부터 60°N 이상 지역에서 양의 바이어스가 존재하고 이 바이어스는 한겨울까지 계속 증가하는 특징을 보인다. 시간이 한겨울로 진행함에 따라 눈이 덮이는 영역은 남하하여 1월에는 시베리아와 카자흐스탄 그리고 러시아 서부 지역까지 양의 바이어스가 강하게 나타나고 눈의 경계지역에 가까워지면 양의 편향이 약해진다. 반면 음의 바이어스는 눈이 덮이는 경계 지역에서 강하게 나타나는데 11월 이후 50°N 아래의 유럽과 서아시아 지역에서 음의 바이어스가 두드러지게 나타난다. 그리고 티벳 고원의 강한 음의 바이어스는 모델의 지형이 실제 지형

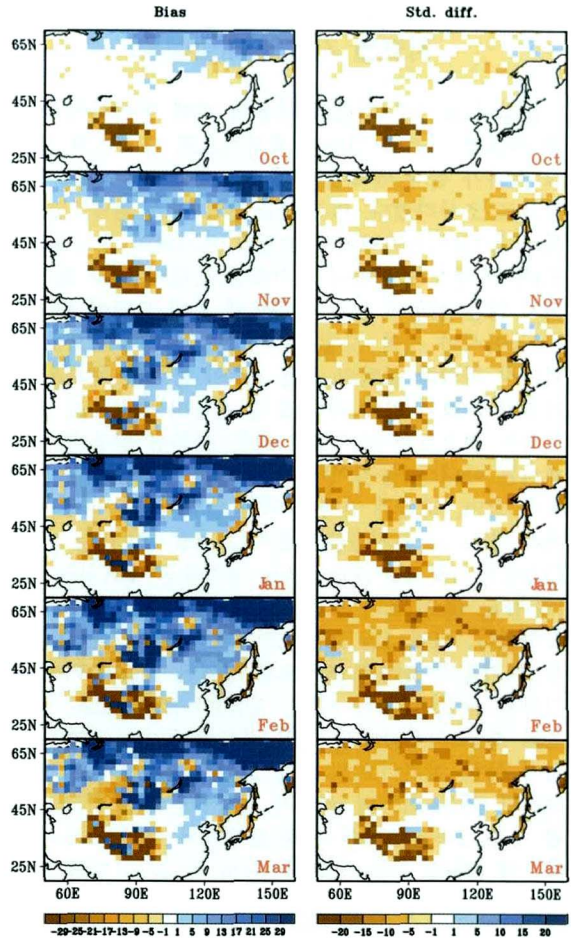


Fig. 5. Left column : bias of model snow depth (cm) for October to March. Bias is estimated by the difference between the model snow depth anomaly of AMIP-type model simulation and the climatology of snow depth observation (CMC data). Right column : difference in standard deviation between model simulation and observation.

을 상당히 평탄화시키기 때문에 관측에 비해 눈깊이를 과소모의 하는 것으로 판단된다. 이러한 패턴은 Frei *et al.* (2003)에서 제시한 기후 모델들이 모의하는 눈덮임의 보편적인 오차와 부합한다. 변동성의 경우, 전반적으로 관측에 비해 변동성을 과소 모의하고 있음을 알 수 있다. 좀 더 자세히 살펴보면, 10월부터 3월까지 눈의 양이 증가함에 따라 모델의 눈깊이 변동성이 관측에 비하여 더욱 과소모의 되는 것을 볼 수 있다. 특히 시베리아와 동유럽 티벳 지역에서의 강한 음의 변동성 차이가 나타났다.

5. 눈깊이 초기화를 이용한 동아시아 겨울철 지표면 기온의 계절예측

눈깊이 초기화 기법의 적용에 의해 동아시아 겨울철 지표면 기온이 얼마나 효과적으로 바뀌는지, 또한 그 효과가 실제 예측에 얼마나 도움이 되는지를 정량적으로 조사하였다. 먼저, Fig. 3의 박스 영역으로 정의된 동아시아 지역에서 눈깊이 초기화의 효과(민감도)를 파악하기 위하여 초기화된 눈깊이 양과 초기화되지 않은 실험의 눈깊이 차이에 의해 모델이 예측하는 동아시아 지역 지상기온이 얼마나 효과적으로 바뀌는지 파악해 보았다 (Fig. 6). 이 분석의 목적은 초기화된 눈깊이 양에 따른 모델 반응의 민감도를 테스트하는 것으로서 초기화에 따른 예측성 향상에 대한 제시는 아니다. 눈깊이에 따른 대기 반응은 계절성이 특히 크며, 계절의 진행에 따라 열역학 및 역학적 기여가 다르므로 늦겨울을 대표하는 11월 1일 (Fig. 6(a)), 한겨울인 1월 1일 (Fig. 6(b)), 늦겨울을 대표하는 3월 1일 (Fig. 6(c)) 초기 조건으로 예측된 결과를 따로 비교하였다. 11월 1일 초기조건으로 예측된 실험의 경우, 한겨울과 늦겨울 조건으로 수행한 실험에 비해 초기화된 눈깊이의 양 (검은 실선)이 크지 않고, 11월 초의 경우 기후값에서 아직 적설이 동아시아까지 미치지 못한 시기이므로 매해 그 변동의 크기도 작다. 하지만 적설 변동의 크기가 작음에도 불구하고, 1개월 예측, 2개월, 3개월 예측 모두에서 뚜렷한 음의 상관관계 (Table 2)를 보인다. 특히 동아시아지역 11월 눈깊이 아노말리가 컸던 2002년, 2007년의 경우를 살펴보면 뚜렷한 관계를 확인할 수 있다. 2009년의 1개월 예측의 경우 기온 감소가 보이나 2개월 3개월 예측은 거의 변화가 없었다. 1월 초기화 실험의 경우, 동아시아 지역의 눈깊이 변동성이 확대되었으며 큰 경년변동을 하고 있음을 알 수 있다. 이와 함께 비교적 13개월 예측 모두에서 음의 상관관계를 보이고 있음을 확인하였다. 늦겨울 눈깊이 아노말리가 초기화된 실험의 경우, Fig. 6(c)와 Table 2에서 확인할 수 있듯이 1개월 예측의 경우 눈깊이 아노말리와 기온

예측 간에는 -0.829의 매우 큰 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이 값은 대체적으로 -0.6 정도의 유의한 상관성을 보이는 11월과 3월 예측 실험보다 더욱 큰 상

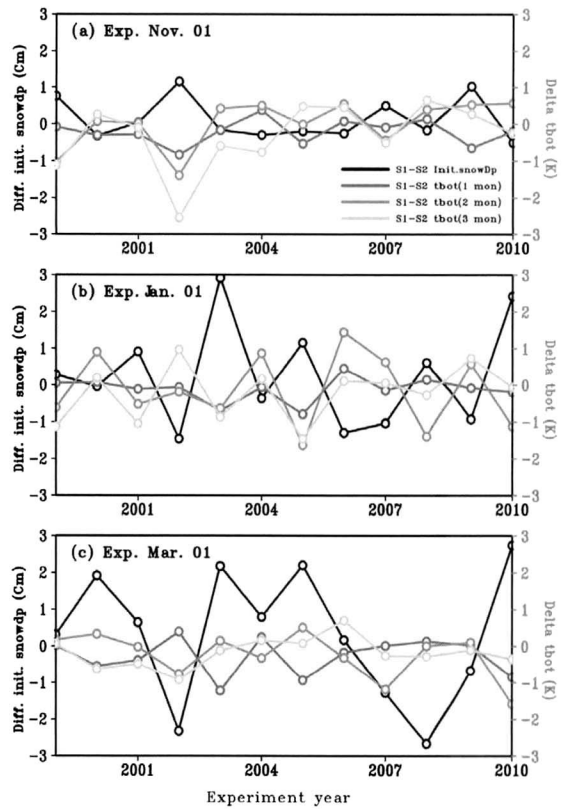


Fig. 6. Differences in the forecasted surface air temperature anomaly over East Asia domain (red for the first month, orange for the second month, yellow for the third month) between S1 and S2 experiment. The differences are caused by the initial differences of snow depth anomalies (black line) between S1 and S2 experiments. All the anomaly time-series are prepared by area averaging over the East Asian region (Box in Fig. 3).

Table 2. Correlation coefficients between the initial snow depth difference (black lines in Fig. 6) and the forecasted surface air temperature difference. The correlation coefficients are calculated for each lead time (the first month, second month, and third month) and in each forecast experiment (Nov. 01, Jan. 01, and Mar. 01). Statistically significant values at 95% confidence level are indicated by asterisk.

Correlation coefficient		Prediction periods		
		1-30 days lead	31-60 days lead	61-90 days lead
Experiments	Nov.01	-0.579*	-0.687*	-0.570*
	Jan.01	-0.622*	-0.682*	-0.635*
	Mar.01	-0.829*	0.132	0.208

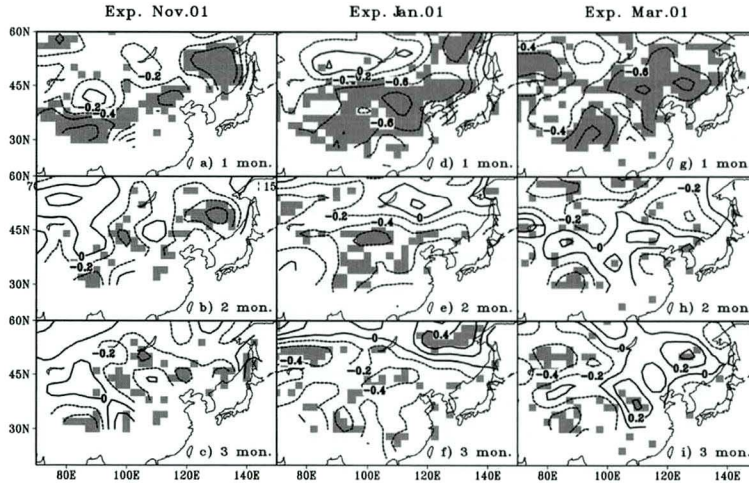


Fig. 7. Correlation map between the initial snow depth difference and the forecasted surface air temperature difference. The correlation coefficients at each grid cell are calculated for each lead time (the first month, second month, and third month) and in each forecast experiment (Nov. 01, Jan. 01, and Mar. 01). Statistically significant values at 95 % confidence level are indicated by gray shading.

관관계이다. 이 결과는 늦겨울 눈깊이 아노말리를 이용한 봄철 동아시아 기온 변동 예측의 잠재적 가능성을 시사한다. 그러나 2개월, 3개월 예측의 경우 적설 아노말리가 급격히 감소함에 따라 상관성이 매우 낮아짐을 확인하였다 (Table 2). 이러한 특징은 Fig. 7에서도 확인할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6의 상관관계를 동아시아 영역 각 격자점에 계산하여 분포도를 그린 것이다. 11월과 1월 초기화 실험에서는 동아시아 영역 (위도 50°N 남쪽)에 예측기간 동안 눈이 존재하므로 초기 눈깊이의 차이와 기온 변동의 차이 사이에 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 유지된다. 하지만 늦겨울 초기화 실험에서는 1개월 이후의 예측 (4월, 5월)에는 동아시아 지역에서는 눈이 거의 사라지므로 45°N 남쪽으로는 초기 눈깊이와 기온 변동 사이에는 상관관계가 거의 사라지거나 양의 상관관계가 나타나기도 한다.

이상을 종합할 때, 눈깊이 초기화는 적어도 계절 예측에 있어 모델의 기온 변동에 뚜렷한 영향을 미침을 확인하였으며, 그 효과는 늦겨울, 한겨울, 늦겨울에 따라 다름을 확인하였다. 동아시아 지역의 초기화된 눈깊이와 예측된 온도변화의 공간분포를 파악하기 위하여 상관관계가 가장 뚜렷했던 3월 실험에서 동아시아 영역 각 격자점에서 초기 눈깊이가 0.5 표준편차 이상일 때의 눈깊이 공간분포를 나타내었고 (Fig. 8(a)) 이로부터 1개월 예측된 기온분포를 Fig. 8(b)에 나타내었다. Fig. 6에서 예상되듯이 대부분의 지역에서 -0.6도 이상의 통계적으로 유의한 기온 하강을 보였으며, 그 공간 분포 역시 초기 눈깊이의 양이 컸던 지역에

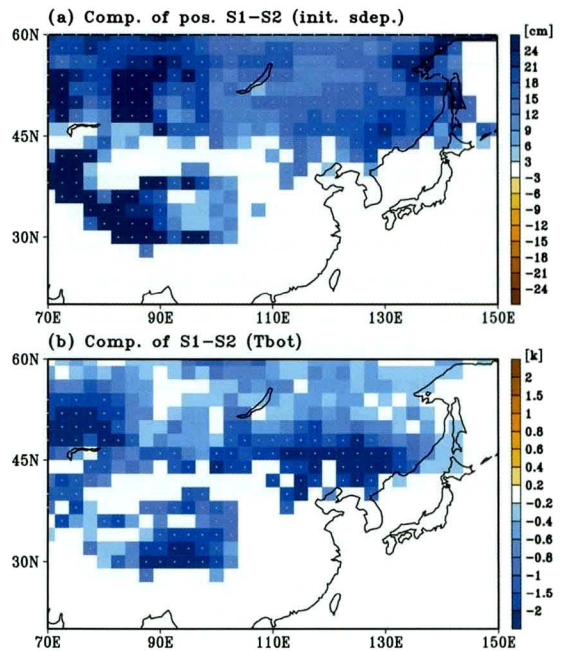


Fig. 8. (a) Composite of strong positive (more than +0.5 standard deviation) difference between initial snow depth in S1 and S2 exp. (S1-S2). (b) composite of difference between SAT averaged for 1-30 days lead in S1 and S2 exp. (S1-S2) which have strong positive difference between initial snow depth in S1 and S2 exp. (S1-S2). Gray dots represent statistically significant correlation coefficient at 95% confidence level.

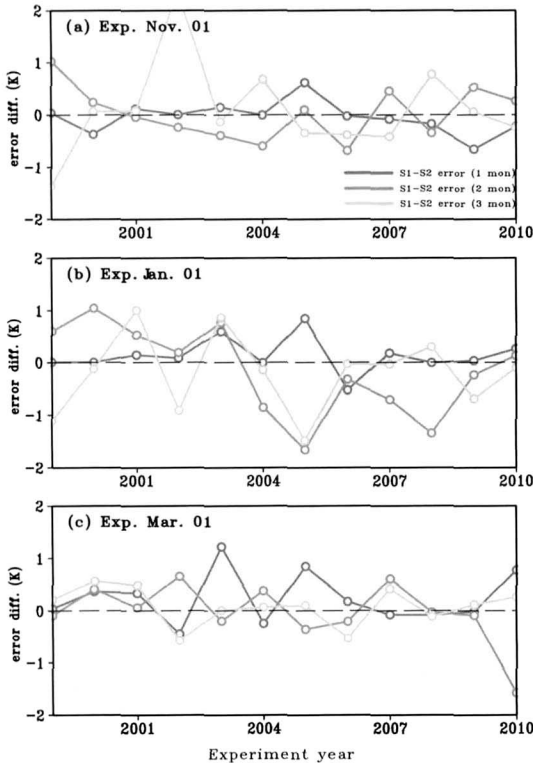


Fig. 9. Differences in the forecasted error over East Asia domain (ed for the first month, orange for the second month, yellow for the third month) between S1 and S2 experiment. For each experiment (S1 and S2), error (e_1 and e_2) is defined as the absolute value of the difference between forecasted anomaly and observed monthly anomaly of surface temperature. Error difference ($e_1 - e_2$), represented in the figure, can be interpreted as the error reduction due to the snow depth initialization (Negative implies the improvement). All the anomaly time-series are prepared by area averaging over East Asia region (Box in Fig. 3).

서 대체적으로 기온 하강이 큰 것으로 볼 때, 계절 예측에 있어 눈깊이 초기화는 모델의 지상기온 예측에 큰 관련이 있음을 확인할 수 있었다. 단, 눈깊이의 양의 차이가 기온의 차이와 선형적인 관계를 가지고 있지는 않는데 이 부분에 대한 원인은 상세한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로 눈깊이 초기화에 따른 실제 예측성에 대한 평가를 시도하였다. 본 연구는 실제 계절예측에 필요한 해수면 온도의 예측, 해빙 조건의 변화 등을 고려하지 않았고, 또한, 실제 동아시아 지표면 온도를 결정짓는 요인들은 눈 깊이가 이외에도 매우 다양하게 존재하므로 실제 계절 예측성을 본 연구에서 평가하

기에는 무리가 있다. 그럼에도 불구하고 계절 예측 시스템의 향상에 있어 눈깊이 초기화가 어느 정도 중요한지에 대한 기본적인 정보를 얻기 위해 분석을 수행하였다. 추정 방법으로 먼저 눈깊이 초기화가 적용된 실험 (S1)과 적용되지 않은 실험 (S2)에서 예측한 기온 아노말리가 관측 아노말리로부터 얼마나 차이가 나는지를 각각 오차 e_1 , e_2 로 정의하고 이 오차들의 차이 ($e_1 - e_2$)를 그래프로 나타내었다 (Fig. 9). 만약, $e_1 - e_2$ 가 음수라면 눈깊이 초기화를 적용하였을 때 실제 예측의 오차가 줄어드는 것을 의미한다. 오차를 정의하기 위한 관측 아노말리는 ERA-interim 자료에서 평년값 (1979-2010년)으로부터의 아노말리로 정의하였다. Fig. 9에서 살펴 본 바, 예상했던 대로 실제 예측성에 있어서는 아직까지 눈깊이 초기화만으로 뚜렷한 향상을 볼 수 없었다. 다만, 늦가을 (11월 1일 초기화) 실험의 경우 대체적으로 $e_1 - e_2$ 가 음수로 분포하고 있어서 초기화 효과가 존재함을 확인하였다.

6. 결론 및 토의

본 연구에서는 기후모형을 이용한 계절예측에서 관측 눈깊이를 초기화하는 방법을 고안하였고 이를 이용하여 최근 12년간 매해 예측을 실시하여 눈깊이 초기화가 동아시아 지역 겨울철 기온 예측에 미치는 영향을 조사하였다. 눈깊이 초기화 방법으로는 관측 눈깊이의 아노말리를 모델이 모의하는 눈깊이의 평균 기후값과 변동성을 이용해 재정규화 하였다. 초기화된 눈깊이를 이용해 지면 모델의 눈층의 개수를 결정하고 각 층마다 눈의 나이, 눈속의 수분과 얼음 함량 등 눈과 직접 연관된 변수를 초기화하는 방법이 사용되었다.

이 연구는 눈깊이 초기화의 계절 예측 활용 가능성을 살펴본 파일럿 (pilot) 연구로서 분석결과, 눈깊이 초기화에 따른 모델의 계절 예측된 지표면 기온 아노말리의 유의한 변화를 확인함으로써 계절예측에 이용 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 모델의 예측과 실제 관측을 비교한 마지막 분석에서 보인 것처럼 실제 예측에 있어서는 제한적인 효과만을 보였다. 본 연구의 계절 예측이 실제 현업에서 사용되는 예측에 비해 경계조건의 처방 등에서 열등한 조건임을 감안할 때, 실제 눈깊이 초기화에 따른 예측성 향상 정도를 정량화하기 위해서는 예측 경계조건, 해빙 경계조건의 적합한 처방 등이 필요하다. 또한 이 연구에서는 필요한 계산자원 확보의 한계로 인해 상대적으로 낮은 해상도의 기후모형이 사용된 점도 실제 예측성 파악에 걸림돌로 작용하였다. 눈과 관련된 물리적 상호작용은 지면의 특성, 지역적 특성, 인접한 해양 및 호수, 지면고도 등 다양한 지역적 특성에 의한 영향을 받

므로 이들의 정확한 계산을 위해서는 고해상도 모형의 사용이 필요하다. 향후 연구에서는 이러한 점들을 보강하여, 보다 고해상도 모형을 사용하여, 장기간 예측 실험을 실시하고, 다양한 지역에서의 눈깊이 초기화의 효과 및 그 물리적 메커니즘을 살펴볼 것이다. 한편, 본 연구에서는 눈깊이 초기화에 의한 지역적(local) 영향만을 살펴보았으나, 보다 대규모 영역의 눈깊이 변동으로 인한 원격(remote) 영향이 모델의 예측결과에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 유라시아 전체적인 눈깊이 정도는 겨울철 대기 순환, 특히 극진동의 특징적인 상태를 유도하고, 이는 동아시아 뿐 아니라 많은 지역의 기후에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 원격 상관은 시간 지연이 발생하므로 예측의 관점에서는 더욱 중요할 수 있으므로 기존의 연구에서 밝혀진 눈과 연관된 원격 상관(Dickson and Namias, 1976; Cohen and Entekhabo, 1999; Saito and Cohen, 2003; Cohen and Barlow, 2005; Cohen *et al.*, 2009)이 눈깊이 초기화에 의해 어떻게 생성되는지를 파악하는 연구도 진행할 예정이다.

감사의 글

실험에 필요한 모델링 소프트웨어 설치 및 최적화에 많은 도움을 주신 (주)한울솔루션 기술팀에 감사드립니다. 본 연구는 기상청 기후변화 감시예측 및 국가정책 지원 강화사업 (RACS_2011-2019) (PN11020)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

기상청, 2010: 가을철 시베리아 지역 강설과 동아시아 장주기 환파 발생 관련성에 대한 역학적 규명. 4pp.
 Allen, R. J. and C. S. Zender, 2010: Effects of continental-scale snow albedo anomalies on the wintertime Arctic oscillation. *J. Geophys. Res.*, **115**, D23105, doi:10.1029/2010JD014490.
 Armstrong, L. R. and E. Burn, 2008: Snow and climate, Cambridge. 4-6pp, 145-148pp.
 Baker, D. G., D. L. Ruschy, R. H. Skaggs and D. B. Wall (1992), Airtemperature and radiation depressions associated with snow cover. *J. Appl. Meteorol.*, **31**, 247-254.
 Brasnett, B., 1999: A global analysis of snow depth for numerical weather prediction. *J. Appl. Meteorol.*, **38**, 726-740.
 Beniston, M., 1997: Variations of snow depth and duration in the Swiss ALPS over the Last 50 years: Links to

changes in large-scale climatic forcings. *Climatic Change*, **36**, 281-300.
 Brown, R. D. and B. Brasnett, 2010: updated annually. Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Digital media.
 Cohen, J. and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO and global warming: How closely related?. *J. Clim.*, **18**, 4498-4513.
 _____, J., M. _____, and K. Saito, 2009: Decadal Fluctuations in Planetary Wave Forcing Modulate Global Warming in Late Boreal Winter. *J. Clim.*, **22**(16), 4418-4426.
 _____, J., and D. Entekhabi, 1999: Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 345-348.
 _____, J., and D. _____, 2001: The influence of snow cover on Northern Hemisphere climate variability. *Atmos. Ocean*, **39**, 35-53.
 _____, J., and D. Rind, 1991: The effect of snow cover on climatic. *J. Clim.*, **4**, 689-796.
 Collins, W. D., and Coauthors, 2004: Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). National Center For Atmospheric Research, 13pp.
 Dee, D. P., and S. Uppala, 2009: Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 1830-1841.
 Dickson, R. R. and J. Namias, 1976: North American influences on the circulation and climate of the North Atlantic sector. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1255-1265.
 Fletcher, C. G., P. J. Kushner and J. Cohen, 2007: Stratospheric control of the extratropical circulation response to surface forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21802, doi:10.1029/2007GL031626.
 _____, C. G., S. C. Hardiman, P. J. Kushner and J. Cohen, 2009a: The dynamical response to snow cover perturbations in a large ensemble of atmospheric GCM integrations. *J. Clim.*, **22**, 1208-1222.
 Fallot, J. M., R. G. Barry and D. Hoogstrate, (1997): Variations of mean cold season temperature, precipitation and snow depths during the last 100 years in the former Soviet Union (FSU). *Hydrol. Sci.*, **42**, 301-327.
 Frei, A., J. A. Miller and D. A. Robinson, Improved simulations of snow extent in the second phase of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-

- 2). *J. Geophys. Res.*, **108**(D12), 4369, doi:10.1029/2002JD003030, 2003.
- Gong, G., D. Entekhabi and J. Cohen, 2002: A large-ensemble model study of the wintertime AONAO and the role of interannual snow perturbations. *J. Clim.*, **15**, 3488-3499.
- _____, G., D. Entekhabi and J. Cohen: 2003: Modeled Northern Hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies. *J. Clim.*, **16**, 3917-3931.
- _____, G., D. Entekhabi, J. Cohen, and R. Robinson, 2004: Sensitivity of atmospheric response to modeled snow anomaly characteristics. *J. Geophys. Res.*, **109**, D06107.
- Hardiman, S., P. J. Kushner and J. Cohen 2008: Investigating the ability of general circulation models to capture the effects of Eurasian snow cover on winter climate. *J. Geophys. Res.*, **113**, D21123, doi:10.1029/2008JD010623.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Koster, R. D., and Coauthors, 2004: Realistic Initialization of Land Surface States: Impacts on Subseasonal Forecast Skill. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 1049-1063.
- Kumar, A. and F. Yang, 2003: Comparative influence of snow and SST variability on extratropical climate in northern winter. *J. Clim.*, **16**, 2248-2261.
- Leathers, D. J., A. W. Ellis and D. A. Robinson 1995: Characteristics of temperature depressions associated with snow cover across the northeast United States. *J. Appl. Meteorol.*, **34**, 381-390.
- _____, D. J. and D. A. Robinson, 1993: The association between extremes in North American snow cover extent and United States temperature. *J. Clim.*, **6**, 1345-1355.
- Marshall, S., R. J. Oglesby and A. W. Nolin, 2003: The predictability of winter snow cover over the western United States. *J. Clim.*, **16**, 1062-1073.
- Oleson, K. W., and Coauthors, 2004: Technical Description of the Community Land Model (CLM). National Center for Atmospheric Research, 11 pp.
- Osoloini, Y. J., A. Carrasco, R. Senan, G. Balsamo, F. Vitart, F. D. Reyes and A. Weisheimer, 2011: Impact of the Eastern Eurasian autumn snow cover on high latitude climate variability. *Arctic Science Summit Week 2011*, OS1A-3_PA0039.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**(D14), 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Saito, K. and J. Cohen, 2003: The potential role of snow cover in forcing interannual variability of the major Northern Hemisphere mode. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(6), 1302, doi:10.1029/2002GL016341.
- Smith, K. L., C. G. Fletcher and P. J. Kushner, 2010: The role of linear interference in the annular mode response to extratropical surface forcing. *J. Clim.*, **23**, 6036-6050.
- Walsh, J. E. and B. Ross, 1988: Sensitivity of 30-day dynamical forecasts to continental snow cover. *J. Clim.*, **1**, 739-754.