Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 25, No. 1 (2015) pp. 155-167
http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2015.25.1.155
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 노 트
(Research Note)

빙권요소를 활용한 겨울철 역학 계절예측 시스템의 개발 및 검증

심태현[1] · 정지훈[1] · 옥정[2] · 정현숙[3] · 김백민[2,*]
[1]전남대학교 지구환경과학부, [2]극지연구소, [3]기상청 기후예측과

(접수일: 2014년 12월 7일, 수정일: 2014년 12월 7일, 게재확정일: 2014년 12월 26일)

Development and Assessment of Dynamical Seasonal Forecast System Using the Cryospheric Variables

Taehyoun Shim[1], Jee-Hoon Jeong[1], Jung Ok[2], Hyun-Sook Jeong[3], and Baek-Min Kim[2,*]
[1]Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea
[2]Korea Polar Research Institute, Inchon, Korea
[3]Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 7 December 2014; revised 7 December 2014; accepted 26 December 2014)

Abstract A dynamical seasonal prediction system for boreal winter utilizing cryospheric information was developed. Using the Community Atmospheric Model, version3, (CAM3) as a modeling system, newly developed snow depth initialization method and sea ice concentration treatment were implemented to the seasonal prediction system. Daily snow depth analysis field was scaled in order to prevent climate drift problem before initializing model's snow fields and distributed to the model snow-depth layers. To maximize predictability gain from land surface, we applied one-month-long training procedure to the prediction system, which adjusts soil moisture and soil temperature to the imposed snow depth. The sea ice concentration over the Arctic region for prediction period was prescribed with an anomaly-persistent method that considers seasonality of sea ice. Ensemble hindcast experiments starting at 1st of November for the period 1999~2000 were performed and the predictability gain from the imposed cryospheric informations were tested. Large potential predictability gain from the snow information was obtained over large part of high-latitude and of mid-latitude land as a result of strengthened land-atmosphere interaction in the modeling system. Large-scale atmospheric circulation responses associated with the sea ice concentration anomalies were main contributor to the predictability gain.

Key words: Snow depth initialization, sea ice boundary condition, dynamical seasonal prediction system

1. 서 론

극지역은 지구상 어떤 지역보다 다양한 형태의 기후 피드백(climate feedback) 메커니즘이 민감하게 작동하는 지역이다. 즉, 이산화탄소 증가에 대한 지표온도의 변화로 정의되는 기후 민감도가 매우 큰 지역이라 할 수 있다(Ha and Kim, 2014). 특히 금세기 들어 북극은 급격한 온난화가 진행되어 북극권 기후환경의 큰 변화가 나타나고 있다(Bhatt et al., 2010; Screen and Simmonds, 2010). 기후환경의 변화는 더 나아가 북극권 고위도 육상 및 해상 생태계에 대한 근본적인 변화를 초래하고 있으며 북극해 인근 영구동토층의 해빙은 주택, 도로 및 철도와 같은 주요 국가 인프라를 파괴하고 있어 심각한 피해가 누적되고 있다.

*Corresponding Author: Baek-Min Kim, Korea Polar Research Institute, 7-50 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea.
Phone : +82-32-760-5308, Fax : +82-32-770-5399
E-mail : bmkim@kopri.re.kr

북극의 기후변화는 북극해 인근 지역에 대한 직접적인 영향뿐만 아니라 고위도 극제트의 요동을 비롯하여 최근 급증하고 있는 고위도의 다양한 원격상관 패턴 발현의 근본 원인으로 지목되고 있다(Vihma, 2014). 또한 대규모 수문순환에 대한 변화도 가져오는데 특히 온난화에 따른 해빙 감소는 고위도 해상열속의 급격한 증가를 가져오고 증가된 고위도 수증기가 극제트류 의해 중위도로 수송되고 풍하측 유라시아지역 가을철 적설면적 증가의 직접원인이 되고 있다(Ghatak et al., 2010; Liu et al., 2012). 시베리아지역의 적설면적 증가는 지표로 유입되는 단파복사량을 급감시켜 늦가을 및 초겨울 시베리아 대륙의 급격한 냉각화를 초래하게 되고 시베리아 고기압의 강화와 겨울몬순의 시작을 앞당기게 된다(Jeong et al., 2011). 북극 해빙의 감소와 시베리아지역의 적설면적 증가는 또한 파수 1과 2의 대규모 행성파 발생에 역학적인 관련이 있으며 성층권 극와도의 강도를 조절하여 북극진동의 경년 변동에 큰 영향을 주고 있음이 밝혀졌다(Cohen and Entekhabi, 1999; Cohen et al., 2001; Cohen and Barlow, 2005; Fletcher et al., 2009; Kim et al., 2014). 한반도 겨울철 지표온도 변동 역시 이러한 빙권요소들의 변동과 큰 관련이 있다. 물론, 한반도에 자주 발생하는 겨울철 한파는 외부 강제력 없이도 겨울철 지표 냉각에 따른 시베리아 고기압 확장에 따라, 즉 내부 역학에 의해, 발생/소멸 되는 현상이나 극지에 기인하는 빙권요소 변동, 돌연승온과 관련한 성층권 극와도의 경년 변동 등은 대류권 극진동 발생을 조절하고, 이에 따라 매해 발생하는 개별 한파들의 강도가 달라질 수 있음이 선행연구에서 제시되고 있다(Jeong and Ho, 2005; Jeong et al., 2006; Kim et al., 2009).

2009년 가을철의 경우, 가을철 시베리아 지역의 적설면적이 평년에 비해 매우 컸으며 이로 인한 시베리아 고기압 발달 및 대규모 정체성 파동(stationary wave)이 형성되었다. 생성된 행성파는 고위도 성층권으로 전파되어 성층권 극와도(polar vortex) 붕괴를 일으키고 이로 인해 관측사상 가장 강력한 북극진동이 발생하였다(Cohen et al., 2010). 같은 시기 북미 북동부, 캐나다, 유럽, 아시아 각지에는 오랜 기간 한파와 폭설 발생으로 인해 큰 피해를 입었다. 최근 2010년 및 2012년에도 유라시아 및 북미 각지는 기록적인 겨울철 폭설 및 한파로 피해가 속출하였다.

앞에서 살펴본 바와 같이 금세기 들어 급격히 진행되고 있는 북극권 온난화와 이와 연관된 빙권요소의 변화는 유라시아 및 북미 겨울철 기후변동을 이해하는데 매우 중요한 역할을 하고 있으며 계절예측에 있어서도 고위도에서의 지표면 가열 및 냉각을 유도하여 상층 대기 파동 형성에 관여함으로써 중요한 역할을 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 계절예측 측면에서 빙권요소의 중요성은 고위도 지역 물리과정에 대한 관측 및 역학적 이해의 부족으로 인해 간과되고 있는 실정이다. 특히, 계절예측에 선행되어야 하는 해빙 계절예측 분야는 아직까지도 발전이 매우 더디게 이루어지고 있어 기상 선진국에서도 해빙 변동에 따른 계절예측성 향상 연구는 많이 부족한 실정이다(Budikova, 2011).

이에 본 연구노트에서는 최근 북극 빙권의 급격한 온난화에 따라 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 해빙과 가을철 적설량 정보를 역학적 겨울철 계절예측에 직접적으로 활용하는 아이디어를 처음으로 고안해 보았고, 또한 이를 과거기후재현 실험에 적용해 보았다. 역학모델에 대한 가을철 적설량 입력 방안은 최근 Jeong et al. (2012)와 Woo et al. (2012)에 의해 개발된 바 있으며 그들은 이 방법을 계절예측에 고려하였을 때 다양한 시간규모(10~90일)에서 계절 예측성이 향상됨을 보인 바 있다. 이에 상기 방법을 채택하고 예측성을 극대화하기 위한 보완작업을 거쳐 역학계절예측시스템에 적용하여 보았으며, 또한, 적설과 함께 겨울철 계절예측에 있어 중요한 요소로 알려진(Honda et al., 2009) 해빙면적을 예측기간 동안 대기모형의 경계조건으로 처방하는 합리적인 방안을 개발하여 적설과 해빙의 동시 초기화를 포함한 계절예측을 실시하였다. 즉, 본 연구노트에서는 이와 같이 빙권 요소를 역학모형에 종합적으로 반영하는 계절예측 시스템의 개발에 대해 상세히 기술하였으며, 이를 바탕으로 1999/2000년부터 2012/2013년 겨울철 예측 실험을 수행하여 현업 적용에 대한 가능성을 검토하여 보았다.

2. 계절예측 시스템

2.1 모델

본 연구에서 활용하는 계절예측 시스템은 NCAR (National Center for Atmospheric Research)의 CAM3 (Community Atmosphere Model version 3) 기후모델이며(Collins et al., 2004), 대기-해양모델(coupled Ocean-Atmosphere GCM) 대신 해수면온도와 해빙농도를 경계조건(boundary condition)으로 처방한 대기모델(Atmospheric General Circulation Model, AGCM)만을 사용하여 기후재현실험(hindcast)을 수행하였다. 1999/2000년부터 2012/2013년까지 14개 겨울철(November, December, January, February, March 이하 NDJFM)을 대상으로 삼았으며, 이는 각 해마다 10월 한 달의 숙련기간 후 생성되는 초기자료로부터 5개월 동안 적분된 모의 결과에 해당한다. 계절예측 시스템 결과자료의 수평 해상도는 $2.5^{o} \times 2^{o}$이고, 연직 26개 층으로 구성되어 있다. 재분석 자료와의 비교를 용이하게 하기 위해 연직 26층의 모의 결과를 ERA-Interim과 동일한

37개 층으로 내외삽하였다.

실험에 앞서 가장 먼저 CAM3의 구름 모수화 과정에 freeze-dry modification 적용하여 겨울철 극지역에서 하층운이 과다모의되는 현상을 줄였다(Vavrus and Waliser, 2008). 유한 체적 역학코어(finite volume dynamics core)의 수평 144 × 91 격자를 사용하였으며, 표층에서 하부 성층권(약 3 hPa)까지 26개 층(26 hybrid-sigma vertical levels)으로 구성되어 있다. CAM3는 지면모델로 CLM3 (Community Land Model version 3)을 채용하고 있으며 적설을 포함한 수문, 토양 그리고 식생의 물리과정이 지표(land surface layer)와 지중(subsurface layer)에 대하여 모수화되어 있다. CLM3는 CAM3에서 생산된 대기 상태로부터 지면 에너지와 운동량, 복사속을 계산하고 CAM3의 대기와 상호작용하도록 구성되어 있다(Oleson et al., 2004).

2.2 입력자료

본 연구에서는 계절예측 시스템에 필요한 대기 초기자료를 생산하기 위해 0000 UTC의 6시간 평균 NCEP FNL (Final) Operational Global Analysis Data(이하 FNL 자료)를 사용하였다. 그리고 지면 초기자료의 적설 초기화 기법을 적용하기 위해 JCDAS (JMA Climate Data Assimilation System)에서 산출되는 준실시간 적설량 분석 자료를 사용하였다. 이 적설량 분석 자료는 준 실시간으로 매일 생산되며 $2.5^{o} \times 2.5^{o}$의 수평 해상도를 갖는다. 계절예측 시스템의 적설 초기화 과정에 있어 JCDAS의 적설량 자료의 적용 이점에 관해선 Shim et al. (2013)과 JRA-25 technical note에 상세히 서술되어 있다.

2.2.1 경계자료

한편 모델에 입력되는 경계자료의 경우 초기자료와 달리 숙련기간 이후 예측기간에 해당하는 미래의 값이 필요하다. 이러한 경계자료의 예측을 위해 본 연구에서는 신뢰성이 높은 Met Office Hadley Centre의 HadISST와 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)에서 제공하는 수평 해상도 $1^{o} \times 1^{o}$의 월 평균 해수면온도와 해빙농도를 사용하였다. 최근 해빙농도의 경향성을 반영하고 기후값을 생산하기 위해 HadISST를 사용하고, 실제 계절예측실험과 동일하게 기후재현실험을 구성하기 위해 예측 시점에 가장 근접한 최신 정보를 지닌 OISST를 병행하여 이용하였다.

2.2.2 재분석자료

계절예측 시스템의 예측성 검증을 위해 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ERA-Interim 재분석 자료를 사용하였다. 수평 해상도는 $1.5^{o} \times 1.5^{o}$이지만 $2.5^{o} \times 2^{o}$로 내삽하여 모델과의 비교가 용이하도록 하였다. 연직 방향의 경우 37개 층으로 구성되어 있으며, 모델 결과를 내외삽하여 재분석 자료와 같게 하였다. 그리고 적설 초기화에 이용되는 JCDAS의 적설량의 특징을 살펴보고자 Jeong et al. (2013)이 사용한 CMC (Canadian Meteorological Centre)에서 생산된 적설량과 비교하였다.

2.3 대기-지면 초기화 과정

계절예측 시스템은 크게 두 부분으로 나뉜다. Figure 1과 같이 하나는 적설 초기화를 통한 지면 초기화 과정과 대기 초기자료의 입력이 반복적으로 이루어지는 모델 숙련과정(training procedure)이며, 다른 하나는 모델 숙련과정으로 생산된 대기와 지면 초기자료로부터 실제 계절예측이 이루어지는 예측과정(prediction procedure)이다(Shim et al., 2013). 여기에 숙련과정까지는 관측의 해빙농도가 처방되며 이후 예측과정부터는 경험적으로 단순 예측된 해빙농도를 계절예측 시스템에 삽입한다. 그리고 계절예측 시스템에서 빙권 요소가 예측인자로서 겨울철 동아시아와 한반도의 계절 예측성 향상에 미치는 정도를 분석하기 위해 북극권 해빙역(sea-ice zone, SIZ) 이외의 해수면온도는 모두 기후값으로 처방하였다.

2.3.1적설 초기화

빙권요소인 적설량을 계절예측 시스템에 적용하기 위하여 본 연구에서는 국내 및 국외 학술지(Woo et al., 2012; Jeong et al., 2013; Shim et al., 2013)를 통해 소개된 바 있는 적설 초기화 기법을 도입하였다. 적설 초기화 기법은 모델 초기조건의 적설량을 관측 적설량으로 교체함으로써 모델이 과소 모의하는 적설량의 단점을 극복하여 예측성의 향상을 꾀하는 방안이다. Woo et al. (2012)과 Jeong et al. (2013)은 적설 초기화 방안을 예측 시작 시점 첫 초기조건에 적용하여 적설 분포가 동아시아 겨울철 예측성 향상에 크게 기여함을 증명하였다. 반면, 강제적인 적설 초기화 방안은 지면모델의 다른 변수(지중온도, 지중습도 등), 대기 상태와의 물리적 불일치를 야기시킨다. 따라서 이러한 한계를 극복하고자 Shim et al. (2013)은 10월 한 달을 모델 숙련 기간(training period)으로 설정하여 매일 FNL 자료로부터 대기 조건을 초기화하고 JCDAS 적설량 자료를 이용하여 지면 적설량을 초기화함으로써 관측 적설량을 대기와 지면모델이 적절히 흡수하도록 고안하였다. 그리고 관측과 모델이 모의하는 적설량 사이에 존재하는 기후값과 변동성의 차이는 Jeong et al. (2013)이 사용한 정규화 과정을 적용하여 최소화하려 시도하였으며 이러한 과정은 모두 적설 초기

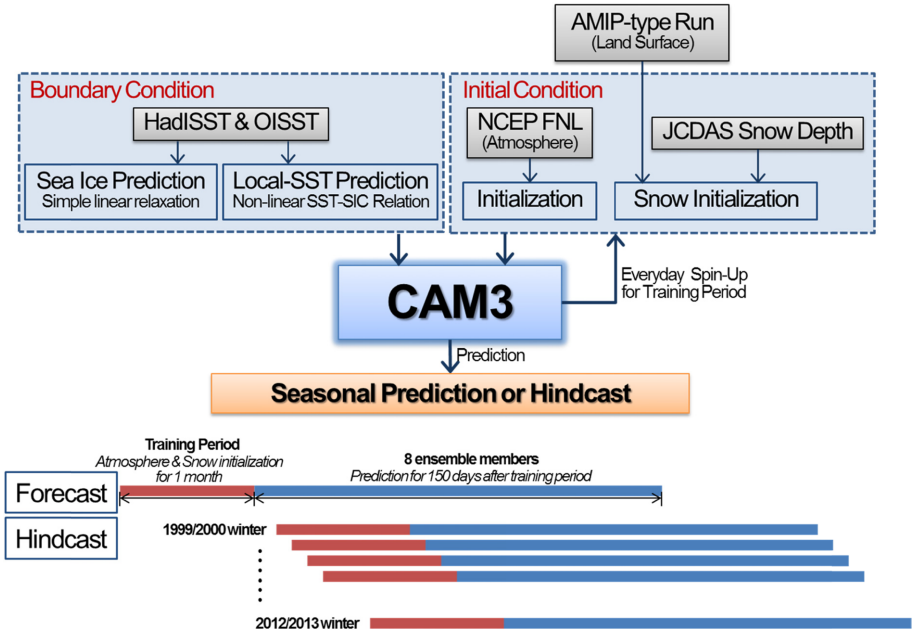

Fig. 1. Schematic diagram of seasonal prediction system.

화 과정 내에서 처리된다. 그리고 지면모델이 산출한 초기값을 강제적으로 적설 초기화 과정을 거친 관측값으로 대체함에 따라 발생할 수 있는 모델의 충격을 완화하고 동시에 적설 초기화 기법을 적용하기 위하여 관측 적설량과 모델 산출 초기 적설량의 평균값을 지면모델 초기화 과정에서 사용하였다. 결국, 준동화 과정(semi-assimilation) 혹은 너징(nudging)의 방법과 유사한 숙련과정을 통하여 초기조건 갱신에 따른 물리적 불일치로부터 계절예측 시스템을 적응시키려 노력하였다.

2.3.2 해수면온도 및 해빙 경계자료

계절예측 시스템은 앞서 언급한 초기조건과 더불어 해빙농도와 해수면온도를 경계조건으로 입력하여야 한다. 그리고 초기조건과 달리 경계자료는 예측 기간에 해당하는 미래의 값이 필요하다. 예측이 시작되기 전인 숙련과정까지 경계자료를 확보하기 위해 신뢰성이 높고 갱신이 빠른 NOAA OISST의 월 평균 자료를 Met Office HadISST와 병행 사용하였다.

최근 해빙의 변동성을 반영하고 통계적 예측성 향상을 위해 2007년부터 2012년까지 Met Office HadISST의 월 평균 해빙농도를 활용한다. 여기에 숙련과정 기간인 예측 해당 해의 10월 NOAA OISST의 해빙농도 편차(anomaly)를 얹어줌으로써 10월 관측 해빙농도를 생산하였다. 예측과정인 11월부터는 해빙농도의 편차를 시간에 따라 선형적으로 점차 줄여나감으로써 이듬해 3월에는 2007년부터 2012년까지의 기후값과 같아지도록 강제하였다. 한편 해빙의 계절 변동성은 북극해 지역별로 큰 차이를 나타낸다. 최근 해빙농도의 감소 대표 해역인 바렌츠-카라해(Barents-Kara sea)와 척치해(Chukchi sea)는 계절에 따른 월 변동성이 매우 상이하다. 이러한 특징을 해빙농도 경계조건 생산에 반영하기 위해 본 연구에서는 해역에 따라 편차 감소에 경험적 가중치를 주어 선형 외삽하였다. Figure 2는 예측된 해빙농도 경계조건과 Met Office HadISST의 해빙농도를 나타낸다. 해빙농도 증가 속도가 빠른 척치해와 가장 느린 바렌츠-카라해, 그리고 그 중간값인 나머지 영역으로 구분하였다. 따라서 바렌츠-카라해는 척치해와 그 밖의 주변 북극해보다 해빙농도 증가(복원) 속도가 상대적으로 느리지만 반대로 척치해의 해빙농도의 복원 속도는 다른 해역보다 빠르다.

위에서 기술된 경계조건으로 입력되는 해빙농도는 북극해에 한정하여 적용하였다(Shim et al., 2013). 최근 30년간 해빙농도가 적어도 한번 15% 이상이었던 영역을 해빙역(sea-ice zone, SIZ)으로 정의하고, 해당 해빙역에서만 경계조건을 한정하며 나머지 영역의 경계조건은 모두 기후값으로 처방하였다.

경계조건으로 처방되는 해수면온도의 경우, 해빙농도 예측이 이루어지는 동일 격자의 해빙역에서만 한정하여 예측하였으며, 나머지 영역은 1981년부터 2010년까지의 HadISST 기후값으로 처방하였다. 따라서 동아시아 및 한반도의 겨울철 계절예측을 위해 본 연구

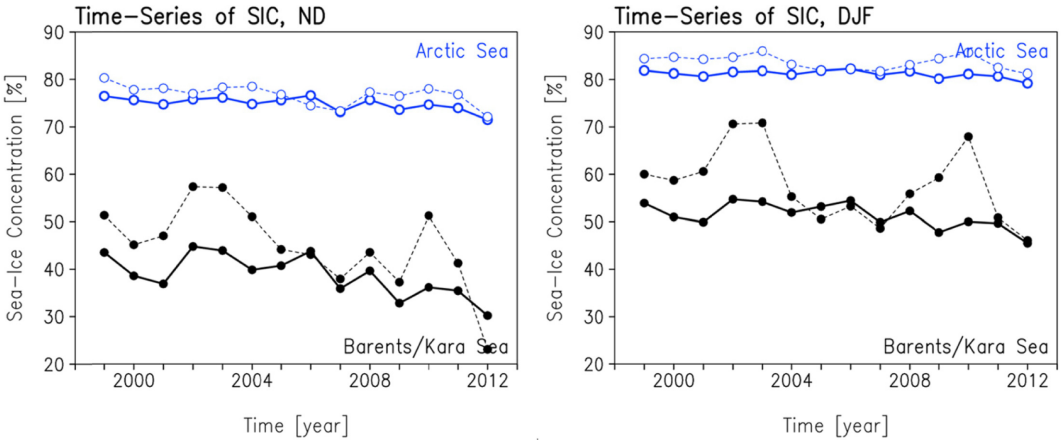

Fig. 2. Predicted (solid line) and observed (dashed line) sea ice concentration over Arctic Sea (blue) and Barents-Kara Sea (black) from November to December (left) and from December to February (right), respectively.

의 계절예측 시스템은 빙권요소에 한정된 역할만을 특화하여 파악할 수 있다. 그리고 해빙역에서의 해빙농도 감소는 해수면온도의 변화를 의미한다. 그렇기 때문에 예측된 해빙농도에 따른 해수면온도의 증감을 적절히 고려하지 않는다면 해빙 감소에 의한 대기로의 열속 및 수증기속 유입을 반영할 수 없으며, 따라서 해빙면적 변화에 따른 계절예측 시스템의 대기반응을 적절히 모의할 수 없다. 본 연구에서는 Jun et al. (2013)이 제시한 방안에 따라 북극해 해빙역의 모든 격자점에 대하여 Met Office HadISST의 최근 2007년부터 2012년 월 평균 해수면온도와 해빙농도의 상관관계를 2차 선형회귀식으로 유추하였다. 앞서 언급한 대로 단순 선형 외삽으로 해빙농도를 예측하면 해빙농도-해수면온도의 회귀식으로부터 해수면온도를 예측하고 생산할 수 있도록 고안하였다. 이 같은 방법은 하나의 경계조건인 해수면온도와 해빙농도를 각각 독립적인 방법으로 예측함에 따라 야기되는 상호 불일치의 문제점을 최소화하고 동시에 균질성을 보장하기 때문에, 노출된 해수면으로부터의 적절한 열속 및 수증기속 발생을 설명하는데 효과적이다(Shim et al., 2013).

3. 계절예측 시스템의 예측성

3.1 기후재현(hindcast) 실험의 구성

본 연구에서는 앞서 소개한 NCAR CAM3를 활용하여 계절예측 시스템을 개발하고 그 결과를 산출하였으며, 생산된 자료를 바탕으로 계절예측 시스템의 겨울철 계절 예측성을 평가 및 검증하여 빙권 요소가 동아시아 겨울 몬순 계절 예측성에 미치는 영향의 정도를 판단한다. 계절예측 시스템은 기후재현실험을 구성하기 위하여 1999/2000년부터 2012/2013년까지 14개 해에서 10월 한 달간 숙련과정을 수행하고, 예측과정으로 11월부터 5개월 lead로 적분을 수행하였다. 기후재현실험의 비교군으로, 1981년부터 2010년까지의 기후값으로 경계조건을 처방한 제어실험(control run, CTRL)을 80개의 앙상블 멤버로부터 구성하고 예측모델 자체 평가에 활용하였다. 그리고 기후재현실험의 숙련과정에 필요한 첫번째 초기자료는 1981년부터 2012년까지 수행한 AMIP-type run의 것을 활용하였으며, 그 이후 초기자료는 숙련과정에서 계절예측 시스템이 산출한 매일의 0000 UTC의 초기자료를 적설 초기화 기법에 적용하여 업데이트하는 방법을 통해 생산하였다. 예측과정의 경우 총 8개의 앙상블 멤버를 구성하기 위하여, 앞서 수행한 숙련과정을 통해 생산된 초기자료에서 매년 11월 3일부터 기준으로 8일전까지의 대기 초기장을 선택하여 적분하는 시간지연법을 적용하였다. 계절예측 시스템은 숙련과정의 경우 초기화 기법의 성능을 점검하기 위해 매 시간 평균 자료를 산출하며, 예측 적분기간 동안에는 일 평균 자료를 생산하고 매년 11월부터 3월까지 생산되는 월평균 앙상블 자료를 사용하여 예측성을 평가한다. 또한 계절예측 시스템의 예측 결과에 대한 검증을 위해 기후재현실험 기간과 동일한 14년 동안의 월 평균 ERA-Interim 재분석 자료를 사용하였으며, 모델과 같은 수평 해상도($2.5^{o} \times 2^{o}$)로 내삽하여 비교를 용이하게 하였다.

3.2 숙련과정 검증

계절예측 시스템의 첫번째 단계인 숙련과정의 효과는 지면모델의 적설 초기화 기법과 대기모델 초기자료에의 관측자료 입력을 통해 이루어진다. 특히 숙련

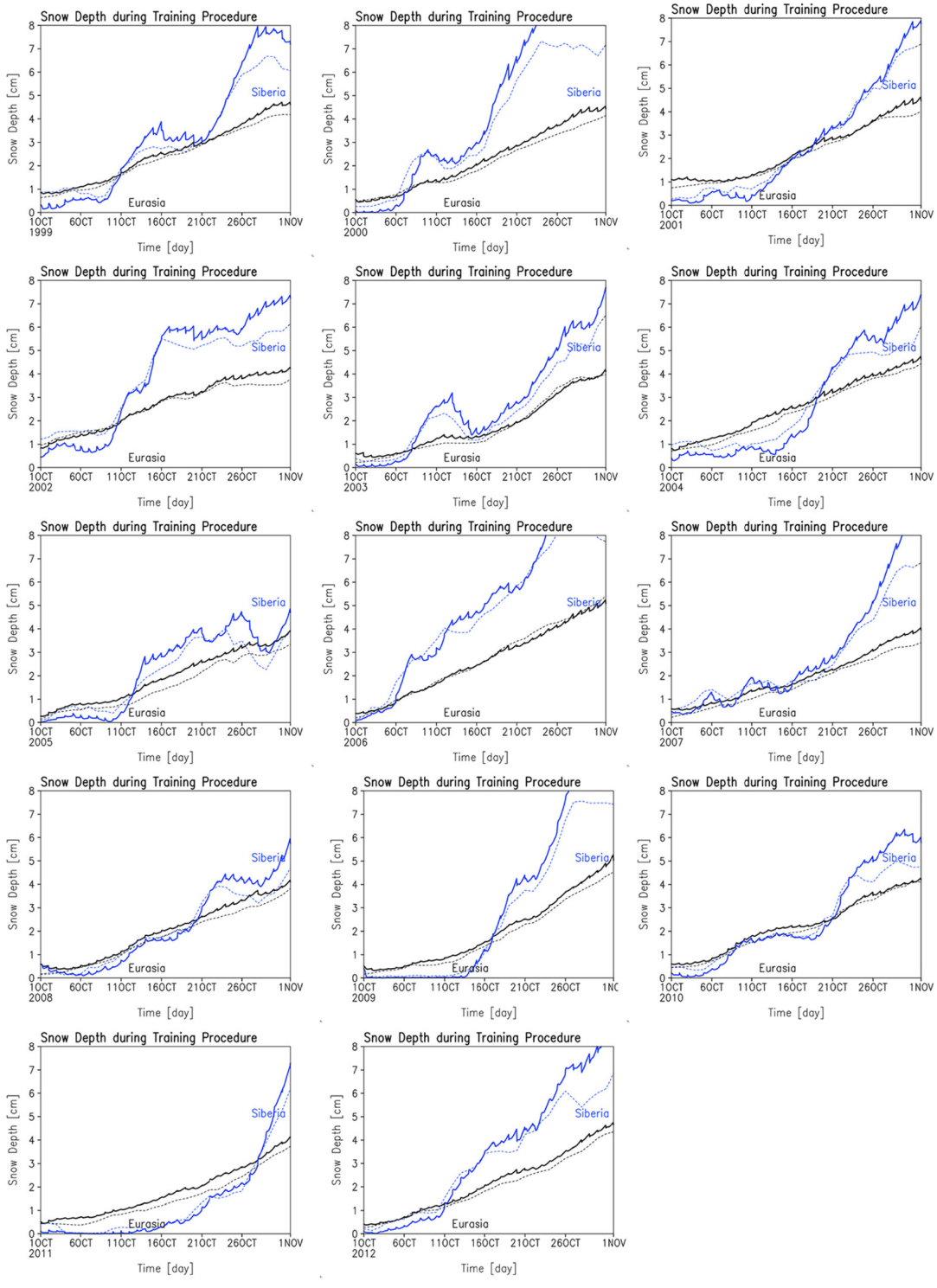

Fig. 3. Evolution of hourly snow depth during training procedure (solid) and time-series of observed daily snow depth of JCDAS (dashed) from 1999 to 2012. Snow depth is averaged over Eurasia (0°~180°E, 30°~80°N, black) and Siberia (70°~120°E, 45°~65°N, blue), respectively.

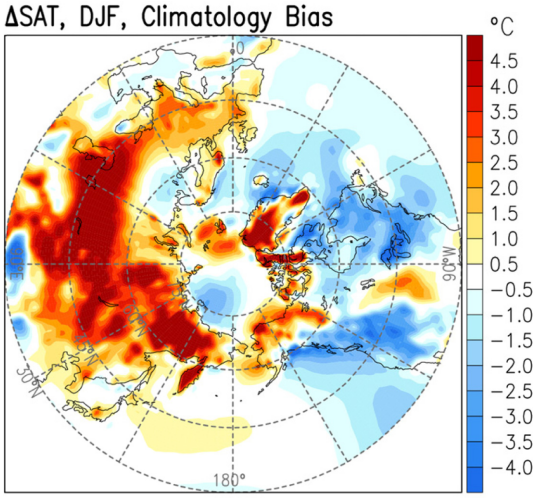

Fig. 4. Biases of climatology of the wintertime (December to February) surface air temperature for observation and hindcast every year.

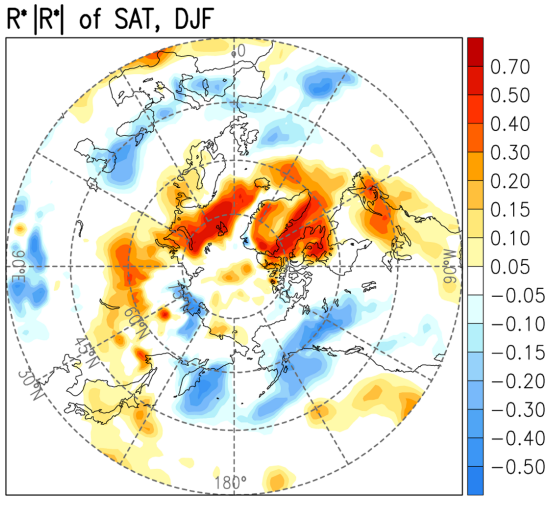

Fig. 5. Real predictability of surface air temperature (DJF) for hindcast (R^* means the correlation between model and observation).

과정에서 빙권 요소인 관측 적설량을 계절예측 시스템에 반영하기 위해 JCDAS의 적설량을 정규화하여 모델에 입력하게 된다. Figure 3은 숙련과정에서의 적설량을 관측(JCDAS)과 비교하여 시계열로 나타낸 그림이다. 대표적인 유라시아와 시베리아에 대하여 각각 평균하였다. 숙련과정을 통해 모델에서 계산된 적설량은 관측값과 유사하다. 유라시아 전체 평균보다 시베리아 영역에서 모델-관측 간의 오차는 더 크게 나타났으나, 지면모델 초기화를 통해 입력되는 적설량에 의해서 모델에서 생산된 적설량은 매일 단계적으로 관측에 적응하고 있다. 다만 숙련기간 후반으로 갈수록 적설량의 모델-관측의 차이는 증가하는 추세다. 그리고 숙련단계로 선정한 10월에서 모든 해의 적설량이 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 적설량의 증가량이 클 때가 적설 초기화 기법을 통한 지면모델 숙련과정의 효과가 큰 것으로 나타났다. 따라서 10월은 빙권 요소를 반영하기 위한 계절예측 시스템 숙련과정의 목적에 부합하는 시기로 적절하다.

3.3 계절예측 시스템의 예측성 평가

이 절에서는 각 기후재현실험에서 나타나는 북반구 겨울철 기후 특성을 예측하는 능력을 검증하기 위해 매해 지상기온(surface air temperature)을 중심으로 분석하였다. 이에 앞서 모델의 mean bias를 조사하기위해 제어실험(CTRL)의 기후값과 관측값 사이의 차이를 비교하였다(Fig. 4). 유라시아 대륙에서는 강한 양의 오차가 우세하고 북미 대륙은 음의 오차가 지배하는 양상이다. 기후값으로 처방한 모델은 관측보다 태평양에서 동-서에서 음-양의 오차가 보이며, 북대서양에서는 주로 음의 오차가 나타났다. 즉 동아시아를 포함하는 유라시아 전역에서 모델은 실제 관측보다 따뜻하게 모의하였다. 북극해의 경우 뷰포트해와 그린란드, 그리고 바렌츠해는 관측보다 따뜻하고 동시베리아해 주변은 관측보다 차갑게 모의하였다.

11~12월(이하 ND) 지상기온의 mean bias(모델-관측)는 유라시아 대륙의 경우 시베리아를 중심으로 45°~70°N 부근에서 주로 양의 오차가 발생하였으며 크게는 9°C 이상 오차를 나타내었다(not shown). 2000년과 2009년, 2010년에서 북미 대륙의 경우 대부분 동쪽을 중심으로 음의 오차를 보이지만 알래스카와 그린란드에서는 양의 오차가 우세하였다. 그리고 유라시아와 북미의 mean bias는 주로 양-음의 쌍으로 형성되었다. 북극해역에서는 대륙에 비해 관측과 모델의 오차는 다소 약하게 나타났다. 특히 바렌츠해의 경우 모든 해에서 관측과 모델의 차이가 적은 것으로 분석되었다. 다만 카라해의 경우 모델-관측 오차의 연변동성이 큰 것으로 분석되었고 카라해에서 강한 양의 오차가 존재할 때는 인접한 유라시아 대륙(특히 우랄산맥)에서도 강한 양의 지상기온 오차를 나타내었다. 라테프해와 동시베리아해의 경우 관측보다 모델에서 지상기온이 더 낮게 모의된 것으로 확인되었으며, 뷰포트해는 양의 오차가 우세하였다. 이러한 차이는 북극해의 해빙농도의 예측이 해역마다 다소 차이가 있게 설정되어 있다는 점에서 그 원인을 유추할 수 있다.

Figure 4는 12월에서 이듬해 2월까지(이하, DJF)의

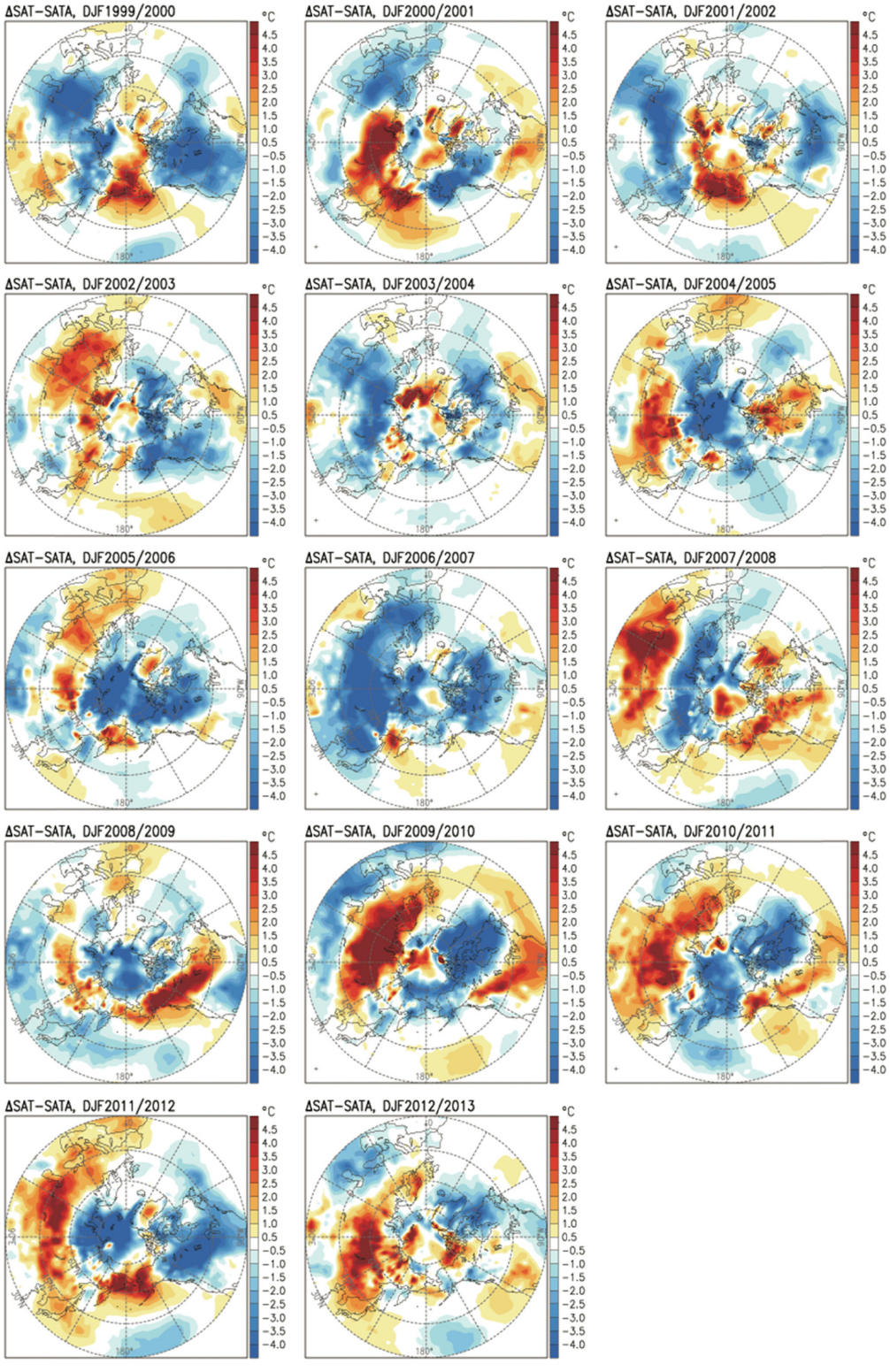

Fig. 6. The differences between hindcast run (hindcast-CTRL) and reanalysis (anomaly) from 1999/2000 to 2012/2013.

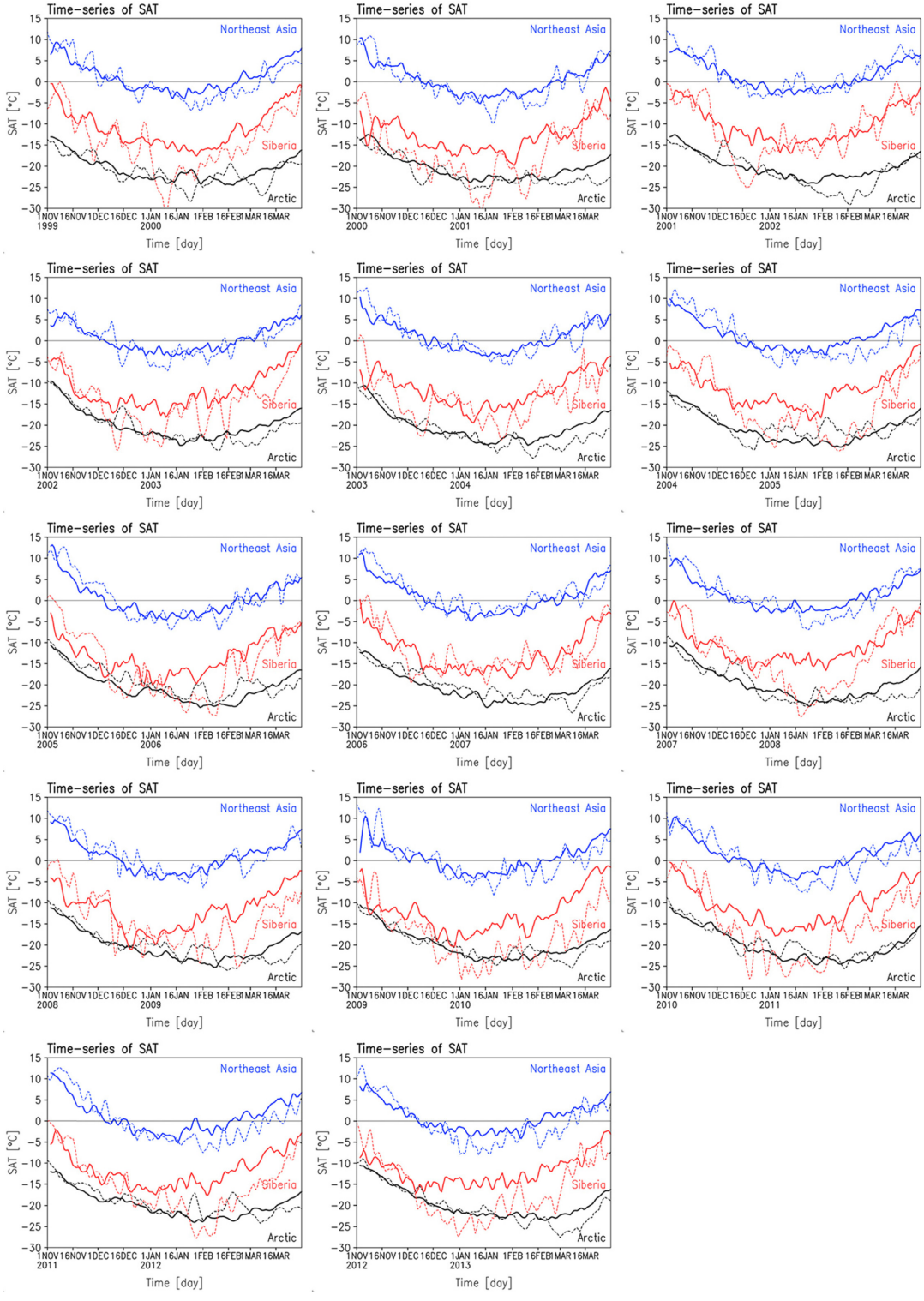

Fig. 7. Daily time-series of SAT averaged over northeast Asia (110°~145°E, 25°~55°N, blue), Siberia (80°~120°E, 40°~65°N, red), and Arctic (65°~82°N, black). Hindcast and reanalysis are represented by thick-solid and thin-dashed lines, respectively.

지상기온의 mean bias를 나타낸 그림이다. ND의 경우와 패턴은 유사하지만 오차의 정도에서 DJF가 강하다. 2001년과 2003년 그리고, 2007년을 제외하고 모두 유라시아 양의 오차가 크게 증가하였고, 다만 북미의 음의 오차 강도는 ND와 DJF가 서로 유사하다. 유라시아 양의 오차 띠는 이른 겨울(ND)보다 남하하는 경향성을 나타내었다. 즉 DJF 지상기온 예측은 북극해 주변으로는 관측과 유사하게 모델이 잘 모의하는 것에 반에, 60°N 이하의 시베리아 영역에서는 모델-관측 사이에 10°C 이상의 강한 양의 오차가 존재하면서 남하하는 한파를 모델이 과소 모의하는 것으로 나타났다. 북극해의 음의 오차는 카라해에서 라테프해와 동시베리아해에 이르는 영역을 둘러싸고 있으며, 이것은 계절예측 시스템의 해빙농도 예측과정에서 이 해역에서의 해빙 형성이 실제보다 너무 빠르게 이루어진다는 반증으로 이해할 수 있다.

기후장의 차이인 mean bias뿐만 아니라 계절예측 시스템의 지상기온 예측성을 평가하기 위해 관측에 대한 모델의 real predictability (Fig. 5), 그리고 모든 해 DJF의 모델 지상기온 편차와 관측(ERA-Interim) 지상기온 편차 차이 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 결국 Fig. 6은 모의한 모든 해에 대하여 모델-관측 편차 사이의 오차를 설명하는 그림이다. 모델과 관측의 기후장의 오차(mean bias)가 크게 나타났던 것(Fig. 4)과는 달리 관측의 변동성을 모델이 잘 모의하면서 편차의 오차 크기는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 다만 mean bias와 동일하게 편차의 크기는 모델보다 관측이 3배 정도 더 크다. 그리고 유라시아와 북미가 온난했던 해의 겨울철보다 한랭했던 해에서 계절예측 시스템은 관측과 유사하게 잘 모의하였다. 유라시아가 한랭했던 해에서 계절예측 시스템 역시 차가운 겨울로 예측하였다. 다만 한랭의 강도가 약하게 모의되면서 강한 양의 오차가 발생하였다. 14개 중 8개의 해에서 유라시아는 양의 오차가 나타났다. 그리고 적설과 해빙을 통한 겨울철 예측성 향상은 시베리아 영역과 북미, 바렌츠-카라해 부근에서 그 효과가 가장 크다(Fig. 5).

시간에 따른 지상기온의 예측 정도를 가늠하기 위해 모델과 관측에 대하여 각각 동아시아와 바렌츠-카라해 부근의 일 평균 지상기온 시계열을 그림으로 나타내었다(Fig. 7). 한반도를 포함하는 동아시아의 지상기온은 예측기간(11월 1일부터 이듬해 3월 31일까지) 동안 관측과 모델은 유사하다. 다만 변동성은 관측만큼 모의하지는 못하며 전반적으로 관측보다는 따뜻하게 예측하는 것으로 분석되었다. 특히 11~12월보다는 3월로 갈수록 오차는 더 증가한다. 바렌츠-카라해 부근의 지상기온 역시 모델의 변동성이 관측보다 약하게 나타났다. 앞서 언급한 해빙 예측의 오차로 인해

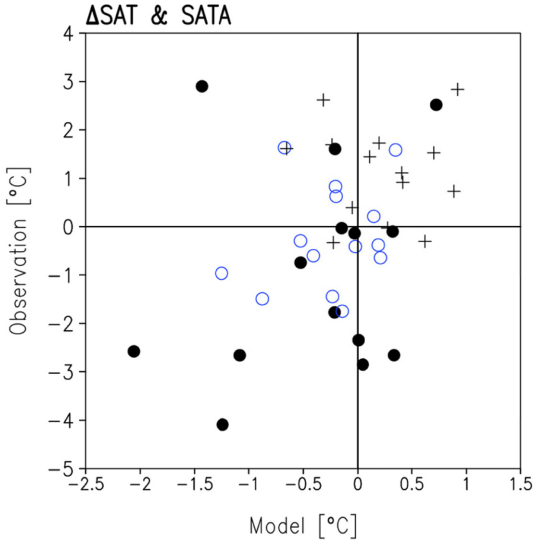

Fig. 8. Scatter plot of surface air temperature (DJF) between observation and hindcast every year. Closed circle, open circle, and cross mark represent Siberia, Asia, and Arctic circle, respectively.

Table 1. Root mean square errors (RMSE) of ensemble mean for daily surface air temperature from December to February.

Year	Northeast Asia	Siberia	Arctic
1999/2000	2.28	5.75	2.53
2000/2001	2.28	7.13	1.91
2001/2002	1.89	5.23	3.26
2002/2003	2.39	5.26	1.93
2003/2004	1.89	4.47	1.80
2004/2005	7.52	2.62	2.91
2005/2006	2.26	5.95	2.81
2006/2007	2.03	3.06	2.08
2007/2008	2.40	6.23	1.89
2008/2009	2.23	5.61	2.19
2009/2010	2.46	7.00	1.49
2010/2011	2.77	7.75	2.02
2011/2012	3.07	6.59	2.42
2012/2013	3.17	7.77	1.45

겨울철 바렌츠-카라해의 지상기온은 실제보다 더 한랭하게 모의되었다. 따라서 계절예측 시스템에서 해빙 감소에 따른 해수면 노출 면적 증가가 관측만큼 따라가지 못함에 따라 지표(해수면) 열속의 대기 유입량이 상대적으로 작게 작용한 것으로 보인다.

주요 영역에서의 모든 해의 겨울철 지상기온의 모의 결과를 관측과 비교하여 Fig. 8에 제시하였다. 극한 기후(extreme weather)가 발현되는 편차폭이 큰 해

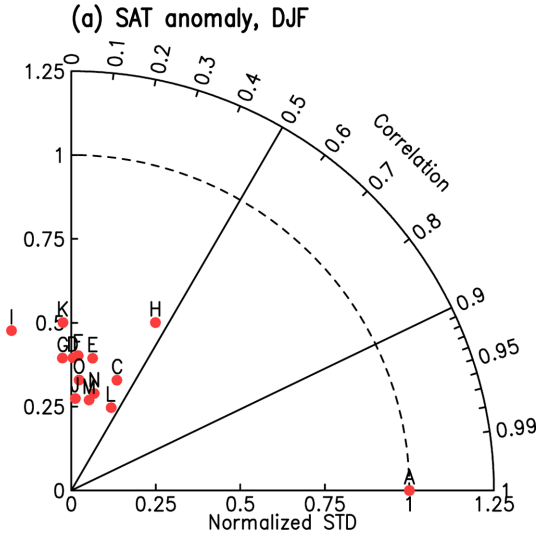

Fig. 9. Taylor diagram of the simulated surface air temperature anomaly (DJF) for seasonal prediction system. Labels over the markers denote every year case for hindcast ("B" = 1999/2000, "C" = 2000/2001, …, "O" = 2012/2013), but label "A" means observation.

에서 관측과 모델 둘 사이에 뚜렷한 양의 상관성을 나타내었다. 하지만 관측에 비해 모의된 겨울철 지상기온의 변동성이 약하고(Table 1), Fig. 5처럼 시베리아와 북극해 및 북미의 주요 영역을 제외하고는 겨울철 지상기온 예측성이 다소 떨어지기 때문에 대부분 해의 공간 상관성(pattern correlation)은 추운 겨울을 잘 모의하는 해를 제외하고는 낮게 나타났다(Fig. 9).

마지막으로, 강제력으로 작용하는 해빙농도의 예측성을 조사하기 위해 이른 겨울철(ND)와 겨울철(DJF)의 북극해 전역(65°N 이상)과 바렌츠-카라해(10°~100°E, 65°~90°N) 평균값을 모든 해에 대하여 시계열로 Fig. 2에 나타내었다. 해빙농도의 예측값은 관측보다 주로 적게 모의되었다. 특히 바렌츠-카라해의 경우 척치해와 더불어 최근 해빙농도 감소에 있어 중요한 지역임을 감안할 때 예측성이 다소 떨어진다. 전체적인 양보다 ND 시기의 해빙농도의 변동성은 예측이 어느 정도 관측을 따라가는 모습이나, DJF의 경우 2002/2003년과 2003/2004년, 2010/2011년에서 해빙농도는 관측과 15% 이상 오차가 발생하여 계절예측 시스템의 예측성 저하 원인으로 작용할 것으로 보인다.

4. 결론 및 토의

2012년 본 연구팀에 의해 유라시아 적설초기화 기법을 기반으로 한 겨울철 역학 계절예측 시스템이 성공적으로 개발 된 바 있다(Shim et al., 2012; Jeong et al., 2013). 본 기술노트에서는 앞서 개발된 적설 초기화 기법과 선형외삽에 기반을 둔 간단한 북극해빙 통계 예측 시스템을 역학모델에 접목시켜 독자적인 겨울철 계절예측 시스템을 개발하였으며, 이를 1999년부터 2012년 겨울까지를 실험기간으로 하는 기후재현실험을 통해 성능을 검증하여 보았다. 특히 본 연구에 사용된 적설 초기화 기법은 기존 연구들과 차별화하여 매해 10월을 숙련기간으로 하여 대기-지면의 초기화가 이질적인 적설관측에 대한 충분한 숙련기간을 거치도록 제작되었다. 이를 통해 토양 수분과 온도, 대기 지표면의 여러 변수들을 초기화 하는데 활용하였다. 해빙의 경우, 예측기간동안 대기 역학모델의 하층 경계조건으로 활용되었다. 역학모델에 근거한 기존 계절예측들과 달리 본 연구에서는 해빙에 대해 일반적으로 해수면 온도 예측에 널리 쓰이는 anomaly persistence 방법을 응용하였으며, 이를 관측과 비교하였다. 겨울철 예측에 중요성이 커지고 있는 해빙과 적설 방법들을 모델에 적용한 결과, 북반구 특히 적설초기화가 직접 적용된 내륙지역에서 예측성이 증가함을 확인하였다. 이는 보다 관측에 가까운 값으로 초기화된 적설 분포가 대기-지면 상호작용을 보다 잘 모의한 결과로 해석된다. 해빙 통계 예측 역시 기후 재현 실험에서 2000년대 이후 급격히 증가한 북극 온난화 현상을 잘 모의하는 데 크게 기여하고 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구 결과를 종합하여 볼때, 빙권 요소를 고려한 역학계절 예측의 경우, 접합 모형을 사용하였을 때 현재 기술 상태에서 여전히 남아있는 해빙과 적설의 바이어스를 관측에 가까운 값으로 완화시켜 줌으로서 계절예측성을 실질적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구에 활용된 연구결과들은, 그러나 그 활용에 있어 몇가지 약점을 지니고 있다. 첫째로 사용된 통계적으로 예측된 해빙 경계조건의 경우, 몇몇 해에서 관측과 여전히 큰 차이를 보이고 있어 아직 개선의 여지가 많이 남아 있음이 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 기후재현 실험에서 북극 해빙요소를 고려하였을 때 예측성이 향상되는 것으로 보아 보완된 해빙예측 모델의 적용은 앞으로 예측성 향상에 있어 중요한 요소로 작용할 수 있음을 의미한다. 다음으로, 본 연구에 사용된 역학모델의 상대적으로 낮은 해상도(2° × 2.5°)로 인한 예측성 저하와 극지역 물리 모수화 과정 개선을 꼽을 수 있다. 더 나아가 적설, 해빙 효과를 반영하지 않은 비교 실험군을 구성하여 잠재적 예측성의 향상 정도를 파악하는 것도 필요하다고 본다. 본 연구팀은 이러한 점들을 보완하여 보다 고해상도에서 물리 과정이 개선된 계절 역학 시

스템의 구축 연구를 진행 중에 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시 예측 및 국가정책 지원 강화사업 CATER 2012-3060 (PN14010)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Budikova, D., 2009: Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: A review. *Global Planet. Change*, **68**, 149-163.

Cohen, J., and D. Entekhabi, 1999: Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 345-348.

_____, and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO, and global warming: How closely related?. *J. Climate*, **18**, 4498-4513.

_____, K. Saito, and D. Entekhabi, 2001: The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 299-302.

_____, J. Foster, M. Barlow, K. Saito, and J. Jones, 2010: Winter 2009-2010: A case study of an extreme Arctic Oscillation event. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L17707.

Fletcher, C. G., S. C. Hardiman, P. J. Kushner, and J. Cohen, 2009: The dynamical response to snow cover perturbations in a large ensemble of atmospheric GCM integrations. *J. Climate*, **22**, 1208-1222.

Ghatak, D., A. Frei, G. Gong, J. Stroeve, and D. Robinson, 2010: On the emergence of an Arctic amplification signal in terrestrial Arctic snow extent. *J. Geophys. Res.*, **115**.

Ha, H.-K., and B.-M. Kim, 2014: Story of climate change reported by two polar scientists, Nomad publisher, ISBN 978-89-93322-60-6 04450, 189 pp.

Hardiman, S. C., 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.

Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707.

Jeong, J.-H., T. Ou, H. W. Linderholm, B. M. Kim, S.-J. Kim, J.-S. Kug, and D. Chen, 2011: Recent recovery of the Siberian High intensity. *J. Geophys. Res.*, **116**.

_____, and C. H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14704.

_____, B. M. Kim, C. H. Ho, D. L. Chen, and G. H. Lim, 2006: Stratospheric origin of cold surge occurrence in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14710.

_____, H. W. Linderholm, S.-H. Woo, C. Folland, B. M. Kim, S. J. Kim, and D. Chen, 2013: Impacts of snow initialization on subseasonal forecasts of surface air temperature for the cold season. *J. Climate*, **26**, 1956-1972. http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00159.1

Jun, S.-Y., C.-H. Ho, B.-M. Kim, and J.-H. Jeong, Sensitivity of Arctic warming to sea surface temperature distribution over sea-ice melted region in AGCM experiments. *Clim. Dynam.*, submitted.

Kim, B. M., J. H. Jeong, and S. J. Kim, 2009: Investigation of stratospheric precursor for the East Asian cold surge using the potential vorticity inversion technique. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 513-522.

_____, S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.*, **5**, 1-8.

Koster, R. D., and Coauthors, 2010: Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02402.

_____, and _____, 2011: The second phase of the global land–atmosphere coupling experiment: Soil moisture contributions to subseasonal forecast skill. *J. Hydrometeor.*, **12**, 805-822.

Liu, J., J. A. Curry, H. Wang, M. Song, and R. M. Horton, 2012: Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 4074-4079.

Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609-1625.

Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.

Screen, J. A., and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337.

Shim, T., J.-H. Jeong, and B.-M. Kim, 2013: Development of seasonal prediction system for northern winter using the cryospheric condition of late Autumn. *Atmosphere*, **23**, 73-83 (in Korean with English abstract).

Vavrus, S., and D. Waliser, 2008: An improved parametri-

zation for simulating Arctic cloud amount in the CCSM3 climate model. *J. Climate*, **21**, 5673-5687.

Vihma, T., 2014: Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review. *Sur. Geophys.*, **35**, 1175-1214.

Woo, S.-H., J.-H. Jeong, B.-M. Kim, and S.-J. Kim, 2012: Impact of snow depth initialization on seasonal prediction of surface air temperature over east Asia for winter season. *Atmosphere*, **22**, 117-128 (in Korean with English abstract).