

## 가을철 빙권 조건을 활용한 겨울철 역학 계절 예측시스템의 개발

심태현<sup>1)</sup> · 정지훈<sup>2)</sup> · 김백민<sup>1)</sup>,\* · 김성중<sup>1)</sup> · 김현경<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>극지연구소

<sup>2)</sup>전남대학교

<sup>3)</sup>기상청

(접수: 2012년12월 8일, 게재확정일:2012년12월30일)

### Development of Dynamical Seasonal Prediction System for Northern Winter using the Cryospheric Condition of Late Autumn

Taehyoun Shim<sup>1)</sup>, Jee-Hoon Jeong<sup>2)</sup>, Baik-Min Kim<sup>1)</sup>,\* , Seong-Joong Kim<sup>1)</sup> and Hyun-Kyung Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, South Korea

<sup>2)</sup>Earth Systems & Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

<sup>3)</sup>Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

(Received: 8 December 2012, Accepted: 30 December 2012)

**Abstract** In recent several years, East Asia, Europe and North America have suffered successive cold winters and a number of historical records on the extreme weathers are replaced with new record-breaking cold events. As a possible explanation, several studies suggested that cryospheric conditions of Northern Hemisphere (NH), *i.e.* Arctic sea-ice and snow cover over northern part of major continents, are changing significantly and now play an active role for modulating midlatitude atmospheric circulation patterns that could bring cold winters for some regions in midlatitude. In this study, a dynamical seasonal prediction system for NH winter is newly developed using the snow depth initialization technique and statistically predicted sea-ice boundary condition. Since the snow depth shows largest variability in October, entire period of October has been utilized as a training period for the land surface initialization and model land surface during the period is continuously forced by the observed daily atmospheric conditions and snow depths. A simple persistent anomaly decaying toward an averaged sea-ice condition has been used for the statistical prediction of sea-ice boundary conditions. The constructed dynamical prediction system has been tested for winter 2012/13 starting at November 1 using 16 different initial conditions and the results are discussed. Implications and a future direction for further development are also described.

**Key words:** Arctic sea-ice, cryosphere, initialization, seasonal prediction, snow depth

## 1. 서 론

북극은 금세기 들어 지구상 어떤 지역보다 급격히 가열되고 있으며 이로 인해 오랫동안 유지되어오던

\*Corresponding Author: Baik-Min Kim, Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, South Korea.

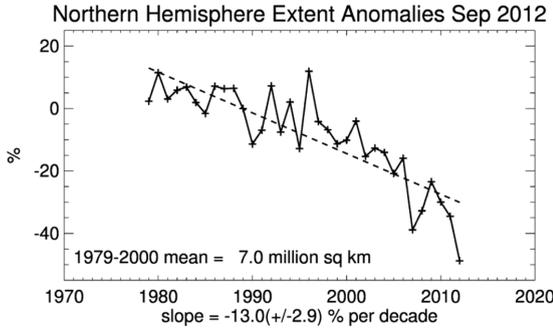
Phone : +82-32-260-6226, Fax : +82-32-260-6185

E-mail : bmkim@kopri.re.kr

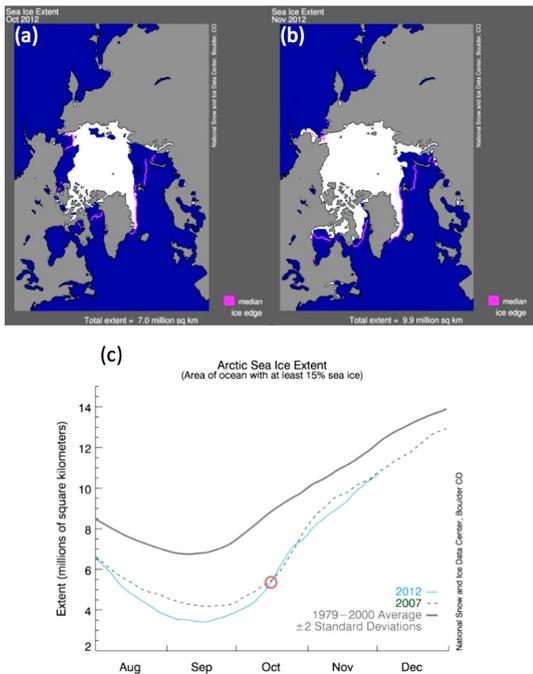
북극해와 인접 유라시아, 북미 대륙 고위도 지역의 기후 환경 또한 급격히 변화하고 있다 (Bhatt *et al.*, 2010; Screen and Simmonds, 2010). 이러한 변화는 기후 환경에 국한된 것이 아니라 북극권 고위도 육상 및 해상 생태계를 근본적으로 바꾸어가고 있으며, 영구동토층 해빙에 따른 러시아 송유관 파괴, 주택, 도로 등 구조물의 붕괴와 같이 인간에게도 심각한 위협을 직접적으로 초래하고 있다. 이에 북극 인접국가를 중심

으로 북극권 기후환경 및 생태계 변화에 대한 연구가 급세기 들어 활발히 진행되고 있다.

북극권의 급격한 온난화를 가장 잘 나타내주고 있



**Fig. 1.** Monthly time series of Arctic sea ice extent for September. Arctic sea-ice extent is calculated by the sum of the sea-ice concentration above 15% (National Snow and Ice Data Center, NSIDC, <http://www.nsidc.org>).



**Fig. 2.** Monthly-mean sea ice extent map for (a) October and (b) November of 2012 and (c) daily time series of sea ice extent in 2012 (cyan). In (a) and (b), pink line indicates climatological sea-ice extent for the corresponding month. The red open circle in (c) indicates the sea-ice extent at the time we starts forecast. Adopted from National Snow and Ice Data Center (NSIDC, <http://www.nsidc.org>).

는 지표는 해빙, 적설량 (snow depth) 혹은 적설면적 (snow-cover)과 같은 북극 빙권 요소의 변화이다 (Fig. 1, Fig. 2). 빙권 요소의 변화는 기후변화의 지표 (indicator)로서의 중요성뿐만 아니라 그 변화가 얼음-알베도 (ice-albedo), 눈-알베도 (snow-albedo) 피드백 (feedback)에 의해 대기의 변화를 증폭한다는 점에서 최근 학계에서 큰 주목을 받고 있다.

북극권의 이러한 변화는 북극권에 국한되는 것이 아니라 해빙 면적 감소에 따라 증가된 북극권의 수증기가 제트기류 등에 의해 중위도 지역으로 전달되어 시베리아와 같은 특정 지역에 적설량 및 적설면적을 증가시킬 수 있다 (Ghatak *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012). 증가된 시베리아지역의 적설 면적은 단파 복사를 더욱 많이 반사시킴으로써 지표를 급격히 냉각시키고, 시베리아 고기압을 강화해 전반적인 동아시아 겨울몬순의 강화를 초래한다 (Jeong *et al.*, 2011). 또한, 유라시아 대륙의 가을철 적설면적은 이러한 지역규모의 열역학적 특성을 변화시키는 역할 이외에도 대규모 대기 강제력으로 작용하여 성층권 전파에 적합한 대기 파동을 형성시키는 역할을 하고 있고, 강화된 대기 파동은 겨울철 극진동의 위상 및 강도를 변화시킬 수 있다고 알려지고 있다 (Cohen and Entekhabi, 1999; Cohen *et al.*, 2001; Cohen and Barlow, 2005; Fletcher *et al.*, 2009). 이와 관련하여 한반도의 겨울 몬순의 경우 가을철 시베리아 지역 적설 경향에 크게 영향을 받으며 또한, 성층권 극와도의 분포와 대류권 극진동의 위상에 의해 개별 한파의 강도가 조절됨을 선행연구에서 보인 바 있다 (Jeong and Ho, 2005; Jeong *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009).

관측사상 가장 강력한 북극진동이 발생했던 2009년 가을철의 경우, 시베리아 및 북중국을 중심으로 기록적인 폭설이 발생하여 적설면적이 평년에 비해 매우 컸으며 이로 인한 시베리아 고기압의 급격한 발달, 광범위한 지역적인 하층 냉각이 대규모 정체성 파동 (stationary wave)을 발생시켰다. 이는 고위도 성층권으로 전파되어 성층권의 극와도 (polar vortex)를 붕괴시켰으며 이로 인해 성층권으로부터 시작된 음의 북극 진동 (stratospheric annular mode)은 지표까지 전달되어 성층권과 대류권 전반에 걸친 강력한 음의 북극 진동 이벤트를 초래하였다 (Cohen *et al.*, 2010). 이로 인해 북미 북동부, 캐나다, 유럽, 아시아 각지에서 장기간 지속된 한파로 인해 큰 피해를 입었다. 2009년 뿐만 아니라 최근 2010년 및 2012년에도 유라시아 및 북미 각지에서 기록적인 겨울철 폭설 및 한파로 인한 피해가 속출하였다.

살펴본 바와 같이 2000년대 급격한 북극권 온난화와 관련된 빙권 요소의 변화는 북반구 겨울철 기후변동성에 지대한 영향을 미치고 있으며, 따라서, 계절

예측의 관점에서 보았을 때 이러한 북극 해빙 및 고위도 적설과 같은 빙권 요소들의 급격한 기후 변화와 변동성 확대를 적절히 감안한 계절예측 시스템의 개발이 요청되고 있다.

엘니뇨-라니냐 현상과 Madden and Julian Oscillation (MJO) 등 적도 지역의 대규모 구름 발생은 계절예측에 있어 가장 중요한 예측인자로 고려되어 왔다. 따라서, 현재까지 계절 예측을 위한 역학 모델의 개발은 주로 적도 해수면 변동과 그와 관련된 대류활동을 잘 모의하고 이에 기인한 원격상관 (teleconnection)을 잘 재현하는 데 주안점을 두어왔다. 계절예측에서 극지역 빙권 요소의 중요성이 높아지고 있음에도 불구하고 관련된 물리 모수화 과정에 대한 이해는 아직까지 많이 부족하고, 특히 해빙의 경우 유체와 고체의 중간적인 성격을 지닐 때가 대부분이어서 아직까지 지배 방정식을 구성하는 것조차 큰 어려움이 있다고 알려져 있다 (Budikova, 2011). 이로 인해 아직도 많은 수의 현업기관들이 계절예측을 수행함에 있어 하층 경계조건에 해당하는 해빙을 기후값으로 처방하는 등 극지역의 예측 인자에 대한 고려가 많이 부족한 실정이다.

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 당해 년도 계절예측에 시험 적용해 보았다. 역학모델에 대한 가을철 적설량 입력 방안은 최근 Jeong *et al.* (2012)와 우 등 (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 2012/13년 겨울 예측에 적용한 결과를 수록하였다.

## 2. 적설 초기화 방안

본 연구에 사용된 적설 관측 자료는 일본 기상청 기후자료 동화 시스템 (JMA Climate Data Assimilation System; 이하 JCDAS)에서 생산된 준실시간 적설량 분석 자료이다. 이 자료는 현재 기후 분석 연구에 널리

사용되고 있는 일본 기상청에서 개발한 재분석 자료인 Japanese 25-year Reanalysis (JRA25)를 현재 시점까지 확장한 자료로서 주어진 자료동화체계에 따라 준실시간으로 사용들에게 분석장을 제공하고 있다. 재분석자료에 사용된 모델의 수평해상도는 T106 (수평 약 120 km)이며, 연직으로는 46층을 사용한다. 특히, JCDAS는 세계기상기구 (World Meteorological Organization; 이하 WMO)로부터 얻어진 전문자료의 북반구 종관 기상 관측자료와 상시특별항공관측 (METeorological Aviation routine weather Report) 등의 자료를 분석하여 생산된다. 특히 적설분포의 위성관측과 적설량의 종관 기상 관측자료가 동화과정에 포함되어, 관측값에 매우 가까운 적설분포를 산출한다고 알려져 있다 (JRA25 technical note). 본 연구에서 적설 초기화의 영향을 조사하기 위해 사용된 기후모델은 CAM3 (Community Atmospheric Model Version 3.0; Collins *et al.*, 2004)이다. CAM3는 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발되었고 전 세계적으로 기후 변화와 변동성 연구뿐만 아니라 기후 예측 분야에서도 활발히 활용되고 있다. 본 연구에서는 유한 체적 역학코어 (finite volume dynamics core)를 사용하여 모델은 수평적으로  $144 \times 91$  ( $2.5 \times 2.0^\circ$ )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 수문학적 상태를 활용하여 지면 에너지와 운동량 그리고 복사속을 계산한 후 대기와 상호작용하도록 구성되어 있다. 한편 본 연구는 극지방에서 CAM3가 하층운을 과대 모의하는 단점을 보완하기 위해 Vavrus and Waliser (2008)이 개발한 극지 수분 과대 모의 경향을 억제하는 처방을 추가하였다. 이 방법을 적용하지 않으면 극지방에서 지표 열속의 대기 유입 및 상층으로의 전달이 적절하게 이루어지지 않아 하층에서 에너지가 저위도 지방으로 분산되어 모델은 왜곡된 반응의 결과를 낳게 된다.

본 연구에서는 재분석장인 JCDAS에서 얻어진 적설 자료를 활용하여 NCAR CAM3의 지면 모형인 CLM3의 초기장에 적설 깊이를 삽입하는 방식을 택하였다. CLM3 모형은 지표면 위에 쌓인 눈의 변화를 기술하기 위해 최대 5개의 눈층 (snow layer)를 구성하고 각 눈층의 상태가 실시간으로 변화한다. 눈층의 개수는 적설량과 눈의 용해 정도에 따라 증가 혹은 감소하게 되며, 각 층마다 눈의 나이, 눈 속의 물

함량, 그리고 얼음 함량 등의 변수들을 계산하게 된다. 따라서 관측 적설량을 모델에 삽입하기 위해서는 눈층의 구조뿐만 아니라 관련된 변수들도 초기화 해주어야 한다. 본 연구에서 초기화되는 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 적설량과 눈 관련 변수 사이의 관계식으로부터 역으로 처리하였다. 즉, 주어진 관측량으로부터 눈 관련 모델 변수인 적설의 전체 층 수를 결정하고, 각 층의 두께가 결정된다. 이에 대한 자세한 내용은 Jeong *et al.* (2012)에 서술되어 있다.

적설 자료를 지면 모델에 대입하여 적설 초기화 효과를 기대하기 위해서는 특별한 보정단계를 거쳐야만 한다. 이는 모델에서 모의하는 적설량과 실제 관측값 사이의 평년값, 그리고 변동성 사이에 큰 차이가 존재하기 때문이다. 이러한 차이를 보정 없이 직접 모델에 적용할 경우 초기화된 눈 상태가 모델의 기후값으로부터 큰 차이가 있어 예측 초기에 급격히 모델 고유의 눈 상태 쪽으로 수렴하는 기후 표류 (climate drift) 현상이 나타나게 되어, 예측시스템에 예측인자가 아닌 인공적 충격 (impact)을 주게 되어 전체 모델링 시스템의 예측성을 저해하게 된다. 이러한 오류를 방지하기 위해 본 연구에서는 기후모델에 토양수분 (soil moisture) 초기화 방안을 적용하여 계절 예측에 활용하기 위해 Koster *et al.* (2004)이 고안한 재규격화 방안을 사용하였다. 이 방안은 강수 계절 예측에 있어 여름철 토양 수분 초기화의 효과가 있는지를 판단하기 위해 국제적으로 진행된 GLACE 실험 (Koster *et al.*, 2011)에서도 사용된 바 있다.

$$\frac{F_o - \bar{F}_o}{\sigma(F_o)} = \frac{F_m - \bar{F}_m}{\sigma(F_m)}$$

여기서,  $F$ 는 적설량을, 아래 첨자  $m$ 은 모델,  $o$ 는 관측,  $\sigma$ 는 표준편차, 그리고 윗줄은 기후값을 의미한다. 결국, 먼저 관측값을 정규화 (normalize)하고 모델의 표준편차를 곱한 후, 다시 모델의 평균을 더하는 방식으로 관측값의 편차가 모델이 모의하는 기후 평균값 및 변동성을 갖도록 조절하는 방식이다. 따라서 위 수식과 같이 모델에서의 기후값과 모델의 변동성의 척도인 표준편차를 구해야 한다. 이를 위해 관측 해수면온도와 해빙농도를 경계조건으로 1979년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 형태의 모델 적분을 선행하여 수행하였다. 이때 사용한 경계조건 자료는 영국 헤들리 센터 (Met Office Hadley Centre)에서 제공하는 해수면온도와 해빙농도 자료이다 (Reynolds *et al.*, 2002).

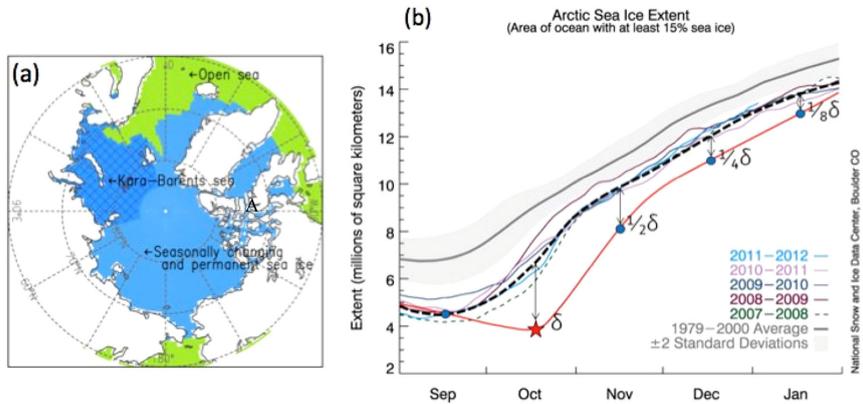
대기의 비선형성을 고려하고 통계적 유의성을 확보하기 위해 8개의 앙상블 멤버를 구성하였다. 앙상블 멤버는 NCEP R2 6시간 간격 자료를 활용하여 서로 다른 8개의 대기 초기장을 이용하여 구성하였다. 관측의 경우 1979년부터 2012년 사이의 JCDAS에서 제공하는 적설량 분석 자료로부터 기후값과 표준편차를 생산하였다. 이렇게 얻어진 적설량 편차를 재규격화하여 초기화 과정에서 사용하게 된다.

본 연구에서 고안된 적설 초기화 방법은 우 등 (2012)이 입증한 바와 같이 수평적 분포는 비교적 관측과 유사하고, 편차의 크기는 모델 적설량의 변동 특성을 반영한다. 그러나 재규격화된 모델의 적설량은 관측에 비해 전반적으로 양·음의 편차 모두 적게 나타나는 특성을 보인다. 이는 본 연구의 특수한 경우가 아니라 적설량 변동을 과소 모의하는 CAM3의 특징이다. 더욱이 기후 모델에서 일반적으로 적설량의 변동성이 관측보다 적게 모의한다는 사실은 이미 잘 알려져 있다 (Hardiman *et al.*, 2008).

### 3. 해수면온도 및 해빙농도의 경계조건

앞서 언급한 적설 초기화와 더불어 계절예측 시스템을 운영하기 위해서는 해수면온도와 해빙농도를 경계자료로 입력하여야 한다. 또한 초기자료와는 달리 경계자료는 예측 기간에 해당하는 미래의 경계자료가 필요하다. 본 연구에서는 신뢰성이 높고 갱신이 빠른 NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature (SST) V2에서 제공하는 해수면온도와 해빙농도를 사용하였으며, 해수면온도는 최근 월 평균 자료를 사용하고 해빙농도의 경우 최근 월 평균 자료와 최근 일주일 평균 자료를 동시에 사용하였다.

먼저 Fig. 3은 해빙농도를 예측하는 방안에 대한 모식도이다. 먼저 가장 최근에 관측한 10월의 평균 해빙농도 (Fig. 3(b)의 적색 별모양, Fig. 2(b)의 적색 원)와 11월 첫번째 주의 해빙농도를 바탕으로 11월 평균 해빙농도를 선형 외삽 방법을 통해 산출한다. 즉, 해빙농도가 최소가 되는 9월과 10월 이후부터 해빙농도의 변동성은 최대에 이르기 때문에 선형 외삽을 통한 최근 경향성의 반영은 통계적 예측성 향상에 유리하다. 그리고 산출된 11월 평균 해빙농도와 최근 경향성을 반영한 2007년부터 2011년까지 11월 평균 해빙농도 사이의 편차 ( $\delta$ )를 이용하여 12월부터는 해빙농도가 최대가 되는 3월까지 단순히  $\delta$ 를 선형적으로 줄여나가 최근 경향성을 따르도록 강제하는 방식을 사용하였다. 한편 해빙의 계절 변동은 북극해 전역에 걸쳐 동일한 형태를 나타내지 못한다. 특히 최근 해빙 감소의 대표 해역인 바렌츠-카라해 (Barents-Kara sea)와 척치해 (Chukchi sea)는 그 밖의 해역과 달리 계절 변

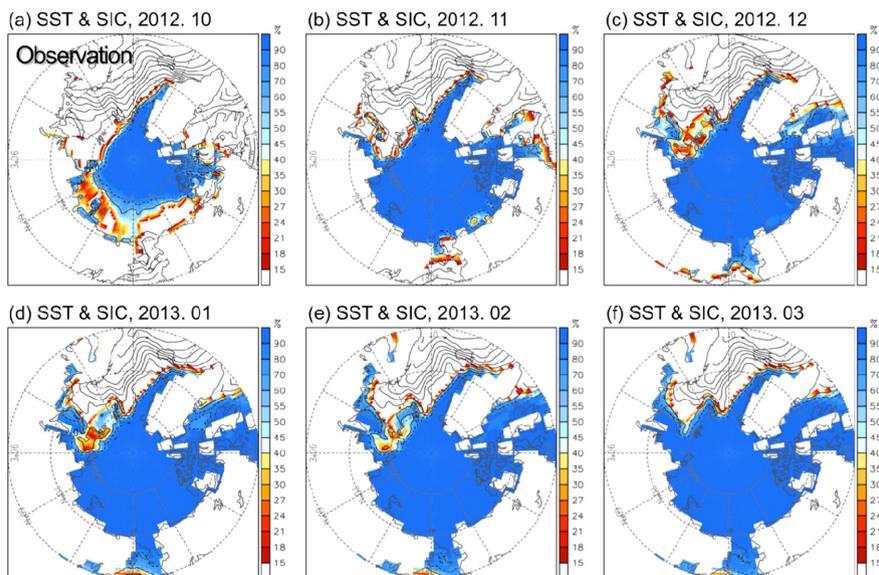


**Fig. 3.** (a) Sea-ice zone (SIZ) is colored by blue. SIZ is defined as the region occupied by sea-ice concentration over 15% at least once during 1979-2011. Permanent Ocean area is also defined as green. Hatched area indicates Kara-Barents sea. (b) Schematic representation for the prediction of sea ice concentration by simple relaxation method (See text).

동성이 매우 상이하다. 따라서 이러한 특징을 해빙농도 경계조건에 반영하기 위해 최근 변동성과의 편차  $\delta$ 의 감소 정도를 해역 별로 다르게 반영하였다. 즉, 이듬해 3월까지 시간에 따라 바렌츠-카라해는 척치해와 그 밖의 주변 북극해보다 해빙농도의 증가가 상대적으로 매우 느리며, 척치해는 바렌츠-카라해는 물론 그 밖의 주변 북극해보다 해빙농도의 증가가 압도적으로 빠르다. Fig. 4는 예측된 해빙농도 경계조건의 시간에 따른 공간 분포를 나타낸다. 특히 2012년은 2007년의 기록을 깨고 해빙면적이 관측사상 최소값을

나타낸 해이다. 그림 (Fig. 2(a))에서 2012년 10월 관측 해빙농도의 경우, 바렌츠-카라해와 척치해, 류포트해 (Beaufort sea), 그리고 버핀베이 (Baffin bay)의 감소가 특징이다. Fig. 4를 보면, 고안된 계절예측 시스템의 경계조건 예측 방법에 의해 11월부터 바렌츠-카라해를 제외한 영역에서 빠르게 결빙되어 해빙농도가 빠르게 증가하는 모습이 매우 뚜렷하다. 이듬해 3월에는 거의 모든 북극해의 해빙농도는 최근 평균값으로 되돌려진 상태이다.

다음으로, 해빙농도가 변한 지역에 대한 해수면 온



**Fig. 4.** (a) SST and sea-ice condition for October. Note that the SST and sea-ice condition of October is only used for the model prediction. (b)-(f) Statistically estimated SST & sea-ice boundary conditions.

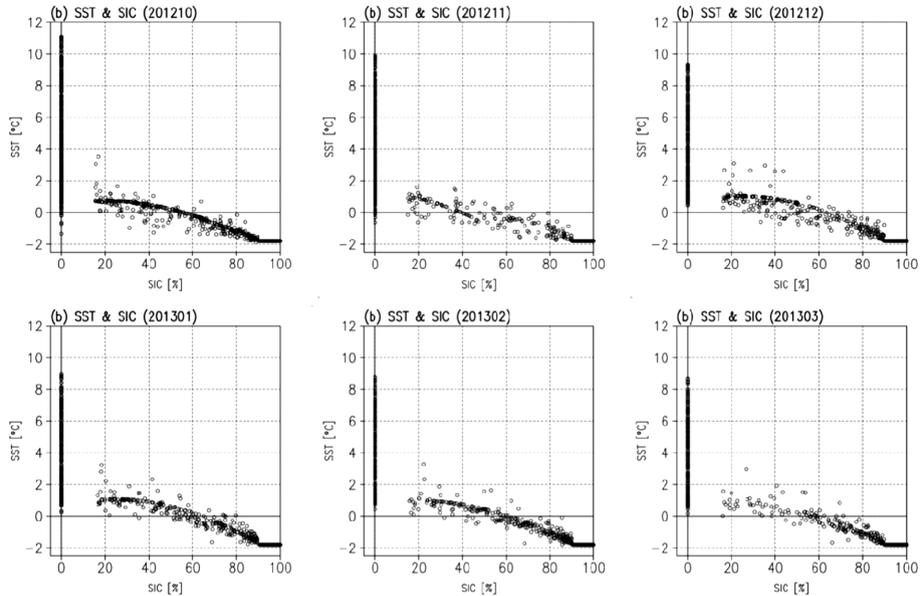


Fig. 5. Scatter plot between sea-ice fraction and sea surface temperature (SST) over the Arctic north of 65°N from October to March in the period of 1979-2011.

도 변화를 고려하였다. 일반적으로 해빙이 줄어든 지역에서 해수면 온도는 양의 편차를 보이며, 이와 관련되어 해빙이 어는 9월 이후 3월까지 추운 계절 동안 해수면으로부터 대기로의 수분, 열속이 급격히 증가한다. 따라서, 해빙면적이 줄어든 지역의 해수면 온도 상승분을 적절히 고려치 않으면 해빙면적 감소에 따른 대기반응을 제대로 모의하기 어렵다 (Jun *et al.*, submitted). 따라서, 본 연구에서는 Jun *et al.* (submitted)에 따라 북극해의 모든 격자점에 대하여 매월 별 해수면온도와 해빙농도의 관측값으로부터 두 변수의 상관관계를 2차 선형회귀식으로 유추하여 예측된 해빙농도로부터 해수면온도를 예측하도록 고안하였다. 이러한 방법은 계절예측에 있어 경계조건인 해수면온도와 해빙농도를 각각 독립적으로 모델에 적용함에 따라 발생할 수 있는 문제점을 최소화하고, 동시에 노출된 해수면에서 대기로의 적절한 열속 발생을 설명하는 데 효과적인 방법이다. 해수면온도와 해빙농도 사이의 관계를 적용하여 둘 사이의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었다. 관측값에서 적용된 것과 동일하게 해빙농도는 0% 또는 15%에서 100% 사이의 값으로 구성되어 있다. 해수면온도의 최소값은  $-1.8^{\circ}\text{C}$ 이며, 90%부터 100%의 해빙농도에서 해수면온도는 최소값으로 한정하였다. 따라서 15%에서 90%까지의 범위에 해당하는 해빙농도의 영역에서 해수면온도는 관측에서 규정된 회귀식에 의해 결정된다. 그 결과가 Fig. 5의 해빙농도와 해수면온도 사이의 상관관계이며, 이 관계

식은 본 연구에서 경험식에 의해 예측된 해빙농도로부터 해빙역에서의 의미 있는 해수면온도를 산출하는 근거가 된다.

이상 기술된 방법들을 북반구 해역에서 해빙 변동이 존재하는 지역에만 적용하기 위하여 최근 30년간 해빙농도가 적어도 한번 이상 15% 이상이었던 격자점을 모아 해빙역 (sea-ice zone, SIZ)으로 정의하였다 (Fig. 3, 청색 영역). 다시 말해 계절예측 시스템은 이 해빙역에 한하여 해빙농도를 예측하고 그에 해당하는 해수면온도를 회귀식으로 결정한다. 그 밖의 영역에서 모든 격자는 30년 동안 1년 내내 해빙이 존재하지 않는 영역 (녹색)에 해당하며, 여기에는 1981년부터 2010년까지의 기후값으로 대표되는 해수면온도만을 경계조건으로 입력하였다. Fig. 3(a)에서 해빙역 중 빙금으로 표기한 영역은 북극해에서 해빙 변동이 가장 큰 바렌즈-카라해 영역이다.

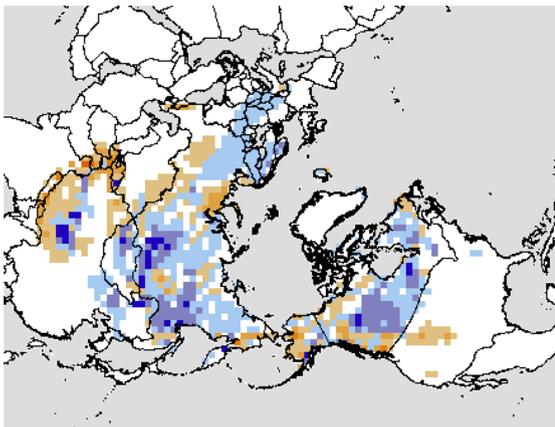
#### 4. 계절예측 방법

본 연구의 계절예측 시스템은 크게 두 부분으로 구분할 수 있다. 하나는 적설 초기화를 통한 지면 초기화 과정과 대기 초기자료의 입력이 이루어지는 모델 숙련 과정 (training procedure)이며, 다른 하나는 모델 숙련 과정으로 초기화된 대기와 지면 자료를 통해 예보가 이루어지는 계절예측 과정 (forecast procedure)이다. 그리고 사용된 자료는 적설 초기화를 통한 지

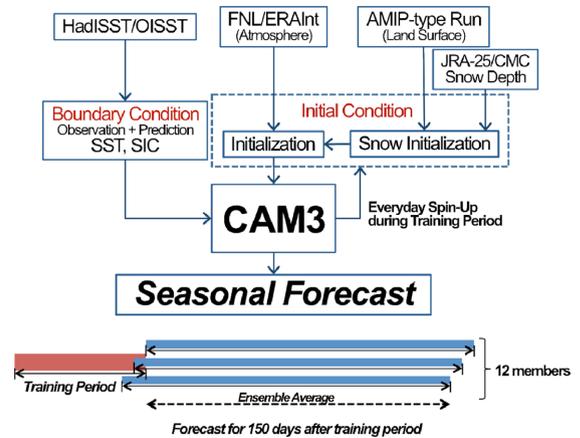
면 모델 초기조건 갱신을 위해 JRA-25 일 평균 적설량 분석 자료와 AMIP 모형 실험의 지면 초기자료, 그리고 대기의 초기조건 생성을 위한 6시간 평균 NCEP FNL (Final) Operational Global Analysis Data, 마지막으로 모델 경계조건을 위한 NOAA OISST V2의 해수면온도와 해빙농도이다.

본 연구에 적용된 적설 초기화 기법의 경우 이미 개발 완료되어 국내 및 국외학술지에 소개된 바 있다 (우 등 2012; Jeong *et al.*, 2012). 그러나, 우 등 (2012)와 Jeong *et al.* (2012)에서는 특정 시점의 관측 적설량을 모델에 초기조건으로 입력하는 방법을 개발하는데 집중하였으며 이를 통한 예측성 검증에 초점을 두었다. Jeong *et al.* (2012)와 우 등 (2012)의 경우 여러 지면 변수들 중, 적설 깊이만 초기화하는데, 이럴 경우 다른 지면 변수 (지중온도, 지중습윤)나 대기 조건과 물리적 불일치가 발생한다. 본 연구에서는 이를 극복하고 계절 예측의 예측성 향상을 최대화하기 위해 10월 한 달 동안 모델 숙련과정 (training period)을 설정하고 매일 관측 대기 조건과 JCDAS 자료로부터 입수한 재분석 적설량 자료를 모델에 입력하여 전체 모델링 시스템에 적용시키는 준 동화 과정 (semi-assimilation)을 적용하였다.

이 과정을 자세히 설명하면 다음과 같다. 먼저 2012년 10월 1일 (적분 1일)의 적설량을 재규격화하고 같은 날 AMIP 모형 실험에서 추출한 지면 모델 초기자료에서 해당 변수를 교체하는 적설 초기화를 수행한다. 여기서 생성된 새로운 지면 모델 초기장과 NCEP FNL자료로부터 생성된 대기 모델 초기장, 그리고 해수면온도와 해빙농도로 구성된 경계조건을 기반으로



**Fig. 6.** Monthly departure of snow covers from climatology for October 2012 (From Global Snow Lab, Rutgers University). Blue-colored regions represent where the snow anomaly is positive and vice versa for brown-colored areas.



**Fig. 7.** Schematic diagram of seasonal forecast system.

1일 적분한다. 2012년 10월 2일 (적분 2일)은 계절예측 모델 (CAM3)이 적분 1일에 생산한 대기 초기장을 다시 해당 일 NCEP FNL 자료로부터 산출한 초기장으로 대체하고, 지면 초기조건 역시 같은 방법으로 CAM3이 적분 1일에 새로이 생성한 지면 초기장에서 적설 관련 변수만 JRA-25의 적설 분석 자료를 바탕으로 재규격화한 적설량으로 대체한다 (적설 초기화). 이렇게 준비된 대기와 지면 초기장, 그리고 경계조건으로부터 CAM3는 다시 1일만 적분한다. 이와 같은 방법을 매일 반복하여 2012년 10월 3일 (적분 3일)부터 2012년 11월 6일 (적분 37일)까지 적분을 수행한다. 우리 연구의 핵심은 Fig. 7의 적설 초기화와 대기 초기자료의 갱신에 의한 초기조건의 반복 수행에 있다. 이를 통해 모델숙련 기간 동안 지면 상태가 대기 및 초기화된 적설량에 지속적으로 교정되어 적설과 관련된 지면 메모리 효과의 극대화를 기대할 수 있다.

계절예측 시스템의 경계조건으로 기후값 해수면온도를 사용함으로써 야기되는 이질성을 극복하기 위해 대기장 역시 모델숙련 기간 동안 관측값으로 대체하여 실제 해수면온도의 강제력 효과를 간접적으로 반영하고자 하였다. 또 실제 계절예측 과정에서는 예측 기간 동안 동일하게 해수면온도 편차를 유지시키는 편차 지속 방법 (anomaly persistent method)과 유사한 효과를 얻게 된다.

실제 계절예측은 모델숙련 과정을 통해 산출된 대기와 지면의 초기조건을 시작으로 150일 혹은 180일 동안 적분하여 이루어진다. 본 연구에서는 통계적 유의성을 확보하고 대기의 비선형성을 고려하기 위하여 12개의 앙상블을 구성하였다. 그리고 각 앙상블을 구성하기 위해 모델숙련 과정에서 2012년 10월 26일부터 2012년 11월 6일까지 생성된 00 UTC의 대기와 지

면 모델의 초기조건을 선택하였다. 한편 앙상블 구성함에 있어 00 UTC가 아닌 다른 시각의 초기자료를 선택할 경우 모델 시작 시간과 초기장 선택 시간의 불일치로 인한 모델의 충격이 수반될 수 있기 때문에 00 UTC가 아닌 다른 시간의 초기장 선택은 배제하였다. 마지막으로 본 연구에서는 계절예측 결과를 분석하기 위해 12개의 앙상블이 모두 존재하는 기간에 대해 11월부터 3월까지 월 평균하였으며, AMIP 모형

실험 결과와의 월별 편차를 산출하여 최종 결론 도출에 활용하였다.

### 5. 2012/2013년 겨울철 계절예측 결과

2012년 해빙면적 (일반적으로 해빙농도가 15% 이상인 영역의 면적 합)은 최소 해빙면적을 기록했던 2007년보다 약 18% 더 작은  $3.412 \times 10^6 \text{ km}^2$ 를 기록

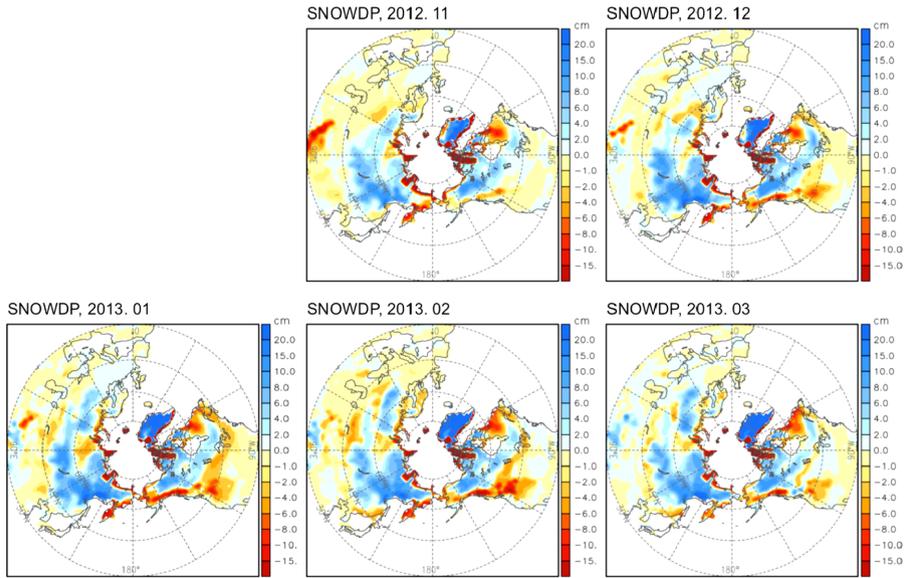


Fig. 8. Prediction result for snow depth.

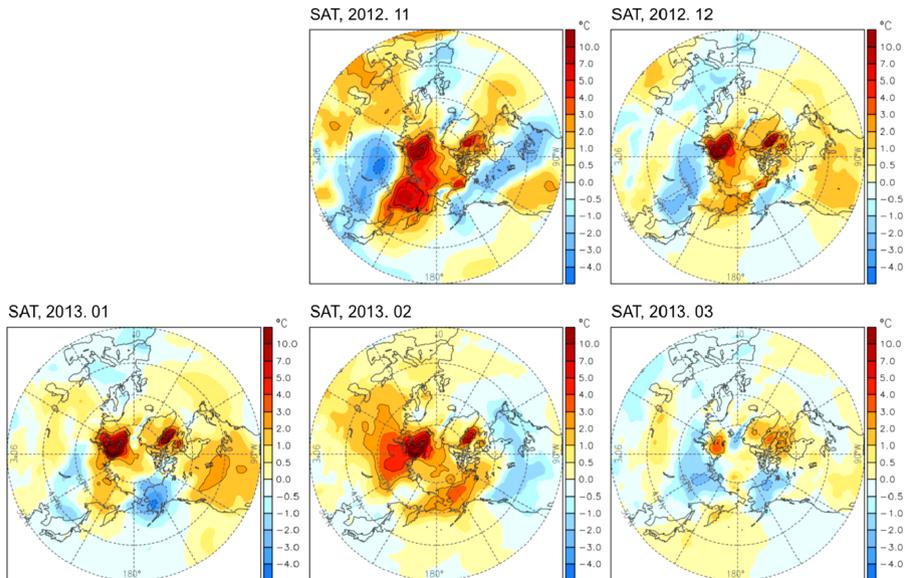


Fig. 9. Prediction results for surface (2 m) air temperature.

하였다. Fig. 2는 2012년 10월과 11월의 평균 해빙면적과 해빙농도의 분포와 시계열을 나타낸 것으로 바렌츠-카라해와 척치해 및 뷰포트해와 버핀베이의 해빙감소가 주목할 만하다. 특히 10월에서 11월로 넘어가면서 해빙면적은 바렌츠-카라해를 제외하고 급속히 증가하였다 (Fig. 2). 우리는 이러한 특징을 예측 모델의 경계조건인 해빙농도 예측모델에 적용한 바 있다.

계절예측 시스템을 통해 2012년 10월의 해빙과 적설 분포를 바탕으로 적설량과 지상기온의 예측 결과 Fig. 8과 9에 각각 나타내었다. 먼저 적설의 경우, 동시베리아에서 중앙아시아와 북동아시아에 이르는 지역에서 적설량이 양의 편차를 보인다. 또한 북미의 알래스카와 캐나다 일부 지역에서도 적설량은 3월까지 지속적으로 양의 편차를 나타낸다. 다만 11월 가장 많이 남하한 적설 증가 양상은 이듬해 2월부터 서서히 북상하는 모습이다. 북유럽의 경우 11월과 12월에는 적설량이 오히려 음의 편차를 나타내다가 2013년 1월부터 3월까지 상대적으로 뚜렷한 적설량 증가 양상을 보인다. 이러한 결과는 Fig. 6과 같이 올해 이래적으로 급속히 남하한 적설면적 (snow cover)의 양상을 적설 초기화에 의한 모델속련 과정이 계절예측 시스템에 도입되었기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 모델속련 기간 동안 매일 매일의 적설면적 지면 모델 초기화에 반영함으로써 대기보다 지속성이 강한 지면 모델의 특징을 계절예측에서 효과적으로 활용할 수 있다.

11월부터 이듬해 3월까지의 지상기온의 계절예측 결과는 Fig. 9와 같다. 상대적으로 따뜻한 북극해와 상대적으로 차가운 유라시아 대륙의 특징이 뚜렷하다. 바렌츠-카라해와 동시베리아해를 중심으로 강한 양의 기온 편차가 존재하고 시간이 지날수록 바렌츠-카라해의 양의 편차를 제외한 다른 북극해는 점차 약해진다. 유라시아 대륙 역시 11월엔 계절예측 시스템의 적설 초기화의 영향이 뚜렷하여 음의 강한 기온 편차가 존재하는 양상이 선명하다. 특히 11월과 12월은 시베리아 고기압 발달과의 관련성을 유추할 수 있는 대륙의 강한 음의 기온 편차를 발견할 수 있으며, 이는 동아시아의 한파와 발생 증가 가능성을 암시한다. 내륙의 음의 기온 편차는 이듬해 2월에 약해져 양의 편차로 부호가 바뀌지만 다시 3월에는 약한 음이 존재한다. 이는 북유럽을 포함하는 유라시아 전반의 형태로 이해할 수 있다. 다만, 적설의 분포와 관련하여 동북아시아보다는 중앙아시아 지역에서 상대적으로 따뜻한 겨울을 나타내는 것으로 예측하고 있다. 북미 대륙은 11월의 음/양의 쌍극형태의 기온 편차에서 12월부터는 알래스카 지역을 제외한 북미 대륙 전반에 걸쳐 주로 상대적으로 따뜻한 겨울을 설명하고 있으나 유라시아 대륙과는 반대로 이듬해 2월에는 평균보다 차가운 지상 기온 편차를 나타내는 것으로 분석된다. 적

설 초기화에 의한 지속성은 지상기온보다 적설량에서 강하다.

## 6. 요약 및 토의

본 연구에서는 최근 북극 빙권의 급격한 온난화에 따라 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 빙권 요소들을 겨울철 계절예측에 활용하는 방안을 고안하였으며, 이로부터 구축된 새로운 계절예측 시스템을 당해 년도 (2012/2013년) 겨울철 계절예측에 시험 적용해 보았다. 빙권 요소를 고려하는 하나의 방법으로써 본 연구에 적용된 적설 초기화 기법의 경우 우 등 (2012)과 Jeong *et al.* (2012)에서 검증된 기법을 10월 한 달 동안 매일 반복하여 적용하는 방식을 사용하여 다른 지면 변수들까지 간접적으로 초기화하는 준 동화 방식을 구현하였으며, 해빙의 경우 모형에 경계조건으로 들어가므로 예측기간인 11월 초~3월 말까지의 해빙 변화를 통계모형으로부터 입력 받는다. 또한, 해빙이 줄어든 자리의 해수면 온도에 대한 통계적 추정도 병행된다. 이러한 초기화와 예측 경계조건을 빙권 요소에 적용한 경우는 극히 드물며, 특히 통계적으로 예측된 해빙 경계조건을 대기 역학 모형에 사용하여 계절예측을 수행한 예는 찾아보기 힘들다. 이에 본 연구노트에서는 방법론에 대한 기술에 초점을 맞추어 기술하였다. 본 연구에서 개발된 방법을 실제 예측에 적용한 결과 2012/2013년 겨울철 계절예측의 경우, 동아시아는 초기에 입력된 평년 이상의 적설 영향이 지속적으로 영향을 주어 시베리아 고기압이 초겨울에 크게 확장하는 형태로 모사하였다. 그러나 예측에서 늦겨울의 경우, 동아시아는 전반적으로 따뜻해지는 경향을 보였으며, 북미는 2월의 경우 평년에 비해 추운 겨울이 될 것임을 예측하였다.

현재, 기상 선진국의 경우 현업으로 대기-해양-해빙 결합 모형을 이용한 계절 예측이 이미 이루어지고 있다. 그러나 이를 위해서는 해수면 온도를 비롯한 다양한 해양자료의 동화 및 초기화가 선행되어야 하나 한국의 경우 그 기반이 매우 약하며 현재 영국의 GloSea4 모형을 도입하여 시험 운영하는 단계에 있다. 그러나 실시간 결합 해빙 모델을 직접 예측에 활용함에 있어서는 아직까지도 모델의 부정확성과 큰 편차로 인해 실제 계절예측에 적용하기 어려움이 있다고 알려져 있다. 따라서 현 시점에서 해빙을 경계조건 형태로 예측하여 대기모형에 입력하는 방안은 해빙 역학과 관련된 불확실성을 오히려 제거하여 예측성을 높이는 실질적인 방안으로 활용될 수 있으며 또한, 해빙 감소에 따른 대기 반응을 역학 모형으로 이해하는 데 큰 도움이 될 수 있다.

그러나 현재까지 개발된 빙권 요소 기반 역학 계절

예측 시스템은 초기 개발된 단계이며 성능에 대한 체계적인 검증이 무엇보다 중요하다. 특히, 통계 해빙 모델의 개발에 많은 노력이 필요하며 적설 초기화 기법 또한 아직 보완의 여지가 많이 남아 있다. 특히 극지역의 해빙과 적설은 상호 밀접한 영향을 주고 받고 있기 때문에 궁극적으로는 지면-해빙-대기-해양의 결합 초기화 방안의 개발이 필요하다. 또한, 역학 모형의 경우에도 현재까지의 연구에서는 CAM3를 사용하였으나 앞으로 보다 극지에서의 다양한 피드백이 잘 반영된 CAM5를 활용하여 계절예측 시스템을 향상시킬 예정이다. 특히 최근 CAM에 포함된 CLM4 등은 특히 눈과 관련된 물리과정 모의에 많은 향상이 있었다고 알려져 있다 (CLM4 technical note). 마지막으로, 이 연구에서는 필요한 계산 자원 확보의 한계로 인해 상대적으로 낮은 해상도의 기후모형이 사용되었으나 눈과 관련된 물리적 상호작용은 지면의 특성, 지역적 특성, 인접한 해양 및 호수, 지면고도 등 다양한 지역적 특성에 의한 영향을 받으므로 이들의 정확한 계산을 위해서는 고해상도 모형의 사용이 필수적이다. 향후 연구에서는 이러한 점들을 보강하여, 보다 고해상도 모형을 사용하여, 과거 30년간 관측 자료를 이용한 장기간 과거 예측 실험 (hindcast)을 실시하고, 다양한 지역에서의 적설 초기화의 효과 및 그 물리적 메커니즘에 대해서도 학술 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업 CATER 2012-3060 (PN12010)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 우성호, 정지훈, 김백민, 김성중, 2012: 겨울철 동아시아 지역 기온의 계절 예측에 눈깊이 초기화가 미치는 영향, *대기*, **22(1)**, 117-128.
- Bhatt, U. S., and Coauthors, 2010: Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline. *Earth Interact.*, **14(8)**, 1-20.
- 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(3)**, 345-348.
- \_\_\_\_\_ and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO, and Global Warming: How Closely Related?. *J. Climate*,

**18(21)**, 4498-4513.

- \_\_\_\_\_, K. Saito, and D. Entekhabi, 2001: The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability. *Geophys Res Lett*, **28(2)**, 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(17)**, 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(5)**, 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(D24)**.
- 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(D21)**, 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(8)**, 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(D23)**.
- \_\_\_\_\_ and C. H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32(14)**, 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(14)**, L14710.
- \_\_\_\_\_, H. W. Linderholm, S.-H. Woo, C. Folland, B. M. Kim, S. J. Kim, D. Chen: Impacts of Snow Initialization on Subseasonal Forecasts of Surface Air Temperature for the Cold Season: <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-Pacific J. Atmos. Sci.*, **45(4)**, 513-522.
- Koster, R. D., S. P. P. Mahanama, T. J. Yamada, Gianpaolo

- Balsamo, A. A. Berg, M. Boisserie, P. A. Dirmeyer, F. J. Doblas-Reyes, G. Drewitt, C. T. Gordon, Z. Guo, J.-H. Jeong, D. M. Lawrence, W.-S. Lee, Z. Li, L. Luo, S. Malyshev, W. J. Merryfield, S. I. Seneviratne, T. Stanelle, B. J. J. M. van den Hurk, F. Vitart, and E. F. Wood, 2010: Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02402.
- \_\_\_\_\_, 2011: The Second Phase of the Global Land–Atmosphere Coupling Experiment: Soil Moisture Contributions to Subseasonal Forecast Skill. *J. Hydrometeor.*, **12**(5), 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. *Pro. Natl. Acad. Sci.*, **109**(11), 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**(3), 369-432.
- Screen, J. A. and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**(7293), 1334-1337.
- Vavrus, S. and D. Waliser, 2008: An Improved Parametrization for Simulating Arctic Cloud Amount in the CCSM3 Climate Model. *J. Climate*, **21**(21), 5673-5687.