

## 북극 온난화에 따른 겨울철 대기 변동성 분석 연구

김백민<sup>1)</sup> · 정의현<sup>2)</sup> · 임규호<sup>2),\*</sup> · 김현경<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>극지연구소 극지기후변화연구부, <sup>2)</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>3)</sup>기상청 예보국

(접수일: 2013년 12월 7일, 개재확정일: 2013년 12월 23일)

## Analysis on Winter Atmospheric Variability Related to Arctic Warming

Baek-Min Kim<sup>1)</sup>, Euihyun Jung<sup>2)</sup>, Gyu-Ho Lim<sup>2),\*</sup>, and Hyun-kyung Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Division of Climate Change, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

<sup>2)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>3)</sup>Climate Prediction Division, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 7 December 2013; accepted 23 December 2013)

**Abstract** The “Barents Oscillation (BO)”, first designated by Paul Skeie (2000), is an anomalous recurring atmospheric circulation pattern of high relevance for the climate of the Nordic Seas and Siberia, which is defined as the second Empirical Orthogonal Function (EOF) of monthly winter sea level pressure (SLP) anomalies, where the leading EOF is the Arctic Oscillation (AO). BO, however, did not attract much interest. In recent two decades, variability of BO tends to increase. In this study, we analyzed the spatio-temporal structures of Atmospheric internal modes such as Arctic Oscillation (AO) and Barents Oscillation (BO) and examined how these are related with Arctic warming in recent decade. We identified various aspects of BO, not dealt in Skeie (2000), such as upper-level circulation and surface characteristics for extended period including recent decade and examined link with other surface variables such as sea-ice and sea surface temperature. From the results, it was shown that the BO showed more regionally confined spatial pattern compared to AO and has intensified during recent decade. The regional dipolear structure centered at Barents sea and Siberia was revealed in both sea-level pressure and 500 hPa geopotential height. Also, BO showed a stronger link (correlation) with sea-ice and sea surface temperature especially over Barents-Kara seas suggesting it is playing an important role for recent Arctic amplification. BO also showed high correlation with Ural Blocking Index (UBI), which measures seasonal activity of Ural blocking. Since Ural blocking is known as a major component of Eurasian winter monsoon and can be linked to extreme weathers, we suggest deeper understanding of BO can provide a missing link between recent Arctic amplification and increase in extreme weathers in midlatitude in recent decades.

**Key words:** Arctic oscillation, barents oscillation, arctic amplification

\*Corresponding Author: Gyu-Ho Lim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea.  
Phone : +82-2-880-6725, Fax : +82-2-887-4890  
E-mail : gyuholim@snu.ac.kr

## 1. 서 론

기후 되먹임(climate feedback) 작용은 기후 시스템에 작은 변화가 일어났을 때 이를 증폭시키거나 약화시킬 수 있는 기후 시스템 내부의 고유 메커니즘이다. 지구온난화에 있어 기후 되먹임 작용은 매우 중요한 역할을 한다.

기후 되먹임 과정은 지구상 대기와 해양, 생명 현상 등 다양한 물리 과정 속에 내재되어 있으며 따라서 지역마다 매우 다른 양상으로 나타난다. 북극은 전 지구상에서도 기후 되먹임 작용이 가장 다양하고 강력하게 발생하고 있는 지역이기 때문에 지구시스템의 기후 되먹임 과정을 이해하는 데 있어서 매우 중요한 장소이다(Serreze *et al.*, 2006). 지구시스템 내에 존재하는 가장 강력한 되먹임 작용은 극지 해빙 변동을 조절하는 아이스-알베도 피드백이다. 태양빛을 대부분 반사하던 해빙이 녹으면서 바닷물로 바뀌게 되면, 태양빛은 바다에 흡수되어 바닷물을 테우면서 다시 해빙을 훨씬 더 많이 녹이게 되는 되먹임 과정을 거치게 된다.

1970년대 750만 제곱킬로미터이었던 북극 해빙 면적이 약 30년 동안 300만 제곱킬로미터가 사라져, 2012년 9월에는 400만 제곱킬로미터 이하로 감소하였다. 2013년 9월 면적은 다시 500만 제곱킬로미터 수준으로 회복하긴 했으나, 여전히 6번째로 가장 적은 해빙면적이며 이는 감소 추세상의 일시적인 반등으로 해석된다. Comiso *et al.* (2008)에 따르면, 해빙 면적의 감소 추세는 1979~96년 사이 10년당 2.2% 감소하였으나, 최근 10년 동안은 10년당 10% 이상의 감소 경향을 보이고 있다. 과거 고기후 자료를 살펴보아도 이러한 급격한 해빙 면적 감소는 과거 1500년 중 최근 20~30년간 집중된 현상으로 볼 수 있으며, 이러한 급격한 감소에는 자연 변동에 의한 부분도 있으나 인간 활동에 의한 온실가스 증가와 이에 따른 해빙면적 감소가 큰 부분을 차지하고 이에 따라 아이스-알베도 피드백 기작이 변화를 더욱 증폭시키고 있다(Kinnard *et al.*, 2012).

이 외에도 북극의 온난화에 따른 생물활동 증가와 이에 따른 태양빛 흡수로 인한 온도 상승, 영구동토층 해빙에 따른 메탄과 같은 강력한 온실가스 방출 등 과거에 유례를 찾아보기 힘들 정도로 다양한 온난화 증폭 메커니즘이 동작하고 있거나, 막 시작되고 있다. 이로 인해 북극의 온난화는 금세기 들어 지구온난화 경향에 비해 2~3배 빠른 속도로 가속화되고 있으며(Serreze *et al.*, 2009; Screen and Simmonds, 2010), 앞으로도 계속 다른 지역과 비교하여 급격한 온도 상승을 보일 것이다.

이러한 급격한 북극의 온난화는 북극에 국한된 현

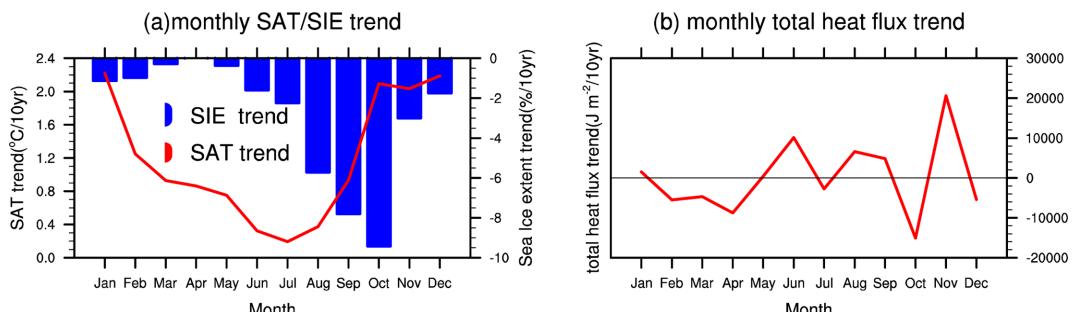
상이 아니다. 지표면 온도 상승에 따른 북극해 해빙 감소와 함께 북극해상 수증기 증가와 극제트류 순환을 따라 이류된 수증기가 인근 지역 및 시베리아 지역에 강설을 증가시키고 있으며(Ghatak, Frei *et al.*, 2010), 북극상공의 제트기류가 북극 온난화에 따라 교란되어 사행함에 따라 중위도 지역에 한파를 몰고 올 수 있다는 수치모형 실험 결과들이 발표되고 있다(Honda, Inoue *et al.*, 2009; Jaiser, Dethloff *et al.*, 2012; Liu, Curry *et al.*, 2012). 이를 뒷받침하듯, 최근 겨울철 북미, 북유럽, 그리고 동아시아 등 세계 각지에서 겨울철에 한파와 폭설이 빈번하게 발생하여 사회, 경제적으로 큰 손실을 초래하고 있다. 특히 2009년 겨울에는 관측사상 가장 강한 음의 북극 진동이 발생하였고, 이로 인해 북미 북동부, 캐나다, 유럽, 아시아 각지에서 장기간 지속되는 한파에 의해 큰 피해를 입었으며(Cohen *et al.*, 2010), 2012년 1월 중순부터 발생한 우랄 지역의 블로킹과 이로 인해 교란된 북반구 제트류 흐름에 의해 장기간 지속되는 한파가 출현하여 우크라이나 등 동유럽을 중심으로 600명 이상의 사상자가 발생하였다(NOAA State of Climate: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2012/2>). 이러한 광범위한 지역에서 나타나는 장기간 지속되는 한파는 이제 일시적 현상이 아니라 최근 들어 거의 매해 지속적으로 나타나고 있어 원인 규명이 시급한 실정이다.

북극에서 진행되고 있는 급격한 온난화가 북극뿐 아니라 한반도를 포함한 중위도 기후에 미치는 영향이 지대함에도 불구하고 국내에서는 아직 북극 온난화 경향에 대한 정량적 분석 연구와 또한, 과거와 다른 이러한 북극의 변화에 따라 달라진 대기 순환장의 변동에 대해 수행된 연구가 거의 없다. 특히, 변동성 측면의 연구는 국제적으로도 초기 단계에 머물러 있다.

본 연구에서는 재분석자료를 활용하여 북극권에서의 온난화 경향의 계절 분포를 분석하였다. 이를 통해, 북극권 온난화가 주로 겨울철에 가장 크게 나타나는 현상이며, 북반구 11월~2월에 온도 증가 폭이 가장 큼을 확인하였다. 또한, EOF와 회귀 분석을 통하여 북극 온난화에 따른 북반구 대기 변동성의 특징을 분석하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 월평균 해빙, 해수면 온도, 열속, 지표온도, 500 hPa 지위 고도장을 사용하여 북극권 온난화와 관련된 핵심 변수들의 변동성을 분석하였다. 전체 경향을 알아보기 위해 자료의 분석기간은 1948년부터 최근까지의 자료를 사용하였고, 북극권 온난화와 관련된 분석은 1989년부터 분석하였다. 변동성 분석을 위한 중요한 변수로 해수면 기압, 월평균 해



**Fig. 1.** (a) Linear trend of Arctic surface temperature (averaged over the area within the arctic circle of  $60^{\circ}\text{N}$ ) (red line) and linear trend of decreasing total Arctic sea-ice fraction for each month (blue column) in 1989~2012. (b) Linear trend of total surface heat flux (averaged over the area within the arctic circle of  $60^{\circ}\text{N}$ ) In 1989~2012.

수면 온도, 해빙농도(sea-ice concentration; SIC) 자료는 영국의 해들리 센터에서 제공하는 HadISST 자료를 활용하였다(Rayner *et al.*, 2003). 대기 순환과 관련된 자료는 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 제공한 ERA-Interim자료와 미국 NCEP/NCAR의 재분석장(R1)의 해면기압, 지위 고도장, 바람장, 지표온도, 열속 자료를 활용하였다(Kalnay *et al.*, 1996; Dee *et al.*, 2011). 먼저 북극 진동과 관련하여 변수들의 변동성을 살펴보기 위하여 해면기압자료를 EOF 분석하였다. 북극 진동은 대기에 항상 존재하는 내부 변동 모드(internal mode)이다. 최근 급격한 북극 기후변화와 관련하여 이러한 내부변동 모드의 변화에 관한 연구가 수행된 바 있다(Zhang, 2008). 그러나 북극의 온난화는 북극 진동뿐만 아니라 다른 내부변동 모드에도 영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 첫번째 EOF 모드 이외에 두번째 모드 분석도 수행하였다. 관련 모드 분석 이후, 회귀 분석을 통하여 각 모드와 관련된 대기 순환장의 다양한 양상을 분석하였다. 본격적인 분석에 앞서, 3장에서는 최근 일어나고 있는 급격한 온난화 경향을 대표하는 북극권 지표면 온도와 해빙 면적 감소 경향에 대해 기술하고, 4장에서는 EOF 분석과 회귀 분석을 통한 변동성의 변화에 대해 기술한다. 이 부분에서 시베리아 고기압 지수(SHI), 우랄 블로킹 지수(UBI)를 활용하였다. 시베리아 고기압 지수는 일반적으로 많이 활용되는 해면기압의 시베리아 지역( $80\sim120^{\circ}\text{E}$ ,  $40\sim65^{\circ}\text{N}$ ) 평균치를 사용하였고, 우랄 블로킹 지수는 Wang *et al.*, 2010의 방법을 이용하여 지수를 구했다. 이 방법은 다음과 같은 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$UBI = \frac{\langle \Delta Z_b, \Delta Z_m \rangle}{\langle \Delta Z_b, \Delta Z_b \rangle}, \quad (1)$$

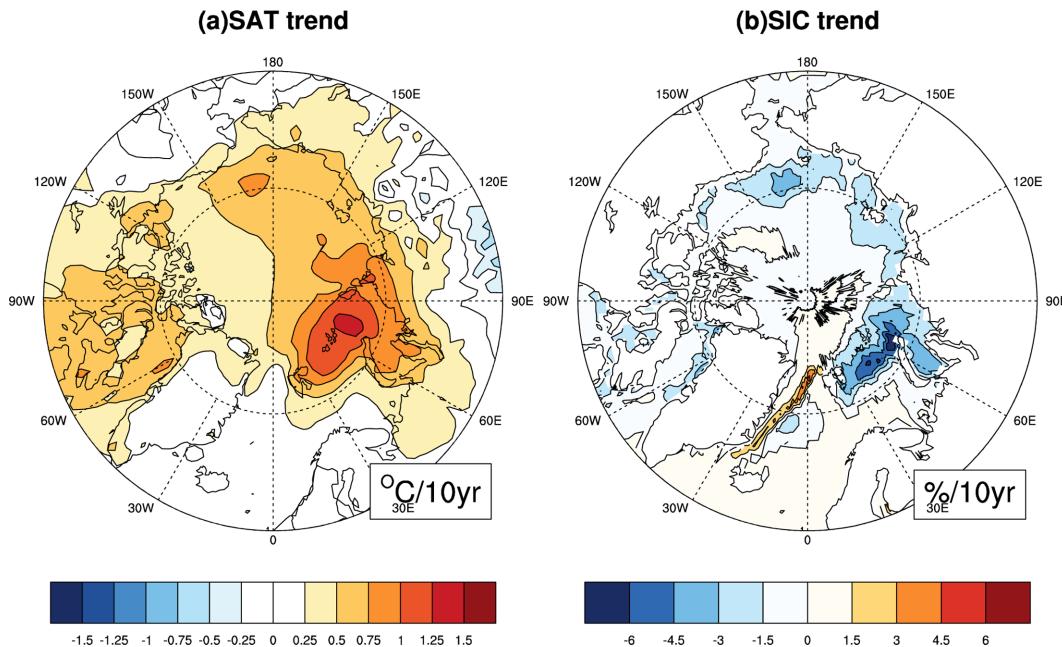
위 식에서  $Z_m$ 은 500 hPa 지위 고도장 아노말리를 나타내며,  $Z_b$ 는 우랄지역( $30^{\circ}\text{E}\sim90^{\circ}\text{E}$ )에서 블로킹이 관측

되었을 때의 500 hPa 지위 고도장의 합성평균을 나타낸다.

### 3. 북극권 온난화 경향 분석

Figure 1에서는 북극 온난화 경향을 월별로 파악해보았다. 월별로 평균된 북극지역(north of  $60^{\circ}\text{N}$ ) 지표면 온도 상승 경향을 분석해 보면, 북극의 온난화 경향이 계절별로 뚜렷이 구별됨을 알 수 있다. 겨울철의 경우 10월부터 이듬해 1월까지는 10년간 약 0.8도 이상의 상승경향을 보이는 반면, 여름철의 경우 10년간 약 0.1~0.2도 정도로 기온 상승폭이 제한적이다. 북극 해빙면적 감소 경향의 경우, 온도 상승과는 다른 패턴을 보여준다. 해빙감소는 8월부터 10월 정도 까지 급격한 감소추세를 보이고 있으며, 그 외의 시기에는 감소량이 적어 해빙감소가 특정 시즌에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 분석 결과 해빙감소 경향과 기온 증가 경향이 가장 큰 달은 10월이었고, 11월부터 1월까지는 기온의 증가 경향은 높은 수준을 유지하고 있으나 해빙감소 경향은 10월달에 비해 낮은 수준을 보이고 있어 북극의 기온 증가와 해빙면적 감소 경향 사이에는 단순한 관계가 아닌 복잡한 시간적 선후관계 혹은 타 변수간 관련성이 내재되어 있음을 가정할 수 있다. 즉, 기온의 증가 경향 자체가 북극 해빙면적 감소와 동시 상관이 있는 것은 아님은 확실하다. 그럼에도 불구하고, 전체 10월부터 1월까지 평균된 지표온도와 해빙면적의 경향성을 살펴보면(Fig. 2), 겨울철 해빙면적이 급격히 감소하는 지역인 바렌츠/카라 해 지역, 척치해 지역과 지표온도 상승하는 지역이 정확히 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Screen and Simmonds (2010)는 겨울철 북극의 급격한 표면기온 증가는 해빙면적 감소에 따른 북극해상 열속/수증기속 증가와 관련이 있음을 보인 바 있다. 북극해 열속의 경우, 해기차(air-sea temperature difference)

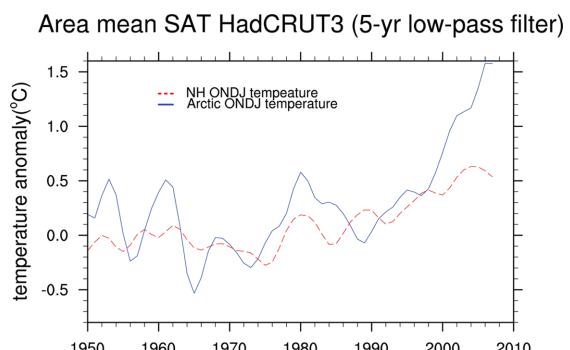


**Fig. 2.** (a) Spatial distribution of surface air temperature trend (per decade) and (b) sea ice concentration trend (per decade) of October, November, December, January in 1989~2012.

와 지표면 풍속에 비례하는 양이다. 11월부터 2월까지는 북극지역에 태양복사가 거의 도달하지 않는 시기로 대기가 매우 차가워지므로, 해빙이 감소한 지역을 중심으로 강한 해기차에 따라 열속이 급격히 증가하게 된다. 이로부터 하층 대기 가열이 존재하여 북극 온난화의 원인으로 작용하게 된다.

여름철의 경우, 태양복사가 가장 강함에도 불구하고 지표면 온도 상승은 매우 미미하다. 그 이유는 흡수된 태양에너지가 해빙을 녹이는 데 사용되어 대기 온도를 높이는 데에는 매우 제한적으로 사용되기 때문이다. 오히려, 가을철에 이르러 하층 안정도가 강화되고 연직 혼합이 제한된 상태에서 열속에 의해 대기 중으로 방출되는 다양한 에너지는 급격히 북극 대기 온도를 상승시키는 것이다.

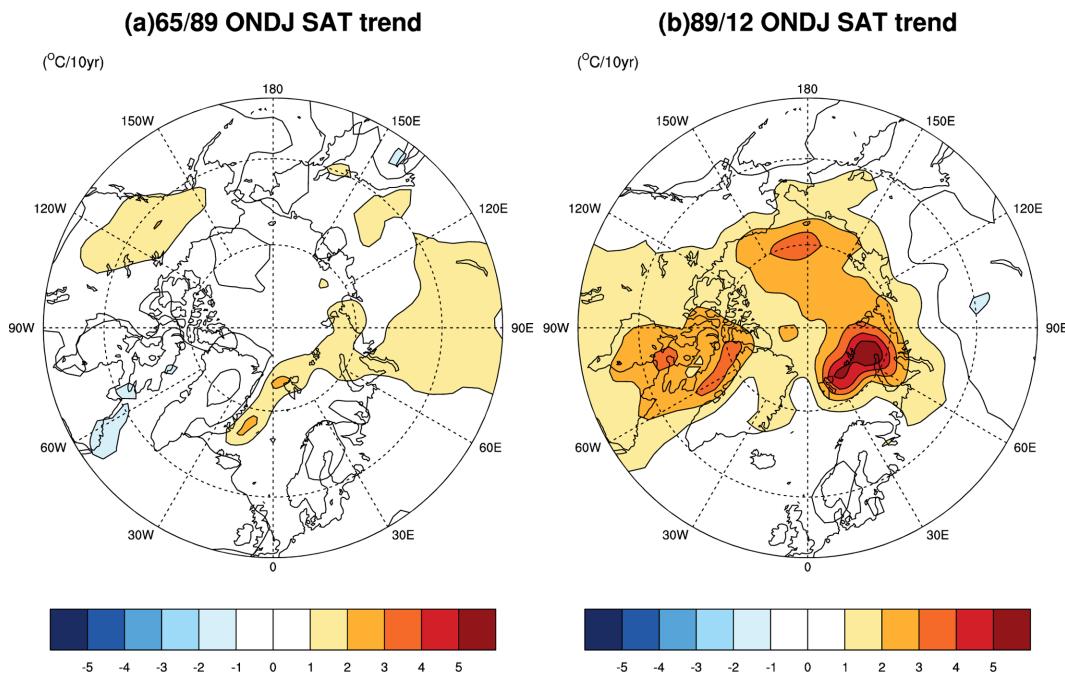
Figure 3에서 지난 60년 동안 온도증가 경향이 가장 큰 10월~1월 평균된 북극권 지표온도 변화 시계열(푸른색)과 북반구 평균 지표온도 변화 시계열(붉은색)을 비교하여 보았다. 북극지역에서는 1990년까지는 온도 증가 경향이 크지 않은데 비해 최근 20년 동안은 온난화가 가속화하고 있음을 알 수 있다. 북반구 평균 지표온도의 경우 70년 이후 상승폭이 증가했으나, 북극권 온난화 경향에 비하면 증가폭이 작은 것을 알 수 있어서, 최근 20년간 급격한 북극 온난화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 특히, 최근 10년간의 경우 북극권 온난화는 계속 진행되고 있으나, 북반구 평



**Fig. 3.** Seasonally averaged surface air temperature in Arctic (north of 60°N) (blue line) and seasonally averaged surface air temperature in Northern hemisphere (red line). The data are 5-yr moving averaged.

균 지표온도의 경우 상승폭이 매우 둔화되고 있음을 알 수 있다.

Figure 4는 1970년대와 1990년대의 20년간의 북극권 온난화의 공간적 변화 경향을 보여주는 것으로, 두 기간 동안 북극 온난화의 증가 경향이 공간적으로 매우 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 1970년대에는 겨울철 북극권 온난화는 주로 러시아, 시베리아 대륙과 북미 대륙을 중심으로 일어났으며, 북극해의 대부분 지역에서 오히려 온도가 감소하는 경향을 보여



**Fig. 4.** Seasonal (fall and winter) surface air temperature trend for (a) 1965~1989, (b) 1989~2012. Intervals are  $^{\circ}\text{C}/10\text{ yr}$ .

준다. 하지만 1990년대로 오면서, 북극해의 급격한 온난화와 북극해를 둘러싼 대륙의 냉각화 패턴을 보여주는데 이러한 온도변화 경향은 1970년대와 완전히 반대되는 형태임을 알 수 있다. 이러한 10년 이상 장주기 현상에서 나타나고 있는 패턴은 최근의 북극권 온난화와 추운 겨울 몬순의 강화와 밀접한 관련이 있으며, 또한 이러한 패턴의 급격한 역전은 북극 진동의 위상과 관련이 있어 보인다. 왜냐하면 북극 진동이 양의 위상일 경우 북극해에는 음의 온도 아노말리, 북극해를 둘러싼 고위도 대륙에 양의 지표면 온도 아노말리가 나타나고, 음의 위상일 경우 역전된 패턴이 나타나기 때문이다.

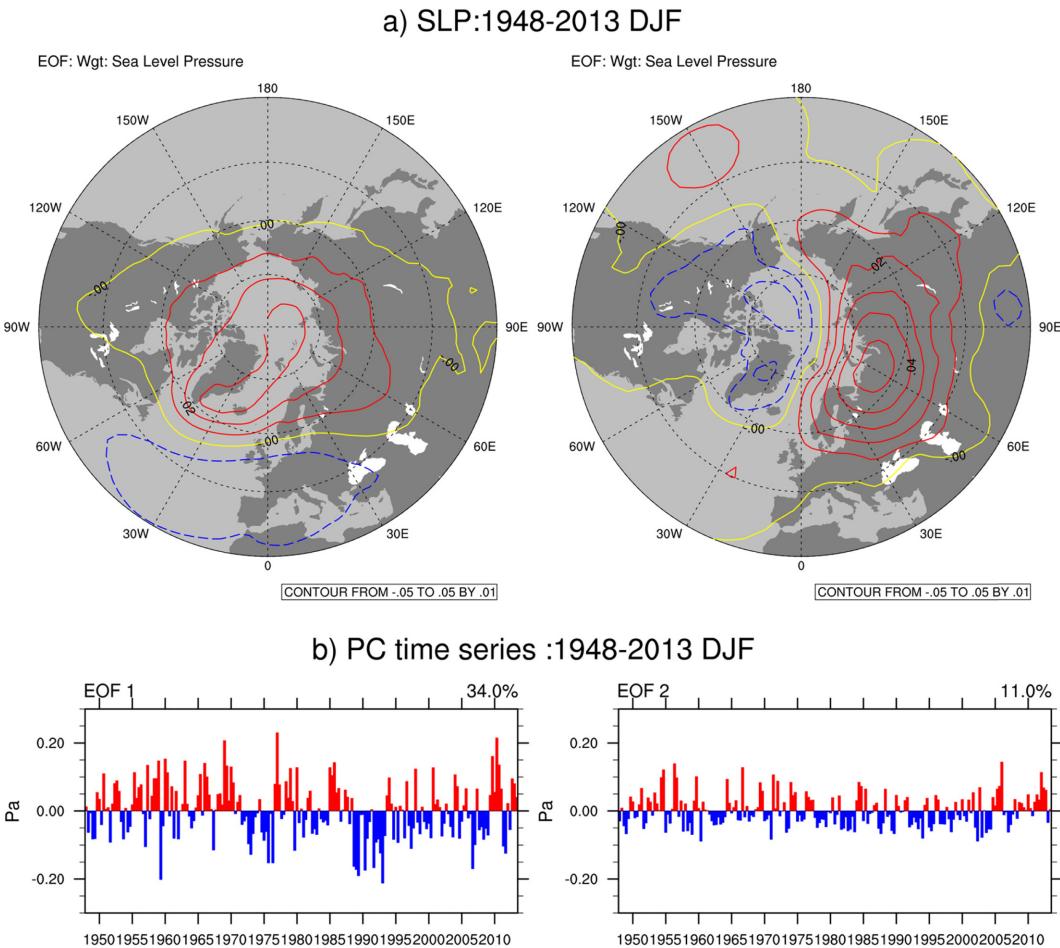
#### 4. 북극권 기후변동 모드 분석

본 연구에서는 북극권에서 최근 나타나고 있는 기후변동성을 이해하기 위해 기본적인 순환 패턴을 EOF 분석을 통해 살펴보았다. Figure 5는 NCEP-NCAR R1 자료 중 해수면 기압(SLP)를 사용하여 북반구 북위  $30^{\circ}$  이상 지역에 EOF 분석을 수행한 결과이다. 첫번째 모드는 일반적으로 알려져 있는 북극 진동(AO)의 형태를 보여준다. 이 모드는 전체 변동량의 34%를 설명하며 동아시아 한파와의 관련성을 위해 극의 양의 아노말리, 중위도가 음의 아노말리를 가질 때를 기준으로 위상으로 설정하였다. 이 AO모드는 동서 방향으로 확

장되어 분포하는 특징을 나타내며, Fig. 5b의 왼쪽 그림을 보면 2000년대 중반 이후 보다 그 강도의 세기 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 두번째 모드(Fig. 5의 오른쪽 그림들)는 첫번째 모드에 비해 남북 방향의 분포를 보인다. 이 모드는 Skeie (2000)에 처음 발견되었으며 그 후 연구들에 의해 “Barents Oscillation”, “Arctic Dipole”, “meridional pattern”, “Arctic Warm pattern” 등으로 명명 되었다(Overland and Wang, 2005; Holland *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008). 이 모드는 전체 변동량의 11%를 설명하며 Fig. 5b의 오른쪽 그림에서 볼 수 있듯이 최근 들어 그 강도가 강해지는 경향을 보인다. 본 연구에서는 이 모드를 북극 진동과 구별되는 특징을 가진 모드로 보고 바렌츠 진동으로 칭하도록 하겠다.

#### 5. 북극권 기후변동 모드와 주요 변수들과의 관계

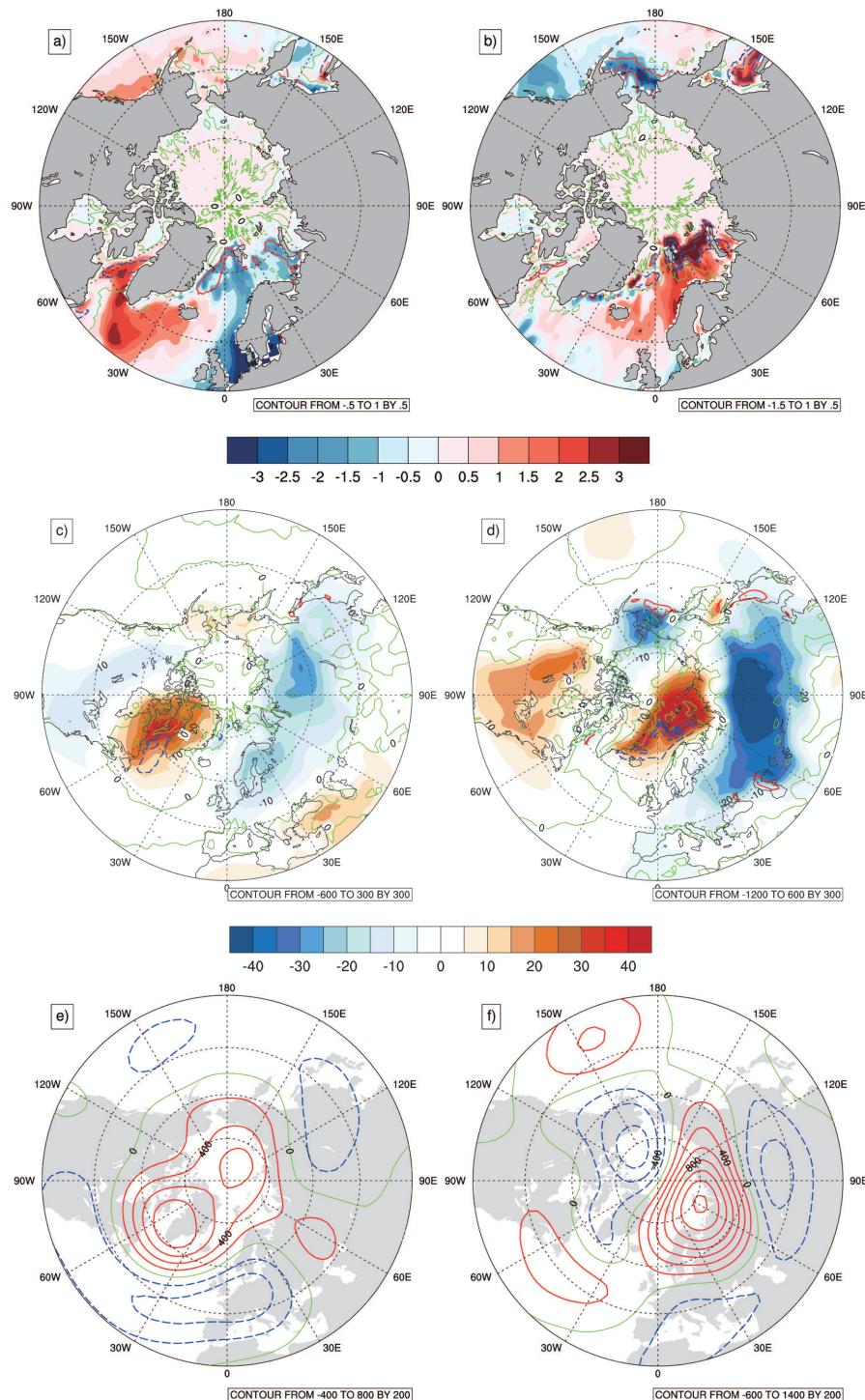
북극 진동, 바렌츠 진동과 겨울철 북반구 주요 변수들의 관련성을 살펴보도록 하자. Figure 6은 Fig. 5에서 보았던 북극 진동(좌), 바렌츠 진동(우)의 주성분 시계열에 대한 주요 변수들의 회귀 분석 결과이다. Figures 6a, 6b는 각각의 진동과 해빙농도(등고선), 해수면온도(음영)와의 관계를 나타낸다. Figure 6b에서 바렌츠 모드는 바렌츠 해 해빙의 감소와 해수면온도



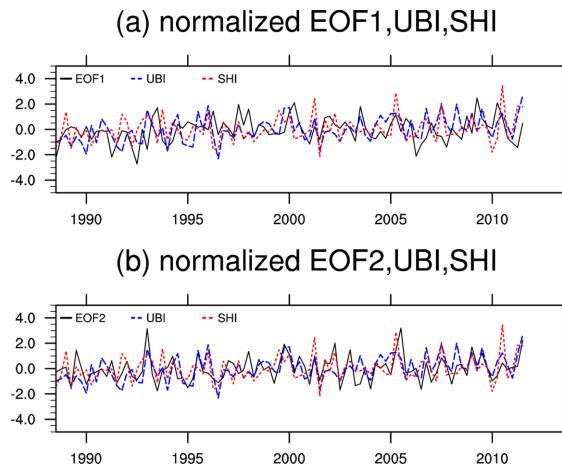
**Fig. 5.** a) The EOF 1 (left) and EOF2 (right) of northern hemisphere mean sea level pressure in 1948~2013. They explain 34.0% and 11.0% of total variance, respectively. b) Time series of principal component (PC) of EOF1 (left) and EOF2 (right). The annual cycle has been removed.

상승과 큰 관련이 있는 것을 알 수 있다. Figures 6c, 6d는 각각의 진동과 현열속(등고선), 지표온도(음영)의 관계를 나타내는데 북극 진동(좌)이 북아메리카 북쪽의 라브라도 해와 배핀만 지역의 현열속 및 지표온도와 관련이 깊은 반면 바렌츠 진동(우)은 노르딕해와 바렌츠 해에 이르는 영역의 현열속, 그리고 이에서 카라 해까지 확장되는 지표온도와 관련이 깊음을 알 수 있다. 가장 특징적인 점은 바렌츠 진동과 관련된 지표온도의 경우, 북극 바렌츠 해의 양의 온도 편차와 함께 남북 쌍극 형태로 동유럽, 시베리아를 포함한 북동아시아 영역에 매우 큰 음의 온도 편차를 보여준다. 이는, Fig. 6c에서 살펴본 북극 진동과 관련된 온도 편차의 패턴에서는 유라시아 대륙에 음의 온도 편차가 나타나긴 하지만, 바렌츠 해 진동에 비해서는 약한 것을 알 수 있다. 따라서, 이는 동아시아와 시베리

아 지역을 기준으로 살펴볼 때 바렌츠 진동이 동아시아 겨울 평균을 연구할 때 상대적으로 더욱 중요할 수 있음을 암시한다. 마지막으로 Fig. 6e, 6f는 500 hPa 지위고도장과 각각 모드의 회귀 분석이다. 북극 진동의 경우 동서방향으로 확장된 형태의 모습을 보이는 데 반해 바렌츠 진동의 경우 북극해 바렌츠 해를 중심으로 양의 편차, 시베리아 및 보페트를 중심으로 음의 편차를 나타내 역시 북극 진동과 매우 다른 패턴을 보인다. 특히, 바렌츠 해를 중심으로 한 상층 고기압의 발달 및 유라시아 지역을 중심으로 한 상층 저기압의 형성은 유라시아 지역의 지상에 한랭이류를 증가시켜 시베리아 고기압의 확장과 동아시아 지역 한파를 불러일으킬 수 있다는 것이 잘 알려져 있다. 일반적으로 북극 진동은 순압적인 성격을 가지는데 (Thompson and Wallace, 2000) 그에 반해 바렌츠 진



**Fig. 6.** The SIC anomalies (contour) and SST anomalies (shading) regressed on the PCs (a) EOF1 and b) EOF2 of Fig. 5) in 1948~2013. The SHFX anomalies (contours) and SAT anomalies (shading) regressed on the PCs (c) EOF1 and d) EOF2 of Fig. 5). GPH500 (contour) regressed upon the PCs (e) EOF1 and f) EOF2 of Fig. 5). Positive and negative contours are red and blue, respectively. The zero contour is green. Contour spacing is 0.5 K for SST, 300 W/m<sup>2</sup> for SHFX and 200mb for GPH500.



**Fig. 7.** (a) The normalized PC of EOF 1 (black line), the normalized time series of the Ural Blocking Index (blue line) and the normalized time series of the Siberian High Index (red line) for the winter months (December, January, February) for 1989~2013. (b) same with (a) except for EOF2 (black line).

동은 하층과 상층의 기온분포 및 동서방향 바람의 구조가 분리되는 형태인 경압구조를 지니며 하층에 집중된 온도 편차 및 기압 편차가 나타나는 것을 확인하였다. 북반구 겨울철 기후에 큰 영향을 주는 북극 진동과 2000년대 이후로 급속히 감소하고 있는 해빙의 관계에 학계의 많은 관심이 있으나 둘 사이의 관계는 명확히 밝혀져 있지 않다. 몇몇 연구에서 북극 진동의 위상 변화가 해류의 흐름에 영향을 미쳐 북극 해빙의 양에 영향을 주거나 북극 진동의 유체적 메모리로 인해 다음 여름의 해빙농도에 영향을 준다는 연구가 있을 뿐이다(Rigor, 2002). 최근 해빙 변화의 주된 영향은 대류권 중하층에 가장 큰 영향을 주므로, 바렌츠 진동의 중심이 해빙이 가장 많이 녹는 지역에 위치하고, 또한 바렌츠 진동의 연직구조가 경압적인 형태를 나타내는 것을 볼 때, 겨울철 북극해빙 감소에 따른 대기반응은 북극 진동보다는 바렌츠 진동이 나타날 가능성이 매우 높다. 바렌츠 진동이 2000년대 이후 강해지고 있는 것을 보면(Fig. 5b), 2000년대 이후 급격히 줄어드는 겨울철 북극해빙 면적과 큰 연관성이 있음을 짐작할 수 있다.

이러한 바렌츠 진동과 중위도 순환장의 관계를 알아보기 위해 겨울철 바렌츠 진동(EOF2)의 주성분 시계열과 우랄 블로킹 지수, 시베리아 고기압 지수와의 시계열을 나타내었다(Fig. 7). 우랄 블로킹 지수는 Wang *et al.* (2010)의 방법을 활용하여 겨울철 월별로 산출하였고 시베리아 고기압 지수는 일반적으로 사용하는 시베리아 지역( $80\sim120^{\circ}\text{E}$ ,  $40\sim65^{\circ}\text{N}$ ) 평균 해수면 기압

**Table 1.** Correlation coefficient between the PC time series of EOF1, 2 and the Ural blocking index and the Siberian High Index.

Correlation	EOF1	EOF2
UBI	0.18	0.54
SHI	0.10	0.49

이다. 이들 시계열을 보면 상관지수가 0.54 정도로 유의한 것을 확인할 수 있다(Table 1). 그에 반해 북극 진동지수는 우랄 블로킹 지수 및 시베리아 고기압 지수와 상대적으로 낮은 상관관계를 보였다. 이는 바렌츠 진동이 동아시아 겨울 몬순과 보다 깊은 관계에 있음을 나타낸다. 즉 바렌츠 진동이 강해지면 우랄 지역 중하층의 지위 고도가 증가하여 블로킹의 발생을 유발하거나 그 강도를 강화시킨다. 우랄 블로킹은 Wang *et al.* (2010) 이 밝힌 바와 같이 동아시아 한파에 지대한 영향을 주는 시베리아 고기압과의 상관성이 매우 크다고 알려져 있으며 일례로 2012년 1월에는 이 우랄 블로킹이 한 달 가량 발달해, 유라시아 지역의 동서방향 공기흐름이 느려지고 이에 시스템의 발달 정도가 강해져 동아시아를 비롯한 한반도에 한파가 발생했다.

## 6. 결론 및 토의

경향분석, 회귀분석, EOF 분석 등을 통하여 겨울철 북극 온난화의 시공간적 구조와 이와 관련된 대기 내부순환 모드들을 분석하여 보았다. 월별 표면기온 경향 분석 결과에서 살펴보면 북극의 온난화 경향이 계절별로 뚜렷이 구별됨을 확인할 수 있었다. 종합하면, 최근 30년 동안 겨울철의 경우(10월~이듬해 1월) 10년당 약 0.8도 이상의 상승경향을 보인 반면, 여름철의 경우 10년당 약 0.1~0.2도 정도밖에 기온 상승이 되지 않아 그 폭이 제한적이었다. 따라서, 북극 온난화 경향의 경우 겨울철이 여름철에 비해 두드러진 선형 연구 결과들을 다시 확인할 수 있었다(Screen and Simmonds, 2010). 북극 해빙면적 감소 경향의 경우, 8월부터 10월까지 매월 급격한 감소 경향 추세를 보였으며 그 외의 시기에는 감소량이 적어 해빙감소가 특정 시즌에 집중되어 있었다. 분석 결과 해빙감소 경향과 기온 증가 경향이 가장 큰 달은 10월이었고, 11월부터 1월까지는 기온의 증가 경향은 높은 수준을 유지하고 있으나 해빙감소 경향은 10월달에 비해 낮은 수준을 보였다. 따라서, 북극의 기온 증가와 해빙면적 감소 경향 사이에는 단순한 관계가 아닌 복잡한 시간적 선후관계 혹은 타 변수간 관련성이 내재되어 있음을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 전체 10

월부터 1월까지 평균된 지표온도와 해빙면적의 경향성을 살펴보면 겨울철 해빙면적이 급격히 감소하는 지역인 바렌츠/카라 해 지역, 특히 해 지역과 지표온도 상승하는 지역이 정확히 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

다음으로, 이러한 겨울철 북극권의 뚜렷한 온난화 경향이 대기의 어떠한 내부 변동성과 관련이 있는지 살펴보기 위해 EOF 분석을 통해 살펴보았다. 그 결과, 첫번째 모드인 AO보다 BO에 관련된 대기온도, 해수면 온도, 해빙 분포의 구조가 최근 북극 온난화 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히, BO의 경우, 바렌츠 해를 중심으로 한 양의 온도 편차, 유라시아 지역을 중심으로 한 음의 편차의 구조를 지니므로 동아시아 겨울온순과 밀접한 관련이 있음을 파악할 수 있었고, 실제로 유라시아 지역의 겨울온순 순환을 지배하는 우랄 블락킹과 시베리아 고기압의 변동을 대표하는 지수들과 매우 높은 상관관계를 보였다. 본 연구는, 따라서, 최근 겨울철 북극 온난화의 경향성과 BO로 대표되는 내부 변동성의 깊은 연관성을 명확히 제시하였다. BO는 최근 급격한 북극 온난화 경향과 상관없이 존재하는 고유한 내부 모드이다(Skeie, 2000). 따라서, 북극의 급격한 온난화가 이 내부 변동 모드에 어떠한 영향을 주어 북반구 대기 순환장과 온도장이 변하는지에 대한 보다 근본적인 연구는 북극 온난화와 더 나아가 유라시아 지역의 겨울 온순 순환을 이해하는 데 매우 중요하다. 향후 모델링과 보다 심화된 분석을 통하여 이 문제를 깊이있게 분석해 보고자 한다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업 CATER 2012-3060(PN13010)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bhatt, U. S., and Coauthors, 2010: Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline. *Earth Interactions*, **14**, 1-20.
- Budikova, D., 2009: Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: A review. *Global and Planet. Change*, **68**, 149-163.
- Cohen, J., and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO, and global warming: How closely related?. *J. Climate*, **18**, 4498-4513.
- \_\_\_\_\_, M. Barlow, and K. Saito, 2009: Decadal fluctuations in planetary wave forcing modulate global warming in late boreal winter. *J. Climate*, **22**, 4418-4426.
- \_\_\_\_\_, 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**.
- Comiso, J. C., C. L. Parkinson, R. Gersten, and L. Stock, 2008: Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys. Res. Lett.*, **35**. doi:10.1029/2007GL031972.
- Corbett, J., D. Lack, J. Winebrake, S. Harder, J. Silberman, and M. Gold, 2010: Arctic shipping emissions inventories and future scenarios. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 9689-9704.
- Dee, D., and Coauthors, 2011: The ERAInterim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Deser, C., R. Tomas, M. Alexander, and D. Lawrence, 2010: The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late twenty-first century. *J. Climate*, **23**, 333-351.
- Francis, J. A., W. Chan, D. J. Leathers, J. R. Miller, and D. E. Veron, 2009: Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic seaice extent. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07503.
- Garfinkel, C. I., D. L. Hartmann, and F. Sassi, 2010: Tropospheric precursors of anomalous Northern Hemisphere stratospheric polar vortices. *J. Climate*, **23**, 3282-3299.
- 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.: Atmos.* (1984-2012), **115**.
- Graversen, R. G., T. Mauritsen, M. Tjernström, E. Källn, and G. Svensson, 2008: Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature*, **451**, 53-56.
- Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo, 2010: Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, **48**, RG4004.
- Holland, M. M., C. M. Bitz, L. Tremblay, and D. A. Bailey, 2008: The role of natural versus forced change in future rapid summer Arctic ice loss. *Arctic sea ice decline: observations, projections, mechanisms, and implications*, 133-150.
- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic seaice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**.
- \_\_\_\_\_, 2009: Influence of low Arctic seaice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**.

- Jaiser, R., K. Dethloff, D. Handorf, A. Rinke, and J. Cohen, 2012: Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A*, **64**.
- \_\_\_\_\_, 2012: Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A*, **64**.
- Jeong, J. H., and C. H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, B. M. Kim, and W. T. Kwon, 2005: Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in east Asia. *J. Geophys. Res.: Atmos. (1984-2012)*, **110**.
- \_\_\_\_\_, B. M. Kim, C. H. Ho, D. Chen, and G. H. Lim, 2006: Stratospheric origin of cold surge occurrence in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **33**.
- \_\_\_\_\_, 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.: Atmos. (1984-2012)*, **116**.
- Kinnard, C., C. M. Zdanowicz, D. A. Fisher, E. Isaksson, A. de Vernal, and L. G. Thompson, 2011: Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature*, **479**, 509-512.
- KMA, 2011: Role of Siberian snow cover on the persistent cold surgeoccurrence in northern winter. Enhancement Project Report, 46 pp.
- Kug, J.-S., F.-F. Jin, J. Park, H.-L. Ren, and I.-S. Kang, 2010: A general rule for synoptic-eddy feedback onto low-frequency flow. *Clim. Dynam.*, **35**, 1011-1026.
- Levitus, S., G. Matishov, D. Seidov, and I. Smolyar, 2009: Barents Sea multidecadal variability. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19604.
- Liu, J., J. A. Curry, H. Wang, M. Song, and R. M. Horton, 2012: Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **109**, 4074-4079.
- Ohashi, M., and H. Tanaka, 2010: Data analysis of recent warming pattern in the Arctic. *SOLA*, **6**, 1-4.
- Overland, J. E., and M. Wang, 2005: The third Arctic climate pattern: 1930s and early 2000s. *Geophys. Res. Lett.*, **32**.
- \_\_\_\_\_, 2010: Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A*, **62**, 1-9.
- Polyakov, I. V., and Coauthors, 2010: Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2743-2756.
- Rayner, N., and Coauthors, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.: Atmos. (1984-2012)*, **108**.
- Rigor, I. G., J. M. Wallace, and R. L. Colony, 2002: Response of sea ice to the Arctic Oscillation. *J. Climate*, **15**, 2648-2663.
- Schweiger, A. J., R. W. Lindsay, S. Vavrus, and J. A. Francis, 2008: Relationships between Arctic sea ice and clouds during autumn. *J. Climate*, **21**, 4799-4810.
- \_\_\_\_\_, 2008: Relationships between Arctic sea ice and clouds during autumn. *J. Climate*, **21**, 4799-4810.
- Screen, J. A., and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337.
- \_\_\_\_\_, 2010: Increasing fallwinter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification. *Geophys. Res. Lett.*, **37**.
- Serreze, M. C., and J. A. Francis, 2006: The Arctic amplification debate. *Climatic Change*, **76**, 241-264.
- \_\_\_\_\_, A. Barrett, J. Stroeve, D. Kindig, and M. Holland, 2009: The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, **3**, 11-19.
- Shimada, K., and Coauthors, 2006: Pacific ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08605.
- Skeie, P., 2000: Meridional flow variability over the Nordic seas in the Arctic Oscillation framework. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2569-2572.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005: Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423-4440.
- Thompson, D. W., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Vavrus, S., D. Waliser, A. Schweiger, and J. Francis, 2009: Simulations of 20th and 21st century Arctic cloud amount in the global climate models assessed in the IPCC AR4. *Clim. Dynam.*, **33**, 1099-1115.
- Wang, L., W. Chen, W. Zhou, J. C. Chan, D. Barriopedro, and R. Huang, 2010: Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate. *Int. J. Climatol.*, **30**, 153-158.
- Zhang, X., A. Sorteberg, J. Zhang, R. Gerdes, and J. C. Comiso, 2008: Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22701.