우리나라 겨울철 기온과 북반구 대기 순환과의 상관성 분석

임소민¹⁾ · 예상욱^{1)*} · 김공래²⁾

¹⁾한양대학교 과학기술학부 해양환경과학과

²⁾(주)코센

(접수: 2012년 1월 6일, 수정: 2012년 2월 14일, 게재확정일: 2012년 2월 27일)

Analysis on the Relationship between the Korean Temperature and the Atmospheric Circulation over the Northern Hemisphere during Winter

So-Min Lim¹⁾, Sang-Wook Yeh^{1)*}, and Gong-Rae Kim²⁾

¹⁾Department of Environmental Marine Sciences, Erica, Hanyang University, Gyeonggi-do 426-791, Korea

²⁾TÜV SÜD KOCEN Ltd., Gyeonggi-do 446-713, Korea

(Received: 6 January 2012, Revised: 14 February 2012, Accepted: 27 February 2012)

Abstract This study investigates the relationship between the Korean temperature and the atmospheric circulation such as Arctic Oscillation, Siberian High and Aleutian Low during the winter (December-January) for the period of 1970-2011. It is found that all indices to represent aforementioned circulations are significantly correlated with Korean winter temperature for the period of 1970 - 2011. There are marked contrasts in such relationship, however, before and after the mid-1980s when a significant regime shift of Korean winter temperature occurred. While Korean winter temperature has a close relationship with Arctic Oscillation after the mid-1980s, its relationship with Siberian High and Aleutian Low is weakened. The composite analysis between a positive and negative phase of Arctic Oscillation before and after the mid-1980s is conducted to examine a recent strengthening of Arctic Oscillation-Korean winter temperature relationship. It is found that the structural changes of low-level wind and the geopotential height at 500 hPa between the two phases of Arctic Oscillation are more effective to influence Korean winter temperature after the mid-1980s. This may induce a close relationship between the Korean winter temperature variability and Arctic Oscillation after the mid-1980s compared to before the mid-1980s.

Keywords: korean winter temperature, atmospheric circulation, arctic oscillation, siberian high, aleutian low

1. 서 론

한반도와 일본, 중국의 겨울철 기온 변동성은 전 지구 기후 시스템의 중요한 구성요소 중 하나인 동아시아 겨울철 몬순 변동성과 밀접한 상관성을 가지고 있다 (Lau and Li, 1984; Ding, 1994; Huang *et al.*, 2003,

2007; Chan and Li, 2004; Chang *et al.*, 2006). 동아시아 겨울철 몬순의 일반적인 지상 기압 배치는 유라시아 대륙의 동쪽에 위치하고 있는 차가운 시베리아 고기압 (Siberian High)과 상대적으로 따뜻한 북태평양 지역의 알류산 저기압 (Aleutian Low)의 동고서저 형태이며 우리나라를 포함하는 동아시아 지역의 겨울철 기온은 시베리아 고기압의 동쪽 및 알류산 저기압의 서쪽 가장자리를 따라 부는 강한 북서 및 북동풍에 의해 크게 영향을 받는다 (Wang and Chen, 2010). 즉 동아시아 겨울철 몬순의 강화와 함께 동반되는 상층

*Corresponding Author: Sang-Wook Yeh, Department of Environmental Marine Sciences, Ansan, Hanyang University, Ansan Kyeonggi-do 426-791, Korea.

Phone : +82-31-400-5532, Fax : +82-31-436-8177

E-mail : swyeh@hanyang.ac.kr

기압골의 강화는 이 지역에 강한 북서풍을 발달시키고 이것으로 인해서 차가운 수평류가 동아시아 지역에 불어 동아시아 지역의 기온을 하강시키는 것으로 알려져 있다 (Jhun and Lee, 2004).

최근 연구 결과에 의하면 우리나라의 기후가 1980년대 중반부터 그 이전과는 다른 기후 체계로 바뀌었으며 (윤용훈, 2003; 한국 기후변화 평가보고서 (백서) 발간 (I), 2009; 이 등, 2011) 특히 겨울철 기온은 1980년대 중반 이후 뚜렷한 상승 경향을 보인 것으로 알려져 있다 (Jung *et al.*, 2002; Fig. 3). 우리나라는 지난 이십 년 동안 그 이전 시기에 비해 상대적으로 따뜻한 겨울철 기온의 특징을 보이고 있는 것으로 나타났다 (Chung and Yoon, 2000) 이와 같은 사실은 우리나라의 겨울철 기온에 영향을 주는 동아시아 겨울철 몬순 (전 등, 2002; 안과 김, 2005), 그리고 더 나아가 동아시아 겨울철 몬순 변동에 영향을 주는 북반구 대기 순환의 변동을 암시하는 것이다. 현재까지는 우리나라의 겨울철 기온 변동과 북반구 대기 순환의 상관성이 최근 어떤 변화를 보이고 있는지에 대한 연구가 많지 않기 때문에 본 연구에서는 지난 40여 년 동안 우리나라 겨울철 기온 변동과 주요 북반구 대기 순환 변동과의 상관성을 조사하였다.

동아시아 겨울철 몬순 변동성은 북반구 대기 순환 중 특히 북극진동 (Arctic Oscillation), 시베리아 고기압 및 알류산 저기압 변동성과 밀접한 상관성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다 (Gong *et al.*, 2001; Wang and Chen, 2010). 북극진동은 겨울철 유라시아 대륙의 지표면 기온과 밀접한 상관성이 있으며 (Thompson and Wallace, 1998) 이 지역 기온 변동성의 약 50% 이상을 설명하는 북반구에서 가장 우세한 대기 변동성이다 (Rigor *et al.*, 2000). 또한 북극진동은 시베리아 고기압의 세기와 반대의 위상을 가지면서 그 세기를 변조시켜 동아시아 겨울철 몬순 변동성에 유의한 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Gong *et al.*, 2001; Jeong and Ho, 2005).

시베리아 고기압은 겨울철 유라시아 대륙의 내부에 중심을 두고 있고 중심 기압의 세기 변동은 유라시아 대륙의 평균 기온과 밀접한 연관성이 있는 것으로 알려져 있으며 그 강도는 20세기 후반에 급격하게 감소하는 경향을 보여주었다 (Gong and Ho, 2002; Panagiotopoulos *et al.*, 2005). 그러나 이는 1990년대 이후 다시 빠르게 회복하는 모습을 보여주고 있어 (Jeong *et al.*, 2011) 시베리아 고기압이 우리나라 겨울철 기온에 미치는 영향이 변하였음을 추측할 수 있다. 알류산 저기압은 시베리아 고기압과 함께 동서 방향 기압경도에 영향을 주어 동아시아 겨울철 몬순 변동성에 영향을 주는데 (Ryoo *et al.*, 2002) 시베리아 고기압의 강도가 강해지고 알류산 저기압이 발달하면

동서방향의 기압경도가 강해지고 이에 따라 북풍의 세기가 세지면서 동아시아 지역의 기온은 하강한다.

우리나라 겨울철 기온 변동과 관련된 북반구 대기 순환에 대한 선행 연구에서 임과 안 (2004)은 우리나라 겨울철 기온의 변동성과 남방진동 및 북극진동, 동아시아 겨울철 몬순과의 상관성을 분석하였고 온난화 경향을 제거한 우리나라 겨울철 기온의 변동성이 북극진동의 위상과 높은 상관성이 있음을 보였다. 특히 Jeong and Ho (2005)와 Park *et al.* (2011)은 북극진동이 음의 위상일 때 동아시아 지역에 한파가 증가한다는 것을 보여주었으며 나아가 북극진동의 위상 차이에 따라 우리나라를 포함하는 동아시아 지역의 한파를 유도하는 역학적 과정이 서로 다를 수 있음을 논의하였다. 특히 최근 연구는 지구 온난화에 기인한 극지방의 지표면 특성 변화가 북극진동의 공간적 구조를 변화시켰음을 지적하였는데 (Zhang *et al.*, 2008) 이와 같은 연구 결과들은 우리나라 겨울철 기온 변동성과 북극진동과의 상관성이 시간에 따라 변할 수 있음을 보여주는 것이다. 또한 김과 안 (2010)은 겨울철에 나타나는 북반구 대기 순환 구조는 겨울철 전체 평균과 12, 1, 2월에 나타나는 양상이 서로 다르다는 것을 발견하고 우리나라 겨울철 기온 변동은 주로 북극진동의 영향을 많이 받을 뿐만 아니라 영향을 주는 구조가 때 달마다 다르게 나타남을 밝혔다. 하지만 앞서서도 언급한 것과 같이 기존 연구들은 우리나라 겨울철 기온에 영향을 주는 대기 순환 구조 및 그 원인에 관한 분석이 주된 내용이었으며 상관성의 변화에 대한 분석은 그리 많지 않았다. 따라서 지난 40여 년 동안 우리나라 겨울철 기온 변동성과 북반구 대기 순환을 나타내는 지수들과의 상관성의 변화를 살펴보는 것은 의미가 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 21개 기상대에서 지난 1970-2011년 동안 관측된 겨울철 월평균 기온 자료를 사용하여 겨울철 기온 변동성과 북반구 대기 순환을 나타내는 여러 지수들과의 상관성의 변화를 확인하고자 하였다. 구체적으로 우리나라 겨울철 기온이 뚜렷한 기후 체계 변화를 겪은 시기를 중심으로 앞서 언급한 지수들과의 상관성이 어떤 변화를 보였는지 살펴보았으며 십 년 이상의 장주기 시간 규모에서 이런 변화들이 어떤 경향성을 보이고 있는지를 조사하였다. 이를 통해 기후 체계 변화 이후 우리나라 겨울철 기온 변동성을 어떤 지수가 잘 설명하고 있는지 제시하였다.

2. 자료 및 분석 방법

1970년부터 2011년까지 우리나라의 21개 지점 지상관측자료를 이용하여 우리나라 겨울철 (12월, 1월)

Fig. 1. Locations of 21 weather stations used in this study. (Sokcho, Chuncheon, Gangneong, Seoul, Incheon, Suwon, Seosan, Cheongju, Daejeon, Chupungnyeong, Pohang, Gunsan, Daegu, Jeonju, Ulsan, Gwangju, Busan, Tongyeong, Mokpo, Yeosu, Jinju).

의 평균 기온과 북반구 대기 순환 지수들과의 관계를 살펴보았다. Fig. 1은 본 연구에서 이용된 21개 지점의 위치를 나타낸 것이다. 분석 기간 (1970-2011)내에 관측 자료가 존재하는 지상관측자료를 최대한 활용하였는데 울릉도와 제주도 그리고 서귀포는 같은 기간 동안에 자료가 존재하나 다른 관측지점들에 비해서 해양의 영향을 많이 받을 것으로 생각되어 제외하였다. 그리고 실제적인 기온 변동에 대해 초점을 맞추었기 때문에 관측자료 내의 선형 경향성은 제거하지 않았다. 또한 이 결과는 선형 경향성을 제거한 결과들과 비교하였을 때 큰 차이를 나타내지 않았다.

이 논문에서 1970년 겨울철은 1970년 12월과 1971년 1월의 평균값을 의미하며 2010년 겨울철은 2010년 12월과 2011년 1월의 평균값을 의미한다. 본 연구에서는 일반적으로 겨울철을 12월, 1월, 2월로 정의하는 것과 다르게 12월과 1월을 겨울철로 정의하였다. 그 이유는 1970-2011년 동안 우리나라 월별 평균기온과 20°N 이북 지역의 500 hPa 지위고도 간의 선형 회귀

Fig. 2. The linear regression coefficients between the normalized temperature in Korea during (a) December, (b) January, (c) February and geopotential height at 500 hPa for the period of 1970/12 - 2011/2. Shading indicates the 90% confidence level. Unit is hPa.

Table. 1. Spatial correlation coefficients between Fig. 2(a) and (b), (a) and (c), and (b) and (c), respectively.

correlation coefficient	December	January	February
December	1	0.90	0.52
January		1	0.55
February			1

분석을 한 결과 (Fig. 2) 12월과 1월에는 우리나라 평균 기온과 상관성을 가지고 있는 북반구 대기 구조가 서로 유사한 반면 2월의 구조는 12월과 1월의 그것과 차이가 있음을 알 수 있다 (Table. 1). 본 연구에서는 우리나라 겨울철 기온 변동과 상관성을 지니는 북반구의 대기 구조가 서로 유사한 12월과 1월을 겨울철로 정의함으로써 우리나라 겨울철 기온 변동에 따른 북반구 대기 순환의 변동을 좀 더 뚜렷하게 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

북반구 대기 순환의 변동을 분석하기 위해서 NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/ National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료의 해면 기압, 동서바람장, 남북바람장, 500 hPa 지위고도를 이용하였으며 이 자료들은 모두 위, 경도 2.5°의 해상도를 가지고 있다. 북극진동은 20°N 이북의 해면 기압의 편차를 경험적 직교함수 (EOF; Empirical Orthogonal Function) 분석에서 첫 번째 모드로 추출되는 기압 변동 패턴이다 (Thompson and Wallace, 1998, 2000). 45°N를 기준으로 중위도 기압이 북극보다 높으면 양의 위상으로 중위도 기압이 북극보다 낮으면 음의 위상으로 나타낸다. 북극진동을 나타내는 북극진동 지수는 National weather service/climate prediction center (http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml) 에서 얻어진 자료를 사용하였다. 시베리아 고기압 지수는 Wu and Wang (2002) 에서 정의한 시베리아 고기압의 중심부를 포함하는 40°-60°N, 80°-120°E 지역의 해면 기압값을 평균하여 사용하였다. 알류산 저기압의 변동을 나타내는 지수는 Trenberth and Hurrell (1994)에서 정의한 북태평양 지수를 사용하였으며 30°-65°N, 160°E-140°W 지역에서 영역 가중 평균된 해면 기압의 평균값으로 정의한다. 우리나라 겨울철 평균 기온과 북반구 대기 순환 지수들과의 상관 계수분석 (Correlation coefficient analysis), 회귀분석, 이동 상관분석을 통해 각 변수들 사이의 상호 관련성의 특성 변화를 분석하였다.

3. 북반구 대기 순환 지수들과의 상관성 변화

Fig. 3은 21개 지상 관측소에서 얻어진 우리나라 겨울철 평균 기온의 시계열을 보인 것이다. 그림에서 볼

Fig. 3. The time series of Korean winter temperature for the period of 1970-2010. Red line is mean temperature before and after 1986 indicating 0.21 and 1.36, respectively. Unit is. The year refers to winter (Dec-Jan) season.**Table. 2.** Correlation coefficients between Korean winter temperature and Arctic Oscillation Index, Siberian High Index and Aleutian Low Index for each period.

correlation coefficient	Arctic Oscillation Index	Siberian High Index	Aleutian Low Index
70/71-10/11	0.43**	-0.52**	0.38*
70/71-85/86	0.19	-0.79**	0.64**
86/87-10/11	0.72**	-0.46*	0.20

*95% confidence level

**99% confidence level

수 있듯이 1986년을 전후로 우리나라는 겨울철 기온의 뚜렷한 기후 체계 변화가 일어났음을 확인할 수 있다. 1970년부터 1985년까지의 겨울철 평균 기온은 0.21°C인 반면에 1986년부터 2010년까지의 겨울철 평균 기온은 1.36°C로 1.15°C가 상승하였다. 두 기간 사이 (1970-1985 그리고 1986-2010)의 평균 기온의 차는 T-검정법을 통해 신뢰도 99%의 범위에서 유의한 차이임을 확인하였다. 1980년대 중반을 경계로 겨울철 기온의 기후 체계 변화는 우리나라 지역뿐만 아니라 동아시아 지역에서도 비슷한 시기에 관측되었다. 예를 들면 Wu *et al.* (2006)은 남중국과 홍콩에서 1987년을 전후로 겨울철 평균 기온이 0.8°C 이상 상승하였음을 보였는데 이와 같은 사실은 겨울철 평균 기온의 온난화 경향이 우리나라를 포함하는 동아시아 지역에서 1980년대 중반 이후 뚜렷하게 나타났음을 보여주는 것이다.

Table. 2는 우리나라 겨울철 기온과 북반구 대기 순환 지수들과의 상관성을 나타낸 것이다. 1970년부터

2010년까지의 전체 분석 기간 동안 우리나라 겨울철 기온 변동성과 북극진동 지수, 시베리아 고기압 지수 및 알류산 저기압 지수의 상관성은 각각 0.43, -0.52, 0.38로 모두 95% 신뢰수준에서 유의하였다. 즉 양의 위상의 북극진동, 약한 시베리아 고기압, 그리고 알류산 저기압의 약화는 우리나라 겨울철 기온의 상승과 연관성이 있다. 그러나 우리나라 겨울철 기온의 뚜렷한 온난화 경향이 관측된 이전 기간과 이후 기간에 우리나라 겨울철 기온과 각 지수들과의 상관성은 상이한 결과를 보였다. 1986년을 기준으로 이전 기간인 1970년부터 1985년까지를 전기로 정하고 이후 기간인 1986년부터 2010년까지를 후기로 정하여 기간별 우리나라 겨울철 기온과 대기 순환 지수들과의 상관성을 분석한 결과 북극진동 지수와의 상관성은 전기에는 유의하지 않았으나 (상관계수: 0.19) 후기에 들어서는 0.72의 매우 유의한 상관성을 갖고 있었다. 그에 반해 시베리아 고기압 지수는 전기에 -0.79의 높은 상관성을 가지고 있었으나 후기에 상관계수값이 -0.46으로 상관성이 감소한 결과를 나타냈다. 또한 알류산 저기압 지수와 우리나라 겨울철 기온의 상관성도 전기에 비해서 후기에 상관성이 감소하였다.

이와 같은 결과는 우리나라 겨울철 기온과 해면기압 사이의 회귀분석 결과에서도 확인할 수 있다 (Fig. 4). Fig. 4(a)는 전기 기간의 우리나라 겨울철 기온과 해면기압 사이의 회귀분석 결과로 우리나라 겨울철 기온이 상승함에 따라 시베리아 고기압 지역에서는 음의 회귀값이 알류산 저기압 지역에서는 양의 회귀값이 나타남을 볼 수 있어 이 시기에 우리나라 겨울철 기온과 시베리아 고기압 및 알류산 저기압의 변동성이 밀접한 상관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 하지만 북극지역에서의 해면기압 구조는 전형적인 북극진동의 그것과는 차이가 있음을 알 수 있다. 이에 반해 후기의 우리나라 겨울철 기온과 해면기압 사이의 회귀분석 결과 (Fig. 4(b))는 전기 (Fig. 4(a))와는 대조적으로 전형적인 북극진동 구조를 보이고 있어 우리나라 겨울철 기온 변동성이 북극진동과 높은 상관성을 가짐을 직접적으로 보여주고 있다. 또한 Fig. 4(b)의 결과는 후기 기간에 우리나라 겨울철 기온 변동성과 시베리아 고기압의 변동성과의 상관성이 전기 기간에 비해 감소하였음을 보여주며 알류산 저기압의 경우는 변동성보다 중심 위치의 변화와 상관성이 있음을 알 수 있다.

우리나라 겨울철 기온과 북반구 대기 순환 지수들과의 상관성 변화를 십년 주기 이상의 장주기 관점에서 좀 더 구체적으로 파악하기 위하여 각 지수들과의 15년 이동 평균 상관계수를 계산하였다 (Fig. 5). 예를 들어 1977년의 값은 1970년부터 1984년까지의 지수들과 우리나라 겨울철 기온과의 상관계수를 의미한다.

Fig. 4. The linear regression coefficients between the normalized Korean winter temperature and sea level pressure (a) before 1986 and (b) after 1986. Shading indicates the 90% confidence level. Unit is hPa.

Table. 2의 결과와 유사하게 1980년대 중반 이후 북극진동 지수와 우리나라 겨울철 기온의 상관성은 더욱 높아지는 것을 볼 수 있으며 (Fig. 5(a)) 그와 반대로 시베리아 고기압의 변동성은 1980년대 중반 이전에는 우리나라 겨울철 기온과 높은 상관성을 가지고 있으나 최근 들어 그 상관성이 낮아 (Fig. 5(b)) 시베리아 고기압의 변동성이 기후 체계 변화 이후인 후기 전체에서는 우리나라의 겨울철 기온과 유의한 상관성을 지녔을지라도 (Table. 2) 그 상관성이 지속적으로 약해지고 있음을 알 수 있다. 즉 우리나라 겨울철 기온에 영향을 미치는 북반구 대기 순환이 과거에는 시베리아 고기압이었다면 1980년대 중반부터는 북극진

Fig. 5. The 15-year running correlation coefficients between Korean winter temperature anomaly and (a) Arctic Oscillation Index, (b) Siberian High Index, and (c) Aleutian Low Index, respectively, for the period of 1970-2010.

동으로 바뀌었음을 보여주는 것이다. 알류산 저기압과 우리나라 겨울철 기온과의 상관성은 장주기 시간 규모에서 특징적인 변화를 발견하기 어렵지만 시베리아 고기압과 유사하게 전기에서 후기로 갈수록 그 상관성이 약해졌음을 확인할 수 있다 (Fig. 5(c)).

이 논문에서는 1980년대 중반 이후 북극진동이 우리나라 겨울철 기온과 밀접한 상관성을 가지는 이유

를 조사하였다. 이를 위해 1980년대 중반 이전과 이후 북극진동의 위상 차이에 따른 해면 기압의 합성도를 제시하였다 (Fig. 6). Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 전기와 후기 기간 동안 북극진동이 양의 위상을 가질 때 해면 기압의 합성도를 나타낸 것이며 Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 북극진동이 음의 위상을 가질 때 해면 기압의 합성도를 보인 것이다. 북극진동의 위상에 따른 해면 기압의 구조는 전기와 후기 기간 사이에 뚜렷한 차이를 가지고 있음을 알 수 있다. 비록 통계적으로 유의하지는 않지만 전기 기간 동안 동아시아 지역의 해면 기압의 편차는 북극진동의 위상과 상관없이 음의 값을 가지고 있는 반면 후기 기간 동안에는 북극진동이 양의 위상일 경우 양의 값을 음의 위상일 경우 음의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 전기 기간 동안은 북극진동의 위상 차이에 따른 동아시아 지역의 해면 기압의 변화가 크지 않아 우리나라 겨울철 기온 또한 북극진동의 위상 차이에 따른 변화가 크지 않은 것으로 사료된다. 반면에 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 동아시아 지역의 해면 기압 편차의 차이는 이 지역에서의 기온 변화의 크기가 큼을 보여주는 것으로, 다시 말해서 북극진동 지수의 변동이 우리나라 겨울철 기온 변동과 높은 상관계수를 가질 수 있음을 보여주는 것이다.

전기와 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 해면 기압 구조의 차이는 공간 상관 계수값을 통해서도 확인할 수 있다. 전기 기간 동안 양의 위상 (Fig. 6(a))과 음의 위상 (Fig. 6(c))의 공간 상관 계수 값은 -0.37 로 작은 값을 가지고 있으나 후기 기간 동안의 그 값은 -0.74 로 전기에 비해 큰 값을 가졌다. 이 결과는 후기로 접어들면서 북극진동의 위상 차이에 따른 해면 기압 구조의 대칭성이 증가하였음을 암시하는 것이다. 즉 전기와 후기 기간 동안 위상 차이에 따른 북극진동의 공간구조 변화가 우리나라 겨울철 기온과의 상관성 변화에 영향을 주었음을 보여주는 것이다.

북극진동의 공간구조 변화가 우리나라 겨울철 기온에 어떻게 영향을 주었는지를 좀 더 자세하게 파악하기 위하여 전기와 후기 기간 동안 각각 북극진동의 위상 차이에 따른 하층 (1000 hPa) 바람장의 차이를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7(a)는 전기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 하층 바람장의 차이를 Fig. 7(b)는 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 하층 바람장의 차이를 보인 것이다. 두 기간 동안 하층 바람장의 차이에서 볼 수 있는 가장 뚜렷한 차이는 북서태평양 지역에서 우리나라로 향하는 동풍 계열의 바람이 전기 기간에 비해 후기 기간 동안 우세하다는 것이다. 즉 후기 기간 동안 북극진동이 양의 위상일 경우 음의 위상일 때보다 북서태평양에서

Fig. 6. Composite maps of sea level pressure anomalies during the positive phase of Arctic Oscillation (a) before 1986 and (b) after 1986. (c) and (d) are the same as (a) and (b), except but the negative phase of Arctic Oscillation. Each composite member is 7, 13, 9 and 12 in order. Shading indicates the 90% confidence level. Unit is hPa and contour interval is 0.5 hPa. A positive (negative) phase of Arctic Oscillation indicates that its index is above (below) zero.

우리나라로 이류하는 동풍 계열의 바람이 우세하였다는 것을 의미한다. 그와 비교하여 전기 기간은 동일한 지역에서 우리나라로 불어들어 오는 바람장의 차이가 미약한 편이다. 겨울철 해양은 육지에 비해 상대적으로 따뜻하기 때문에 북서태평양 지역에서 우리나라로 이류하는 동풍 계열의 바람은 우리나라 겨울철 기온의 상승을 유도하였을 것으로 사료된다. 그럼으로 제시하지는 않았지만 북극진동의 위상 차이에 따른 북서태평양 표층온도 차이는 전기에 비해 후기에 뚜렷한 양의 편차가 나타나 후기에 이 지역에서의 동풍 계열 바람의 이류가 어느 정도 우리나라 겨울철 기온에 영향을 주었음을 짐작할 수 있다. 따라서 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이는 우리나라의 겨울

울철 기온의 차이를 야기할 수 있는 요소를 가지고 있음을 알 수 있다. 전기와 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 바람장의 차이 역시 Fig. 6에서 논의하였듯이 두 시기의 북극진동의 공간구조 변화에 기인한 것으로 생각할 수 있으며 이러한 변화가 북극진동과 우리나라 겨울철 기온과의 상관성 변화에 영향을 주었음을 생각할 수 있다.

Fig. 7의 분석과 유사하게 Fig. 8에 전기와 후기 기간 동안의 북극진동 위상 차이에 따른 500 hPa 지위 고도의 차이를 제시하였다. 500 hPa 지위 고도의 차이를 분석한 이유는 겨울철 우리나라 주변 지역의 상층에는 기후학적인 상층 기압골이 위치하고 있으며 (Wang *et al.*, 2009a) 제트 기류의 중심이 위치하고 있기 때

Fig. 7. The differences of low-level wind at 1000 hPa between the positive and the negative phase of Arctic Oscillation (a) before 1986 and (b) after 1986. Shading indicates the 90% confidence level.

문이다 (Lau and Li, 1984; Boyle, 1986). 결국 500 hPa 지위고도의 변동은 기압골의 활동 및 그에 따른 제트 기류의 움직임과 연관 지을 수 있으며 이런 움직임은 고위도 지역의 차가운 공기를 우리나라로 유입시키는 중요한 기작이 된다 (Zhang *et al.*, 1997; Jeong and Ho, 2005). Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각 전기 및 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 500 hPa 지위고도 차이를 보인 것으로 그림에서 확인할 수 있듯이 우리나라를 포함하는 동아시아 지역에서 북극진동의 위상 차이에 따른 500 hPa 지위고도 차이는 후기 기간 동안에 더 크게 나타났다. Lim and Yeh (Recent changes in the relationship between various East Asian Monsoon indices and temperature during winter, 2012)에 의하면 우리나라 겨울철 기온의 변동성과 밀접한 상관성을 가지는 500 hPa 지위고도는 Cui and Sun (1999)에서 제시된 35°-40°N, 110°-130°E (Fig. 8의 사각형) 지역의 편차값이다. 이 지역에서 전기 기간 동안의 북극진동 위상 차이에 따른 500 hPa 지위고도 편차값은 3.8 m 인데 비하여 후기 기간 동안의 500 hPa 지위고도 편차값은 17.9 m 로 네 배 이상의

Fig. 8. (a) and (b) is the same as in Fig. 7(a) and 7(b) except but the geopotential height at 500 hPa. Box shown in figure represents the region to define the East Asian Winter Monsoon Index by Cui and Sun (1999). Shading indicates the 90% confidence level. Unit is hPa.

큰 차이를 보였다. 즉 후기 기간 동안 우리나라 겨울철 기온과 밀접한 상관성이 있는 지역에서의 북극진동 위상 차이에 따른 500 hPa 지위고도의 변화가 전기 기간보다 매우 크게 나타난 것이다. 따라서 후기 기간 동안 북극진동 위상 차이에 따른 동아시아 지역의 500 hPa 지위고도장의 뚜렷한 변동은 우리나라 겨울철 기온의 변동에 직접적인 영향을 주었을 것으로 생각된다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 1970년부터 2011년까지 42년간의 우리나라 겨울철 평균 기온 변동과 관련된 북반구 대기 순환을 나타내는 지수들인 북극진동 지수, 시베리아 고기압 지수, 알류산 지수와 상관성 변화를 확인하였다.

우리나라 겨울철 평균 기온은 1986년 전후로 약 1.15°C 가 상승하는 기후 체계 변화가 있었고 이 시기를 기준으로 전기 (1986년 이전)와 후기 (1986년 이후) 기간 동안 북반구 대기 순환 지수들과의 상관성의 변화를 살펴보았다. 그 결과 전기와 후기 기간 동안 북반구 대기 순환 지수들과 우리나라 겨울철 평균 기온과의 상관성이 크게 변한 것으로 나타났다. 북극진동은 전기보다 후기 기간에 우리나라 겨울철 기온과의 상관성이 크게 증가하였으나 시베리아 고기압과 알류산 저기압은 그 상관성이 크게 감소하였다. 이와 같은 경향은 우리나라 겨울철 기온과 관련된 해면 기압 구조의 회귀분석 결과와 각 지수들과의 15년 이동 평균 상관관계 분석에서도 동일하게 나타났다. 이를 통해 우리나라 겨울철 기온 변동에 주요하게 작용하는 북반구 대기 순환이 시베리아 고기압과 알류산 저기압에서 1980년대 중반 이후 북극진동으로 바뀌었음을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 북극진동, 시베리아 고기압, 알류산 저기압은 수십 년 주기의 변동성을 가지고 있다고 알려져 있다 (Trenberth and Hurrell, 1994; Kerr, 1999; Overland *et al.*, 1999; Thompson *et al.*, 2000; Jeong *et al.*, 2011). 따라서 선형 경향성을 제거하여 같은 분석을 실시한 결과 선형 경향성을 제거하지 않은 경우와 유사한 결과를 나타냈다.

본 논문에서는 북극진동과 우리나라 겨울철 기온과의 상관성의 변화 원인을 근본적으로 전기와 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이에 따른 공간구조의 변화에 기인한 것으로 제시하였다. 북극진동의 위상 차이에 따른 해면 기압 구조의 대칭성이 전기에 비해 후기 기간 동안 크게 증가하였음을 알 수 있었는데 이와 같은 대칭성의 증가는 북극진동의 위상 차이에 따른 동아시아 지역의 겨울철 평균 해면 기압의 구조의 차이를 가져왔다. 예를 들면 비록 통계적으로 유의하지는 않지만 전기 기간 동안은 위상의 차이에 관계없이 동아시아 지역에서 해면 기압은 음의 편차를 가지고 있는 반면에 후기 기간 동안은 대칭성이 증가하여 양의 위상일 경우에는 양의 편차값을 음의 위상일 경우에는 음의 편차값을 가지고 있었다. 이를 통해 후기 기간 동안 북극진동의 위상 차이가 우리나라 겨울철 기온의 차이를 가져옴으로써 그 상관성이 증가하게 되었음을 알 수 있었다.

북극진동의 위상 차이에 따른 공간구조의 변화는

전기와 후기 기간 동안의 하층 바람장의 차이에도 변화를 가져 왔다. 후기 기간 동안에는 전기에 비해 북극진동의 위상 차이에 따라 북서태평양 지역 표층 온도가 뚜렷한 차이를 보였으며 이때 북서태평양 지역에서 우리나라로 향하는 동풍 계열 바람의 세기 변화가 전기에 비해 우세함을 확인하였다. 즉 전기 기간과 비교하여 후기 기간 동안 온난한 동풍 계열 바람 변동이 북극진동의 위상 차이에 따라 효과적으로 우리나라 겨울철 기온 변동에 영향을 주었을 것으로 추측할 수 있었다. 또한 우리나라 겨울철 기온 변동과 높은 상관성을 가지고 있다고 알려져 있는 동아시아 지역의 500 hPa 지위고도 평균값도 역시 후기 기간 동안 위상 차이에 따라 전기에 비해 큰 변동폭을 가지고 있음을 확인 할 수 있었다. 위상 차이에 따른 상층 지위고도 편차의 큰 변동은 북극진동이 후기 기간 동안 우리나라 겨울철 기온에 민감하게 작용하였음을 보여 주는 것이다. 이와 같이 위상 차이에 따른 북극진동의 공간구조의 변화가 1980년대 중반 이후 북극진동이 우리나라 겨울철 기온 변화에 효과적으로 영향을 줄 수 있었음을 확인 할 수 있었다.

Zhang *et al.* (2008)은 최근에 북극진동의 공간구조가 변하였음을 밝혔으며 이러한 변화는 북극 해빙 면적의 급격한 감소와 연관된 것이라고 지적하였다. 이와 같은 북극진동의 공간구조의 변화와 더불어 Jeong *et al.* (2011)에서는 최근 북극진동과 그리고 북극진동과 선형적인 관련성을 가진 시베리아 고기압 변동성 간의 역학적 상관성이 강화되었다고 밝혔다. 그럼에도 불구하고 시베리아 고기압 지수와 북극진동 지수의 15년 이동 상관분석 결과 (그림 미제시)는 1990년대 이후 두 변동성의 상관성이 통계적으로 무의미함을 보였다. 이와 같은 결과는 Jeong *et al.* (2011)의 결과에 비추어 볼 때 최근 시베리아 고기압 변동성과 북극진동과 선형적/비선형적 관련성을 가진 시베리아 고기압 변동성이 서로 다른 상관성을 보이고 있음을 암시하는 것이다. 나아가 북극진동이 시베리아 고기압의 변조를 통해 동아시아 겨울철 몬순 변동성에 유의한 영향을 주고 있다는 기존의 연구 결과와는 다른 물리적 영향을 동아시아 겨울철 몬순 변동성에 주고 있다는 사실을 추측할 수 있다. 본 논문에서는 북극진동의 위상 차이에 따른 해면 기압 구조의 대칭성이 전기에 비해 후기 기간에 증가하였음을 제시하였으나 대체로 우리나라 주변 지역에서는 통계적으로 크게 유의하지 않은 모습을 나타내었다. 따라서 향후에는 우리나라 주변 지역에서 북극진동의 위상 차이에 따른 해면 기압 구조의 변화가 어떻게 우리나라의 겨울철 기온 변동에 영향을 주는지에 대한 역학적 원인 분석이 필요할 것이며 또한 북극진동, 시베리아 고기압 및 알류산 저기압이 어떠한 물리적인 원인에 의해

변화하고 있는지에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발관리단 (CATER-2012-3041)의 지원으로 수행되었습니다. 세밀한 심사로 논문의 질을 높여주신 두 분 심사자님들에게 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김해정, 안중배, 2010: 한반도 겨울철 기온 변동과 관계된 대규모 대기 순환에 관한 연구. *기후연구*, **5(2)**, 118-130.
- 안중배, 김해정, 2005: 대규모 순환 패턴과 부산지방 기온 및 강수의 상관성 분석. *한국기상학회지*, **41**, 1101-1110.
- 윤용훈, 2003: 20세기 한반도 주변의 해수면과 기온에 대한 기후 변동성, 이학박사 학위논문, 서울대학교, 194pp.
- 이경미, 백희정, 조천호, 권원태, 2011: 한국의 최근 10년의 기온과 강수 변화. *국토지리학회지*, **45(2)**, 237-248.
- 임은순, 안중배, 2004: 한반도 겨울철 기온 변동과 대규모 순환지수와의 상관성 분석. *한국기상학회지*, **40(4)**, 441-452.
- 전종갑, 이은정, Bin Wang, 안순일, 2002: 동아시아 겨울몬순 지수를 이용한 겨울몬순 특성 분석. *대기*, 103-106.
- 환경부 국립환경과학원, 2009: *한국 기후변화 평가보고서(백서) 발간(I)*
- Boyle, J. S., 1986: Comparison of the synoptic conditions in midlatitudes accompanying cold surges over eastern Asia for the months of December 1974 and 1978. Part I: Monthly mean fields and individual events. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 903-918.
- Chan, J. C. L., and C. Y. Li, 2004: The East Asia winter monsoon. *East Asian Monsoon*, Chang, C.P., Ed., World Scientific Publishing Co. Pet. Ltd., 54-106.
- Chang, C. P., Z. Wang, and H. Hendon, 2006: The Asian winter monsoon. *The Asian Monsoon*, Wang, B., Ed., Praxis, Berlin, 89-127.
- Chung, Y. S., and M. B. Yoon, 2000: Interpretation of recent temperature and precipitation trends observed in Korea. *Theor. Appl. Climatol.*, **67**, 171-180.
- Cui, X. P., and Z. B. Sun, 1999: East Asian winter monsoon index and its variation analysis. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, **22**, 321-325. (in Chinese)
- Ding, Y. H., 1994: *Monsoon over China*. Kluwer Academic Publishers, 420pp.
- Gong, D. Y., S. W. Wang, and J. H. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **28(10)**, 2073-2076.
- _____, and C. H. Ho, 2002: The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, **72**, 1-9.
- Huang, R. H., L. T. Zhou, and W. Chen, 2003: The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, **20(1)**, 55-69.
- _____, J. L. Chen, and G. Huang, 2007: Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv. Atmos. Sci.*, **24(6)**, 993-1023.
- 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**, L14704.
- _____, 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**, D23102.
- Jung, H. S., Y. G. Choi, J. H. Oh, and G. H. Lim, 2002: Recent trend in temperature and precipitation over south Korea. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1327-1337.
- Jhun, J. G., and E. J. Lee, 2004: A new East Asian Winter Monsoon Index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Clim.*, **17**, 711-726.
- Kerr, R. A., 1999: A new force in high-latitude climate. *Science*, **284**, 241-242.
- Lau, K. M., and M. T. Li, 1984: The monsoon of East Asia and its global associations-A survey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **65**, 114-125.
- Overland, J. E., J. M. Adams, and N. A. Bond, 1999: Decadal variability of the Aleutian low and its relation to high-latitude circulation. *J. Clim.*, **12**, 1542-1548.
- Panagiotopoulos, F., M. Shahgedanova, A. Hannachi, and D. B. Stephenson, 2005: Observed trends and teleconnections of the Siberian High: A recently declining center of action. *J. Clim.*, **18(9)**, 1411-1422.
- Park, T. W., and C. H. Ho, 2011: Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over east Asia. *J. Clim.*, **24**, 68-83.
- Rigor, I. G., R. L. Colony, and S. Martin, 2000: Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-97. *J. Clim.*, **13(5)**, 896-914.
- Ryoo, S. B., J. G. Jhun, W. T. Kwon, and S. K. Min, 2002: Climatological aspects of warm and cold winters in

- south Korea. *Korea Journal of Atmospheric Sciences*, **5**, 29-37.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25(9)**, 1297-1300.
- _____, _____, 2000: Annual modes in the extratropical circulation, part: Month-to-month variability, *J. Clim.*, **13**, 1000-1016.
- _____, _____, and G. C. Hegerl, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part : Trends. *J. Clim.*, **13**, 1018-1036.
- Trenberth, K. E., and J. W. Herrell, 1994: Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dynamics*, **9**, 303-319.
- Wang, L., and W. Chen, 2010: How well do existing indices measure the strength of the East Asian Winter Monsoon? *Adv. Atmos. Sci.*, **27(4)**, 855-870.
- _____, _____, W. Zhou, and R. Huang, 2009a: Interannual variations of east Asian trough axis at 500 hPa and its association with the east Asian winter monsoon pathway. *J. Clim.*, **22**, 600-614.
- Wu, B., and J. Wang, 2002: Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian Winter Monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, **29(19)**, 1897.
- Wu, M. C., Y. K. Leung, and W. L. Chang, 2006: Relationship between winter temperature in Hong Kong and East Asian winter monsoon, *HongKong Observatory*.
- 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.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the east Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.