우리나라 겨울철 기온의 계절 내 평균 및 극한현상의 비대칭적 변화

최광용

제주대학교 지리교육전공

(2015년 2월 25일 접수, 2015년 6월 30일 수정, 2015년 6월 30일 게재 확정)

Asymmetric Changes in Intra-seasonal Means and Extreme Events of Winter Temperature in the Republic of Korea

Gwangyong Choi

Major of Geography Education, Jeju National University

(Received 25 February 2015, Revised 30 June 2015, Accepted 30 June 2015)

Abstract : The purpose of this study is to characterize long-term (1973-2012) changes in intra-seasonal temperature and extreme low temperature events in winter observed at 61 weather stations in the Republic of Korea and their associations with changes in atmospheric circulation patterns around East Asia. Maps of long-term linear trends clearly show that both temperature means and extreme events in Korea have asymmetrically changed between early winter and late winter. In early winter, changes with statistical significance are less observable, while in late winter reductions in low extreme temperature events as well as increases in temperatures, particularly after mid-1980s, are obviously observed across the study region. Comparisons of tropospheric synoptic climatic fields before and after the mid-1980s demonstrate that in early winter of recent decades, active meridional circulation from the Arctic appeared in western Eurasia and Bering sea, while in late winter, zonal circulation around East Asia associated with positive Arctic Oscillation-like patterns prevailed. These results indicate that asymmetric changes between early and late winter temperatures in Korea are associated with intra-seasonally inconsistent atmospheric circulation patterns around East Asia.

Key Words : winter temperature, extreme temperature events, asymmetric changes, atmospheric circulation, Republic of Korea

주요어 : 겨울철 기온, 극한기온현상, 비대칭적 변화, 대기순환, 남한

1. 서론

최근 기후변화의 패턴은 시·공간적으로 상이하
여 기온 평균값 및 극한현상의 변화도 계절에 따

라 양상과 강도가 비대칭적으로 나타나고 있다
(IPCC, 2012; 2013). 우리나라의 경우에도 여름철
에는 강수량의 증가로 기온변화가 뚜렷하지 않으
나, 겨울철에는 한반도 전역에 걸쳐 기온상승 경

향이 뚜렷하게 나타나고 있다(Choi *et al.*, 2008). 극한기후현상의 경우에도 여름철 주간 고온극한 현상은 다소 약하게 증가하지만, 겨울철 야간 저온극한현상은 뚜렷하게 감소하는 비대칭적인 패턴을 보이고 있다(Choi *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2013; Choi, 2014). 이러한 계절에 따른 기온의 평균과 극한현상의 비대칭적인 변화 경향은 우리나라의 식주 생활에도 많은 영향을 미치고 있다. 계절 간 상이한 기온변화율은 에너지 사용에 있어서 겨울철 난방비보다는 여름철 냉방비 사용량을 더욱 증가시킬 것으로 전망된다(Kim and Suh, 2006; Lim *et al.*, 2008).

겨울철 온난화에 의해 20세기 중반 이후 우리나라에서도 겨울철 극한저온현상이 감소하는 추세가 전국에 걸쳐 뚜렷하게 나타났다(Choi and Park, 2010; Choi, 2014). 그러나 2000년대 중반 이후에는 우리나라를 포함한 동아시아에서는 이에 역행하여 극심한 한파나 대설이 발생하는 사례가 자주 나타나고 있다. 가령, 1970년대 이래 우리나라 12월 기온이 가장 낮았던 해는 2005년, 1월 기온이 가장 낮았던 해는 2011년이다. 이와 같이 온난화 추세 속에서도 겨울철에 불규칙하게 발생하는 극한저온현상은 우리나라가 속한 동아시아 지역 뿐만 아니라 유럽, 북미 지역에도 큰 피해를 가져왔다(Cohen *et al.*, 2014). 가령, 미국에서는 2014년 1월에 극소용돌이의 남하현상으로 전례 없는 한파와 폭설로 중부의 도시 기능이 마비되기도 하였다(Ballinger *et al.*, 2014). 이러한 저온현상 기록들을 살펴보면 연도마다 겨울철 내에서 그 시기가 상이하여 기후변화 측면에서 겨울철 내에서도 기온의 평균 및 극한현상의 변화율의 차이가 나타났을 것으로 짐작된다. 그러나 지금까지 대부분의 겨울철 기온 또는 극한기온현상 변화에 관한 연구는 연 전체 또는 계절별로만 이루어져 왔다. 일부 연구(Park, 2011; Moon *et al.*, 2014)에서는 20세기 후

반 이후 우리나라 겨울철 계절 내 시기별 기온 아노말리 패턴을 분석하였으나, 극한저온현상 변화에는 어떤 시기별 차이가 존재하는지는 밝혀진 바가 없다.

2000년대 중반에 들어서 1990년대 이후 뚜렷하게 나타난 온난화에 역행하는 겨울철 극한저온현상 또는 대설현상이 중위도에 자주 발생하는 원인에 대해서 최근에 활발하게 논의되고 있다. 극지방 해빙에 의한 최근에 극순환 변동의 영향이 언급되고 있기는 하지만(Francis and Vavrus, 2012; Tang *et al.*, 2013a; 2013b; Cohen *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2014; Mori *et al.*, 2014; Sato *et al.*, 2014), 그 요인에 대해서는 아직 불분명한 점들이 많다(Gramling, 2015). 지금까지 동아시아 겨울철 기온 변동이 시베리아 고기압의 강도(Cohen *et al.*, 2001; Gong and Ho, 2002; Heo and Lee, 2006; Chang and Lu, 2012; Choi and Kim, 2015), 북극 진동(Arctic Oscillation)의 위상(Gong *et al.*, 2001; Wu and Wang, 2002; Gong and Ho, 2002; Jeong and Ho, 2005; Takaya and Nakamura, 2005; Park *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2012; Woo *et al.*, 2012) 등의 대기순환 시스템들의 변동과 관련성이 있다는 의견들이 제시되어져 왔다. 그러나 대부분의 기존 연구들은 기후변동적 관점에서 한반도를 포함한 동아시아 지역의 이상난동 또는 이상한동 발생연도의 합성 종관장의 특징을 밝혔다. 반면 장기간의 기후변화 관점에서 겨울철 계절 내 시기별 기온 평균 또는 극한저온현상 변화 추세와 이와 관련된 대기순환 체계의 변화를 밝힌 연구 결과는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 최근 40년 동안(1973~2012) 우리나라 61개 관측지점의 일별 기온 관측자료를 분석하여 겨울철 계절 내 기온 및 극한기온현상의 변화 양상을 세부적으로 분석하고, 이와 관련된 대기순환장에 나타난 변화 특징을 밝히고자 한다.

2. 연구 자료 및 연구 방법

본 연구에서는 우리나라 기상청 산하 기상관측지점 수가 늘어난 시점을 고려하여 최근 40년(1973~2012) 동안 61개 관측지점의 기상학적 겨울철(12~2월) 일최고기온 및 일최저기온 자료를 분석하였다(Figure 1). 우선 우리나라 평균적인 일최고기온과 일최저기온의 일별 변화 정도를 정량화하기 위해 연구기간 동안 61개 지점 평균 일최고기온 및 일최저기온 자료를 산출하였다. 이를 바탕으로 40년간 겨울철(12월 1일~2월 28일) 날짜별 우리나라 평균 기온의 시계열에 나타난 일차 추세선의 기울기 값을 ‘ $^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ ’으로 환산한 겨울철 계절 내 기온 변화율을 산출하였다. 또한, 세계기상기구 산하 극한기후연구 그룹(CCI/CLIVAR/

JComm Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)에서 널리 사용되어 온 겨울철 날짜별 일최고기온 및 일최저기온의 장기 간 평균 상대적 임계치 기준(10퍼센타일) 한랭일(cool day), 한랭야(cool night) 등 극한저온일의 시계열에 나타난 일차 추세선을 ‘일/10년’으로 환산하여 산출하였다. 이때 겨울철 날짜별 10퍼센타일 임계치 산출시 필요한 장기간 평균은 이전 연구결과들(Choi *et al.*, 2008; Choi, 2014)과 비교를 용이하게 하기 위해 1973~2000년의 값을 기준으로 하였다. 이러한 일최고기온, 일최저기온, 한랭일, 한랭야의 시계열에 나타난 일차 추세선들의 통계적 유의성을 검정하기 위해서 비모수검정법의 하나인 Kendall’s tau test를 수행하였다. 이때 p-value가 0.05 이하인 경우(95% 이상의 통계적 유의수준)를 나타내는 추세를 통계적으로 유의미한 변화로 간주하였다.

이와 같이 산출된 61개 관측지점 자료를 평균하여 우리나라 겨울철 날짜별 기온 평균 및 극한기온현상의 변화율이 큰 차이를 보이는 시점을 파악하여 시기별로 세분하여 그 변화율을 상호 비교하였다. 우선 겨울철 일별 기온 변화율이 가장 큰 차이를 보이는 날짜를 선정하기 위해 1일씩 이동시키면서 일최고기온과 일최저기온 모두 Mann-Whitney 검정 시 통계적 유의수준이 가장 높은 경우(99% 이상의 통계적 유의수준)를 선택하였다. Mann-Whitney 검정법은 비모수검정법의 하나로 두 자료 집단 간의 차이가 통계적으로 유의미한지를 판별한다(Mann and Whitney, 1947). 같은 방법으로 61개 지점별로도 겨울철 각 시기별 평균 기온 및 극한기온현상의 시계열에 나타난 변화율과 그 통계적 유의성을 산출한 후 이 자료를 바탕으로 겨울철 전반기와 후반기의 일최고기온 및 일최저기온의 변화 분포도를 작성하였다. 또한 장기간 기후변화 맥락에서 연구기간 동안 뚜렷한 변화를

Figure 1. Locations of 61 weather stations (1973-2012) used in this study.

보인 시점을 나누어 겨울철 내 구분된 시기별 기온 평균 및 극한기온현상의 시공간적 변화 양상과 그 규모를 비교 분석하였다. 이를 위해 1년 단위로 이동시키면서 산출한 Mann-Whitney 검정 통계치를 기준으로 세부적으로 장기간 추세에서 뚜렷한 변화 양상이 나타나는 연도를 산출하였다.

그 후, 이와 같이 선정된 연도를 기준으로 전후반기 20년 단위 전반기(P1)와 후반기(P2) 두 기간의 평균적인 겨울철 각 시기별 대류권 대기순환의 차이를 비교 분석하였다. 이러한 기간설정은 지상 기온 관측기간과 비교하여 차이가 있지만 주요한 연구결과에는 영향을 미치지 않기 때문에 동일 기간으로 설정하였다. 이 두 시기의 겨울철 한파의 발생 시 찬 기류의 이동을 초래하는 대류권 하층(850hPa)과 반구 규모의 극소용돌이와 그 주변을 감싸는 상층한대제트가 뚜렷하게 나타나는 대류권 상층(300hPa)의 종관 기후 패턴을 비교 분석하였다. 세부적으로 우리나라에서 기온 평균 및 극한기온현상의 변화율에 차이를 보이는 겨울철 계절을 각 기간별로 나누어 P2기에서 P1기 종관요소들의 평균값을 뺀 값을 산출하여 지도화 하였다. 이러한 종관장 분석에는 NCEP-NCAR Reanalysis I 일별 지오폠펅셜 고도, 기온, 바람 자료가 사용되었다(Kalney *et al.*, 1996). 850hPa의 지오폠펅셜 고도, 기온, 바람의 차이를 지도화 하여 중첩하여 그린 후 이를 비교 분석하였다. 또한 대류권 상층제트 기류의 변화 양상을 살펴보기 위해 300hPa의 지오폠펅셜고도 및 바람벡터장의 차이를 같은 방법으로 산출하여 비교 분석하였다. 이러한 종관장을 그릴 때 바람의 경우에는 동서 바람 성분(U) 및 남북 바람 성분(V) 자료를 바탕으로 두 기간의 평균 풍속의 차(ΔWS ; Eq. 1)와 북동남서 방향을 각각 0° , 90° , 180° , 270° 로 나타내는 풍향의 차(ΔWD ; Eq. 2)를 산출하여 합성한 벡터(화살표)로 표출하였다.

$$\Delta WS = \sqrt{(U_{p2} - U_{p1})^2 + (V_{p2} - V_{p1})^2} \quad \text{---Eq.1}$$

$$\Delta WD = 270 - (\text{atan2}((V_{p2} - V_{p1}), (U_{p2} - U_{p1})) \times 180/\pi) \quad \text{---Eq.2}$$

3. 결과 및 고찰

1) 겨울철 계절 내 기온 평균 및 극한기온현상 변화 추세

최근 40년 동안(1973~2012) 겨울철(12~2월) 일별 우리나라 전체 61개 지점 평균적인 기온의 일차 추세선에서 산출한 변화율을 살펴보면, 온난화 경향이 겨울철 전반기에는 뚜렷하지 않고, 후반기에는 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있다(Figure 2). Mann-Whitney 통계 검정결과에 따르면 1월 13일을 기점으로 전반기(12월 1일~1월 12일)와 후반기(1월 13일~2월 28일) 간에 차이가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 일최고기온의 겨울철 전반기 동안의 추세는 대체로 통계적 유의성도 매우 낮고, 변화율도 $\pm 0.5^\circ\text{C}/10\text{년}$ 이내로 뚜렷하지 않지만, 후반기 동안의 변화율은 최대 $+1.5^\circ\text{C}/10\text{년}$ 으로 대부분 온난화 추세를 나타낸다. 겨울철 후반기 일최고기온의 경우 일부 날짜들의 기온변화율은 삼한사온과 같은 변동주기가 연도별로 정확하게 일치하지 않음에도 불구하고 95% 이상의 통계적 유의성을 나타낸다(Figure 2a). 또한 일별 일최고기온의 변화율의 평균값을 산출해 보면 겨울철 전반기에는 $0.0^\circ\text{C}/10\text{년}$ 이며, 후반기의 경우에는 $+0.5^\circ\text{C}/10\text{년}$ 을 나타낸다. 일최저기온의 경우에도 유사하게 겨울철 전반기에는 온난화 경향이 뚜렷하지 않고, 후반기에는 대체로 온난화율이 양(+)의 값을 나타내고 있다. 전반기와 후반기의 일최저기온 일별 기온변화율의 평균은 일최고기온의 경우와 유사하나, 특정일의 경우에는 일최저기온의 변화율이 더 높게 나타났다(Figure 2b). 가령, 1

Figure 2. Intra-seasonal variations of long-term (1973~2012) linear trends of winter (DJF) daily maximum (a) and minimum (b) temperatures averaged across 61 weather stations in the Republic of Korea. Filled (Open) symbols represent statistically-significant (insignificant) trends at the 95% level according to Kendall's tau test.

월 19일의 일최고기온은 연구기간 동안 $+2.0^{\circ}\text{C}/10$ 년의 높은 변화율을 나타낸다. 이러한 결과들은 겨울철 기온은 전반기에는 변화가 뚜렷하지 않으나, 후반기에는 뚜렷하게 상승하는 비대칭적 변화 양상을 보임을 알 수 있다.

겨울철 두 시기의 61개 관측지점별 일최고기온과 일최저기온 평균의 장기간 시계열에 나타난 변화를 분포도를 살펴보면, 이러한 겨울철 계절 내 비대칭적 기온변화 양상은 특정 지역에 국한되는 현상이 아니라 우리나라 전반에 걸쳐 나타나는 패턴임을 알 수 있다(Figure 3). 일최저기온과 일최고기온 모두 겨울철 전반기에는 통계적 유의성을 지닌 관측지점의 수가 거의 없지만, 후반기에는 대부분의 관측지점에서 통계적 유의성을 지닌 뚜렷한 상승경향을 나타냈다. 겨울철 전반기 일최고기온의 변화율 분포를 살펴보면, 상승하는 추세를 나타내는 관측소의 수가 하강하는 추세를 나타내는 관측소의 수보다 많았지만, 대부분의 관측지점에서 통계적 유의성은 낮게 나타났다(Figure 3a). 목포 등 일부 관측지점에서는 겨울철 전반기 일최고기온이 $-0.42^{\circ}\text{C}/10$ 년으로 통계적으로 유

의미하게 하강하는 추세가 나타났고, 합천에서는 $+0.44^{\circ}\text{C}/10$ 년의 비율로 통계적 유의성을 지닌 상승 추세가 나타났지만 이는 국지적인 변화에 속한다. 대조적으로 겨울철 후반기에는 목포, 영덕, 문경, 고흥, 남해를 제외한 우리나라 대부분의 관측지점에서 일최고기온 상승 추세가 나타났다(Figure 3b). 통계적 유의성이 95% 이하인 이들 관측지점의 경우에도 목포를 제외하면 모두 상승하는 추세를 보인다. 통계적 유의성을 지닌 전체 관측지점 중 원주에서는 겨울철 후반기 일최고기온 증가율이 $+0.92^{\circ}\text{C}/10$ 년에 달하기도 하였다.

일최저기온의 경우에도 겨울철 전반기에는 대부분의 관측지점에서 통계적 유의성을 보이지 않았고, 증감 추세가 공간적으로 일관되는 패턴도 나타나지 않았다(Figure 3c). 청주, 대구, 제주, 서귀포 등 일부지점에서만 통계적 유의성을 갖는 상승 추세를 보였다. 대조적으로 겨울철 후반기에는 전체 61개 중 65% 이상의 관측지점에서 일최저기온이 통계적 유의성을 갖는 상승 추세가 나타났다(Figure 3d). 심지어 95% 이하의 통계적 유의성을 보이는 관측지점들의 경우에도 상승하는 추세를

Figure 3. Long-term (1973~2012) linear trends ($^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) of early winter (December 1~January 12; left panels) and late winter (January 13~February 28; right panels) averages of daily maximum (upper panels) and minimum (bottom panels) temperature at 61 stations in the Republic of Korea. Filled (Open) symbols represent statistically-significant (insignificant) trends at the 95% level according to Kendall's tau test.

나타났다. 대체로 겨울철 후반기 일최저기온의 상승률은 일최고기온의 상승률보다 높게 나타났다. 가령, 61개 관측지점 중 겨울철 후반기 일최저기온 상승률은 원주에서 $+1.20^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 으로 가장 높게 나타났다.

이러한 겨울철 전반기와 후반기 사이에 나타나는 비대칭적 변화 양상은 기온 평균뿐만 아니라 일최고기온과 일최저기온이 10퍼센타일 이하인 한랭일과 한랭야 등의 극한저온현상의 발생빈도에도 나타났다(Figure 4). 겨울철 전반기 주간 극한저온현상인 한랭일의 발생빈도가 통계적 유의성을 가지고 감소하는 추세는 함천($-1.9\text{일}/10\text{년}$), 구미($-1.4\text{일}/10\text{년}$)에서 나타나고, 증가하는 추세는 목포($+1.9\text{일}/10\text{년}$)에서 나타났다(Figure 4a). 이들 몇몇 지점을 제외하면 대부분의 관측지점에서는 한랭일의 발생빈도는 연구기간 동안 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 반면 겨울철 후반기에는 제주, 완도, 고흥, 남해, 진주, 포항, 영덕, 문경, 목포, 서산 등의 일부 관측지점을 제외하면 대부분의 관측지점에서 통계적으로 유의미하게 감소하는 경향을 보였다(Figure 4b). 특히, 함천에서는 겨울철 후반기 한랭일의 발생빈도 감소율이 $-2.9\text{일}/10\text{년}$ 으로 가장 크게 나타났다. 심지어 통계적 유의성이 낮은 지역에서도 목포 지점을 제외하면 대부분 경향 자체는 감소 추세를 보였다. 이러한 결과들은 겨울철 기온 평균뿐만 아니라 극한저온현상의 변화도 겨울철 전반기에는 뚜렷하지 않으나, 후반기에는 뚜렷하게 감소하는 비대칭적인 패턴으로 나타나고 있음을 보여주고 있다.

겨울철 야간 극한저온현상인 한랭야의 경우에도 겨울철 전반기에는 통계적으로 유의미한 변화 양상이 일부 지점에서만 관찰되었다(Figure 4c). 원주($-2.6\text{일}/10\text{년}$), 청주($-2.4\text{일}/10\text{년}$), 영주($-2.1\text{일}/10\text{년}$), 구미($-2.0\text{일}/10\text{년}$), 서귀포($-2.0\text{일}/10\text{년}$), 보은($-1.6\text{일}/10\text{년}$)에서는 통계적으로 유의미

한 감소 추세를 보였고, 해남($+2.0\text{일}/10\text{년}$)에서는 통계적으로 유의미한 증가 추세를 보였다. 이러한 몇몇을 제외하면 대부분의 관측지점에서는 통계적으로 유의미한 변화 추세가 나타나지 않았다. 이와 대조적으로 겨울철 후반기의 한랭야는 한랭일의 변화 추세의 분포와 유사하게 우리나라 대부분의 관측지점에서 통계적으로 유의미한 감소 추세를 나타냈다(Figure 4d). 통계적 유의성이 95% 이하인 인제, 춘천, 이천, 서산, 천안, 충주, 문경, 추풍령, 의성, 거창, 합천, 진주, 고흥, 목포, 해남 등의 지점에서도 대부분 감소 추세를 보였다. 이러한 한랭야의 감소 추세의 규모는 일부 지점에서는 한랭일의 감소 추세보다 더 크게 나타났다. 가령, 원주에는 한랭야의 변화 추세는 $-3.2\text{일}/10\text{년}$ 으로 61개 관측지점 중에서 가장 큰 감소 추세에 해당하는데, 한랭일의 감소 추세 $-2.9\text{일}/10\text{년}$ 에 비하여 더 크다.

연구기간 동안(1973~2012)의 우리나라 61개 관측지점 평균 겨울철 전후반기 일최고기온과 일최저기온의 평균과 한랭일과 한랭야 등의 극한저온현상의 시계열을 살펴보면, 대체로 1980년대 중반을 기점으로 뚜렷한 변화가 나타났음을 알 수 있다(Figure 5). Mann-Whitney 검정 결과에 따르면 1986년을 기점으로 일최저기온과 일최저기온의 평균 또는 한랭일과 한랭야 등의 극한저온현상 모두 가장 통계적으로 유의미한 변화가 나타났음을 알 수 있다. 우리나라 평균 연구기간 전반기(1973/1974~1985/1986)의 겨울철 전반기(12월 1일~1월 12일)와 후반기(1월 13일~2월 28일)의 일최고기온 평균값은 각각 5.7°C 와 4.4°C 이었으나, 연구기간 후반기(1986/1987~2011/2012)에는 각각 6.7°C 와 5.7°C 로 1.0°C 와 1.3°C 씩 더 높게 나타났다(Figure 5a). 일최저기온의 경우에도 1980년대 중반 전후로 큰 차이를 보이는데, 연구기간 전반기 우리나라 61개 관측지점 평균 겨울철 전반기와

Figure 4. Same as in Figure 3, but for trends (days/decade) of cool days (TX10P; upper panels) and cool nights (TN10P; bottom panels) defined based on 10th percentile of daily maximum and minimum temperatures, respectively.

Figure 5. Inter-annual variations of early winter (December 1~January 12) and late winter (January 13~February 28) daily maximum (a)/ minimum (b) temperatures and cool days (c)/nights (d) averaged across 61 weather stations in the Republic of Korea for the 1973/1974~2011/2012 winter period.

후반기에는 각각 -4.3°C 와 -5.8°C 이었으나, 연구 기간 후반기에는 각각 -3.3°C 와 -4.0°C 로 1.0°C 와 1.8°C 씩 더 높게 나타났다(Figure 5b). 즉, 1980년대 중반 전후의 일최기온과 일최저기온 상승 정도는 겨울철 전반기보다는 겨울철 후반기에 더 뚜렷하게 나타났음을 알 수 있다.

일최고기온 10퍼센타일 이하의 한랭일과 일최저기온 10퍼센타일 이하의 한랭야도 1980년대 중반에 큰 변화를 보인다(Figures 5c~5d). 1980년대 중반 이전에는 이러한 주야간 극한저온현상 모두 평균적인 발생빈도가 8일 이상을 나타냈지만, 1980

년대 중반 이후에는 4일 이하로 감소하였다. 2000년대에 접어들어 1980년대 중반 이전과 유사하게 극한저온현상의 발생빈도가 일부 높은 해(2005년)가 있기는 하지만, 다른 대부분의 경우에는 1980년대 중반 이전에 비하여 그 발생빈도가 상대적으로 낮게 나타났다. 이와 같은 1980년대 중반의 뚜렷한 겨울철 기온과 극한기온현상의 변화는 기존의 다른 연구결과들(Choi and Kwon, 2008; Lee *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2012)에서 제시한 우리나라 기온 변화시점과 대체로 유사하다. 그러나 이러한 1980년대 중반 이전과 이후의 변화폭은 겨울

철 내 시기별로 차이를 보였다. 1980년대 중반 전후로 겨울철 전반기 한랭일은 8.0일에서 3.8일, 겨울철 후반기 한랭일은 9.5일에서 2.7일로 각각 4.2일, 6.8일씩 감소하였다. 유사하게 겨울철 전반기 한랭야도 7.9일에서 3.2일, 겨울철 후반기 한랭야는 9.3일에서 2.4일로 각각 4.7일과 6.9일씩 감소하였다. 즉, 겨울철 극한저온현상 발생빈도의 1980년대 중반을 전후로 한 변화폭은 주야간 모두 겨울철 전반기 보다는 겨울철 후반기에 해당하는 시기에 더 뚜렷하게 나타났음을 알 수 있다.

2) 겨울철 전반기와 후반기의 대류권 대기순환 패턴 변화

겨울철 전후반기 기온변화율이 뚜렷하게 증가한 1980년 중반을 기점으로 이후 20년(1986/1987~2010/2011)과 이전 20년(1961/1962~1985/1986) 평균 하층(850hPa)과 상층(300hPa)의 종관요소를 비교하여 살펴보면 뚜렷한 차이가 나타남을 알 수 있다(Figure 6). 1980년대 기준 전후의 850hPa 기온의 편차를 살펴보면 겨울철 전반기(12월 1일~1월 12일)에는 우리나라를 포함한 유라시아 대륙 동부 지역에 평균기온이 1°C 이상 높은 구역이 넓게 나타났다(Figure 6a). 반면, 유라시아 대륙 서부의 동유럽 지역과 북아메리카 알래스카와 로키산맥 북부지역에서는 평균기온이 1°C 이상 낮은 구역이 나타났다. 이에 따라 1980년대 중반 이전보다 온난해진 유라시아 동부 지역에서는 850hPa의 지오폠펌셜 고도가 10m 이상 높아졌고, 한랭해진 유라시아 및 북아메리카 서부지역에서는 10m 이상 낮아졌다. 850hPa 바람장의 차이를 살펴보면, 1980년대 중반 이전에 비해 그 이후에 유라시아 서부에서는 바렌츠 해(Barents sea)로부터 서시베리아 지역을 거쳐 카라 해(Kara sea) 방향으로 유입하는 저기압성 흐름이 탁월하게 나타났다. 동아시아 북동 방향에 위치한 베링 해(Bering sea) 주변

지역에서도 북쪽의 추크치 해(Chukchi sea)에서 찬기류가 유입하여 베링해 남부와 알래스카를 거쳐 극지방으로 부는 저기압성 흐름이 탁월하게 나타났음을 알 수 있다. 즉, 우리나라를 기준으로 북서쪽에 자리 잡은 시베리아 지역과 북동쪽에 자리잡은 오토츠크해 방향으로 극지방으로부터 찬기류가 탁월하게 유입되었음을 알 수 있다. 이러한 남북순환이 탁월한 종관장의 흐름은 최근 전 지구적인 온난화의 추세에도 불구하고 겨울철 전반기에 기온상승이 둔화되고 극한저온현상이 과거와 유사한 발생빈도를 나타내는데 영향을 준 것으로 사료된다.

겨울철 후반기(1월 13일~2월 28일) 하층 대류권에서는 1980년대 중반 이전에 비하여 그 이후에 유라시아 대부분 지역에서 기온이 상승하고 기압이나 바람도 동서 방향의 대상 패턴이 탁월하게 나타났음을 알 수 있다(Figure 6b). 1980년대 중반 이후에는 그 이전에 비하여 지오폠펌셜 고도가 한반도를 포함한 유라시아 위도 30~40°N 지역을 중심으로 동서 방향으로 10m 이상 높게 나타났다. 반면, 위도 50°N 이상의 고위도 지역에서는 1980년대 이전에 비하여 그 이후에 지오폠펌셜 고도가 낮은 구역이 동서 방향으로 뚜렷하게 나타났다. 특히, 북극해에 인접한 유라시아 북동부지역을 중심으로 지오폠펌셜 고도가 20m 이상 낮은 구역이 나타났다. 이는 1980년대 중반 이후 겨울철 후반기를 중심으로 북반구 고위도 지역에서는 평년보다 기압이 낮아지고, 중위도 지역에서는 기압이 높아지는 북극진동 양(+)의 모드가 탁월하게 나타났음을 잘 보여준다. 바람장 편차를 살펴보면 1980년대 중반 이후 겨울철 후반에는 동아시아와 북태평양의 30~40°N 지역을 중심에 형성되는 양의 기압편차 아노말리 구역 북쪽에는 서부 유럽에서 불어오는 편서풍이 강화되어 나타났다. 반면, 이 기압편차 아노말리 구역의 남쪽에는 아열대 태평양 상

의 온난한 기류가 동아시아 남부 지역으로 유입하는 바람장 패턴이 나타났다. 1980년대 중반 이전에 비하여 그 이후에는 이와 같이 동서 방향의 대상 패턴이 강화되어 나타나면서 유라시아 위도 50° N 이남의 대부분 지역 기온이 상승하였다. 특히 한반도 북부지역을 포함한 시베리아 기단 주변 지역의 기온은 1980년대 중반 이전에 비하여 그 이후에 2°C 이상 높아졌다. 즉, 동서 방향의 대상 패턴이 탁월해 지면서 우리나라에 겨울철 기후에 주

요한 영향을 미치는 시베리아 고기압의 강도가 약화되어 겨울철 저온 현상이 1980년대 중반이후에 겨울철 전반기 보다는 겨울철 후반기를 중심으로 뚜렷하게 감소하였음을 알 수 있다.

겨울철 전반기와 후반기의 대류권 상층 300hPa 의 1980년 중반 이전과 이후 변화를 비교해 보면 대류권 하층대기에서 관찰되었던 패턴이 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다(Figures 6c-d). 1980년대 이전에 비하여 그 이후 겨울철 전반기에 유

Figure 6. Differences (P2 minus P1) of early winter (left panels)/late winter (right panels) 850hPa (upper panels)/300hPa (bottom panels) temperature (dotted lines in red, °C), geopotential height (solid lines, meter) and wind vector (arrows in blue, 100% of a cell size= 3 m/s) between the former period (1961/1962~1985/1986 (P1)) and the latter (1986/1987~2010/2011 (P2)) period. In the 300hPa synoptic charts, thick solid (dotted) lines indicate the location of polar jet stream in the former (latter) period.

라시아 및 북아메리카 서부 위도 60°N 지역을 중심으로 300hPa 지오폠펜셜 고도가 40m 이상 낮은 구역이 형성되었다(Figure 6c). 이와 대조적으로 한반도를 포함한 유라시아 동부 지역에서는 300hPa 지오폠펜셜 고도가 40m 이상 높은 구역이 형성되었다. 유라시아 서부의 음(-)의 지오폠펜셜 고도 편차가 나타나는 지역과 북아메리카 북서부의 음(-)의 지오폠펜셜 고도 편차가 나타나는 지역에서는 공통적으로 저기압성 바람장의 편차가 나타났다. 이에 따라 서부유럽과 극동지역에서는 고위도에서 중위도 방향의 바람벡터 편차, 중앙시베리아 지역에는 유라시아 대륙 내부 방향으로 카라 해로 불어 올라가는 반대 방향의 바람벡터 편차가 나타났다. 이와 유사하게 베링 해에서도 극지방의 바람이 오호츠크 해를 거쳐 베링 해 남부를 돌아 다시 알래스카 지역을 거쳐 극지방으로 이동하는 저기압성 바람 편차 패턴이 나타났다. 이러한 결과들은 최근 겨울철 전반기에는 과거에 비해 대류권 하층뿐 만 아니라 상층에서도 남북순환이 탁월하였음을 가리킨다.

최근 겨울철 후반기에는 과거에 비해 북서태평양 위도 35°N에는 대상으로 양(+)의 지오폠펜셜 고도 편차가 나타났고, 북극해에 인접한 유라시아 북동부 위도 70°N에는 음(-)의 지오폠펜셜 고도 편차가 나타났다(Figure 6d). 즉, 최근 겨울철 후반기에는 북극진동 양(+)의 모드 상태와 유사한 상층 패턴이 나타났다. 이에 따라 동아시아를 포함한 서태평양 지역에서는 양의 기압 편차 구역이 자리잡게 되었고, 이를 중심으로 남북으로 대상의 대기순환 패턴이 탁월하게 형성되었다. 이 양의 기압 편차 구역의 북쪽에는 서부유럽에서 불어오는 3% 내외의 강한 편서풍대가 형성되었고, 남쪽에는 아열대 태평양 상에서 발원하는 동풍 아노말리가 형성되었다. 반면 겨울철 극순환의 남방 한계선에 해당하는 제트 기류의 중심부의 남북방향 위치는 겨

울철 전반기와 후반기 모두 1980년대 중반 이전과 그 이후에 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다.

이러한 대류권 상하층 종관장 분석 결과를 모두 종합하면, 유라시아에서는 온난화가 뚜렷하게 진행되는 1980년대 중반 이후에도 겨울철 전반기에는 극지방의 한기 유입이 유리한 남북 흐름이 탁월하여 우리나라에서 온난화가 둔화되었던 반면 겨울철 후반기에는 해양에서 대륙방향으로 동서 흐름이 지배적으로 나타나 시베리아 기단이 약화되면서 우리나라의 기온이 상승하고, 저온극한현상도 뚜렷하게 감소할 수 있었음을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 40년 동안(1973~2012) 우리나라 기상청 61개 관측지점의 일별 기온자료와 NCEP NCAR 대류권 종관 기후 자료를 바탕으로 우리나라 겨울철 시기별 기온 평균 및 극한저온현상에 나타난 시·공간적 변화 패턴과 이와 관련된 대기순환장의 특징을 밝혔다. 주요한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우리나라의 겨울철 주야간 기온 평균 및 극한저온현상은 겨울철 전반기와 후반기 간에 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 겨울철 후반기(1월 13일~2월 28일)에는 주야간 기온상승과 극한저온감소현상이 우리나라 대부분의 지역에 걸쳐 뚜렷하게 나타났지만, 겨울철 전반기(12월 1일~1월 12일)에는 통계적 유의성을 지닌 변화 양상을 보이는 관측지점이 매우 드물게 관찰되었다. 이는 겨울철 계절 내에서 시기별로 기온의 평균 및 극한현상 변화가 비대칭적으로 발생하고 있음을 가리킨다.

둘째, 장기간 변화 추세를 살펴보면 우리나라 전반에 걸쳐 겨울철 기온이 상승하고, 극한저온현상이 감소하는 패턴은 1980년대 중반을 기점으로 전

후에 가장 뚜렷하게 나타났다. 그러나 이러한 1980년대 중반 전후의 변화의 정도는 겨울철 전반적으로 유사한 것이 아니라 겨울철 시기별로 상이하게 나타났다. 1980년대 중반을 기점으로 61개 관측지점 평균적으로 겨울철 전반기의 한랭일과 한랭야는 각각 4.2일과 4.7일 감소한 반면, 겨울철 후반기에는 각각 6.8일과 6.9일씩 감소하였다. 즉, 1980년대 중반을 전후로 겨울철 기온의 평균 및 극한현상 변화도 겨울철 전반기보다는 후반기에 해당하는 기간에 더 뚜렷하게 나타났음을 알 수 있다.

셋째, 이와 관련하여 겨울철 전반기에는 1980년대 중반을 기점으로 그 이후의 유라시아 서부와 북아메리카 북서부지역에서는 저기압성 흐름이 강화되어 극지방으로부터 시베리아 지역으로 극지방의 찬 기류가 중위도로 유입되기 좋은 종관 패턴이 형성되었다. 반면 겨울철 후반기에는 1980년대 중반 이후 북태평양 상에 지오폭텐셜 고도의 양의 편차핵이 형성되어 동서흐름이 탁월하게 나타났다. 겨울철 후반기 동아시아 북부지역에는 서부 유럽으로부터 유입되는 강한 서풍 계열의 바람, 그 남부 지역에는 아열대 북태평양으로부터 유입되는 동풍 계열의 바람이 탁월하게 나타났다. 즉, 최근 겨울철 후반기에는 기온 상승과 극한저온현상이 감소하는데 유리한 종관 패턴이 형성되었다. 이와 같은 겨울철 전반기의 강한 남북 순환 패턴과 겨울철 후반기의 동서 순환 패턴이 우리나라의 겨울철 기온 평균과 극한현상이 시기별로 비대칭적으로 변화하는데 영향을 미쳤다고 판단된다.

이 연구에서는 전 지구적 온난화 추세에서 우리나라의 겨울철 기온 상승 및 극한저온현상의 감소 추세를 겨울철 전후반기에 비대칭적으로 나타나고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한, 이러한 변화가 특히 1980년대 중반 이후에 나타나는 데 영향을 준 것으로 판단되는 대기순환장의 특징을 일부 살펴보았으나, 기존 연구들(Choi and Kim, 2015)

에서 제시한 동아시아 겨울철 기후를 좌우하는 종관 요소들과의 상관성(시베리아 고기압 또는 알류산 저기압의 강도)에 관한 보완 분석이 필요하다고 생각된다. 특히, 일부 연구(Lim *et al.*, 2012)에서 이러한 요소들의 1980년대 전후의 겨울철 평균적인 차이를 분석하였으나, 이 연구에서 제시하였듯이 겨울철 내 시기별로 우리나라의 기후 변동성 또는 변화에 미치는 종관 요소들에는 차이가 있으므로 이에 대한 상세한 후속 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 이러한 변화는 전 지구적 규모의 대기권뿐만 아니라 북반구 봄철 눈피복 면적과 같은 빙권 요소들의 변화시점과도 일치하므로(Brown and Robinson, 2011) 동아시아 지역의 변화와 전지구적 규모의 변화와의 관련성에 대한 분석도 필요하다고 생각된다.

사사

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-3063)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Ballinger, T.J., Allen, M.J., and Rohli, R.V., 2014, Spatiotemporal analysis of the January Northern Hemisphere circumpolar vortex over the contiguous United States. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3602-3608.
- Brown, R.D. and Robinson, D.A., 2011, Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922-2010 including an assessment of uncertainty, *The Cryosphere*, 5(1), 219-229.
- Chang, C.P. and Lu, M.M., 2012, Intraseasonal predictability of Siberian high and East Asian winter monsoon and its interdecadal variability,

- Journal of Climate*, 25(5), 1773-1778.
- Choi, G., 2014, Spatio-temporal changes in seasonal extreme temperature events in the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 49(4), 489-508 (in Korean).
- Choi, G. and Kim, J., 2015, Synoptic climatic patterns for winter extreme low temperature events in the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 50(1), 1-21 (in Korean).
- Choi, G., Kwon, W.-T., Boo, K.-O., and Cha, Y.-M., 2008, Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(5), 681-700.
- Choi, Y. and Park, C., 2010, Distributions of cold surges and their changes in the joongbu region, the Republic of Korea, *Geographical Journal of Korea*, 44(4), 713-725 (in Korean).
- Cohen, J., Saito, K., and Entekhabi, D., 2001, The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability, *Geophysical Research Letters*, 28(2), 299-302.
- Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethlo, K., Entekhabi, D., Overland, J., and Jones, J., 2014, Recent Arctic amplification and extreme midlatitude weather, *Nature Geoscience*, 7, 627-637.
- Francis, J.A. and Vavrus, S.J., 2012, Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, 39 L06801.
- Gong, D.-Y. and Ho, C.H., 2002, The Siberian high and climate change over middle to high latitude Asia, *Theoretical and Applied Climatology*, 72(1-2), 1-9.
- Gong, D.-Y., Wang, S.-W., and Zhu, J.-H., 2001, East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2073-2076, doi:10.1029/2000GL012311.
- Gramling, C., 2015, Arctic impact, *Science*, 347(6224), 818-821.
- Heo, I. and Lee, S., 2006, Changes of unusual temperature events and their controlling factors in Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41(1), 94-105 (in Korean).
- IPCC, 2012, Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 1-19.
- IPCC, 2013, Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeong, J.-H., and Ho, C.-H., 2005, Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, 32, L14704, doi:10.1029/2005GL023024.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project,

- Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Kim, B.M., Son, S.W., Min, S.K., Jeong, J.H., Kim, S.J., Zhang, X., Shim, T., and Yoon, J.H., 2014, Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nature communications*, 5, 4645: doi:10.1038/ncomms5646.
- Kim, J.H. and Suh, S.J., 2006, The demand expectation of heating and cooling energy in buildings according to climate warming, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 26(3), 119-125 (in Korean).
- Lee, K., Baek, H.J., and Cho, C., 2013, Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(3), 313-323.
- Lee, K., Seong, J.H., Kim, Y.O., and Lee, S., 2011, Change-point analysis of mean temperature and extreme temperature in the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(5), 583-596 (in Korean).
- Lim, H.C., Byun, Y.H., Kwon, W.T., and Jhun, J.G., 2008, An assessment of the residential electric energy consumption induced by global warming, *Atmosphere*, 18(1), 33-41 (in Korean).
- Lim, S.M., Ye, S.W., and Kim, G.R., 2012, Analysis on the relationship between the Korean temperature and the atmospheric circulation over the Northern Hemisphere during winter, *Atmosphere*, 22(2), 187-197 (in Korean).
- Mann, H.B. and Whitney, D.R., 1947, On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other, *Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50-60.
- Moon, J.Y., Park, C., Choi, Y., and Pyeon, D., 2014, Recent change in the intraseasonal characteristics of winter temperature over South Korea, *Climate Research*, 9(3), 167-180 (in Korean).
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., and Kimoto, M., 2014, Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades, *Nature Geoscience*, 7, 869-873.
- Park, B.I., 2011, The change of seasonal trend appeared in wintertime daily mean temperature of Seoul, Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(2), 152-167 (in Korean).
- Park, T.W., Ho, C.H., and Yang, S., 2011, Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia, *Journal of Climate*, 24(1), 68-83.
- Sato, K., Inoue, J. and Watanabe, M., 2014, Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environmental Research Letters*, 9, 084009.
- Takaya, K. and Nakamura, H., 2005, Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high, *Journal of Atmospheric Sciences*, 62(12), 4423-4440.
- Tang, Q., Zhang, X., Yang, X., and Francis, J.A., 2013a, Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss, *Environmental Research Letters*, 8, 014036.
- Tang, Q., Zhang, X., and Francis, J.A., 2013b, Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere, *Nature Climate Change*, 4, 45-50.
- Woo, S.H., Kim, B.M., Jeong, J.H., Kim, S.J., and Lim, G.H., 2012, Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979-2011), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, (1984-2012), 117(D18).
- Wu, B. and Wang, J., 2002, Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon, *Geophysical Research Letters*, 29(19), 1897, doi: 10.1029/2002GL015373.

책임 편집: 최광용

영문 교열: 이은결