최근 우리나라 겨울철 기온의 계절 내 특성 변화

문자연¹ · 박창용² · 최영은³ · 편도의³

¹건국대학교 기후연구소, ²포항공과대학교 환경공학부, ³건국대학교 지리학과
(2014년 8월 29일 접수, 2014년 9월 8일 수정, 2014년 9월 11일 게재 확정)

Recent Change in the Intraseasonal Characteristics of Winter Temperature over South Korea

Ja-Yeon Moon¹ · Changyong Park² · Youngeun Choi³ · Doeui Pyeon³

¹Climate Research Institute, Konkuk University

²School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

³Department of Geography, Konkuk University

(Received 29 August 2014, Revised 8 September 2014, Accepted 11 September 2014)

Abstract : In this study, we analyzed the intraseasonal variability and change of winter temperature over South Korea using long-term observations. The lowest temperature in the wintertime, using daily mean, maximum, and minimum temperature data occurred on January 7th in the period of 2003–2012, while on January 22–25th in the past 30 years(1973–1982, 1983–1992, 1993–2002). Representative seven stations in South Korea also showed consistent result. The strengthening of Siberian High and weakening of Aleutian Low in recent 10 years are found to be closely related with the recent intraseasonal temperature change over South Korea. The baroclinic structure of upper-level low and lower-level high system near Korean peninsula provided good condition for vertical cold-air advection, which resulted in minimum temperature on late January in 1973–1982 and early January in 2003–2012 with strengthened low-level northerly flow.

Key Words : winter temperature, intraseasonal variability, Siberian High, Aleutian Low, baroclinic structure

주요어 : 겨울철 기온, 계절 내 변동, 시베리아 고기압, 알류산 저기압, 경압구조

1. 서론

유라시아 대륙의 동쪽에 위치하고 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라의 겨울철 기후는 시

베리아에 중심을 둔 고기압성 순환 및 북태평양에 중심을 둔 저기압성 순환과 밀접한 관계가 있으며(Ahn and Kim, 2010; Kim *et al.*, 2000), 상층 제트의 위치와 세기(Kang, 1988; Lee *et al.*, 1988),

그리고 유럽에서부터 북서태평양까지 이어지는 대규모 파동 패턴에 의해 영향을 받는다(Kang and Baek, 1993; Kim and Ahn, 2010). 우리나라의 겨울철 기온은 극으로부터의 한기류와 북서태평양의 난기류가 만나 경압 불안정이 형성되어 한랭기와 온난기가 주기적으로 교차하는 종관 규모적 순환 특성을 보인다(Lee, 1985).

겨울철 기온 변동은 두 가지 시간적 규모에 의해 가장 큰 특징이 나타나는데, 첫 번째로 경압 파동과 연관되어 빠르게 이동하는 고·저기압과 관련된 보통 8일 미만의 단주기 변동이 있고 두 번째로 전 지구적 대기 순환으로 비교적 한 지역에 상당기간 지속되어 영향을 미치는 10일 이상의 장주기 변동이 있다(Blackmon *et al.*, 1984). 대기변동은 여러 요인에 의해 다양한 주기의 변동 성분으로 구성되어 있으나, 이 가운데 뚜렷하게 큰 성분은 이 두 가지로 볼 수 있으며 이들은 각기 발생원인도 다르고 이들의 구조, 에너지 전파, 발달 특성에도 큰 차이가 있다(Jeong and Lee, 1993). 아시아-북태평양 지역을 중심으로 분석한 Jeong and Lee(1993)의 연구 결과에 따르면 단주기 대기변동이 발달하는 지역은 대체로 대륙의 서안 좁은 지역에 한정되나, 감쇠되는 지역은 해양의 동부 및 대륙에 걸쳐 넓은 범위에 나타난다. 반면 장주기 대기변동은 상층과 하층에서 큰 차이 없이 넓은 지역에 걸쳐 해양에서 발달하고, 감쇠되는 지역은 대륙의 비교적 좁은 범위에 나타나며 각 격자점에서 지위고도 편차의 변화율은 매우 적다. 따라서 단주기 대기변동과 연관된 지위고도 편차는 급격히 발달하고 서서히 감쇠되는 반면 장주기 대기변동에서는 서서히 발달하고 비교적 빠르게 소멸하는 특성을 가진다고 하였다.

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) 제5차 평가보고서에서는, 지구온난화로 인한 지구 평균기

온이 지난 133년간(1880~2012년) 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$) 상승했고 21세기의 첫 10년은 더 더워 지구 온난화가 지속되고 있다고 하였다. 또한, 1950년 이후 결빙일수 및 혹한일수 등의 극한기후사상은 감소하고 열대야일수 같은 극한기후사상은 증가하였으며 일 최저기온과 최고기온이 모두 증가한 것으로 나타났다(IPCC, 2013). 전 세계적인 지구 온난화 경향과 함께 우리나라 역시 지난 40~50년간 꾸준한 기온 상승을 나타냈으며 여름철 기온보다 겨울철 기온이 더 빠르게 상승하여(Ryoo *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2008) 기온 연교차가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이로 인해 우리 생활과 가장 밀접하게 관련된 기온과 강수의 변동성과 변화 경향에 대한 많은 연구가 진행되었다(Choi, 2002; Jung *et al.*, 2002; Ho *et al.*, 2003; Ko *et al.*, 2009; Ryoo *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 2006). Ryoo and Kwon(2002)은 우리나라 겨울철 평균기온과 혹한일의 발생빈도의 선형 상관계수는 -0.89 로 아주 강한 음의 상관을 갖고 있고 혹한일의 발생빈도가 높을수록 계절평균 기온이 낮은 한랭 겨울이 되고, 빈도가 낮을수록 기온이 높은 온난 겨울이 된다고 하였다. Im and Ahn(2004)은 우리나라 겨울철 기온과 전구순환지수인 북극진동지수, 남방진동지수, 몬순지수, 시베리아 고기압 지수와의 상관성을 조사하여 한반도 겨울철 기온의 변동에 북극진동지수가 가장 크게 상관성이 있고, 북극진동은 또한, 동아시아 몬순 및 시베리아 고기압과도 통계적으로 유의한 상관성이 나타났음을 보였다.

우리나라 겨울철 기온에 관한 이전 연구들은 대부분 관측기온으로부터 계절 변동, 연 변동, 경년 변동 그리고 장기변동 경향에 집중되었고(Ryoo *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 1999; Cho and Suh, 2010) 겨울철 내의 기온변동이나 특성의 변화에 관한 연구는 상대적으로 적다. 1년을 주기로 하는 기

온 변화인 계절 주기 혹은 연주기의 위상각에 변화가 있다는 연구가 Thomson(1995)에 의해 언급된 이후 국내에서도 몇몇 학자들에 의해 분석되었다. 최근, Park(2011)은 서울의 겨울철 일평균 기온에 나타난 계절 추이의 변화를 1941~1970년과 1971~2000년에 대해 비교하여 그 특징과 원인을 연구하였다. 이 연구에 따르면 겨울철 가장 낮은 기온이 1941~1970년에는 1월 초·중순에 나타났으나 1971~2000년에는 1월 하순~2월 초순에 나타나 계절 추이가 변화되었음을 보였고, 전기에 비한 후기의 변화 요인으로 시베리아 고기압의 세력 약화와 알류산 저기압의 발달을 지적하였다.

최근 들어 우리나라를 포함한 북미, 유럽, 아시아 대륙에서는 20세기 이후 뚜렷한 온난화로 인한 기온 상승에도 불구하고 겨울철 이례적인 이상 기상인 한파, 폭설 등의 지역적인 극한 현상이 지속적으로 발생하고 있다. 그 동안 한파와 같은 겨울철 극한기온사상의 발생빈도 및 강도에 초점을 맞춘 연구는 다수 진행되었지만 겨울철 내의 기온특성의 변화를 분석한 연구는 상대적으로 적다. 이에 본 연구에서는 우리나라 전체 지역에 대한 겨울철 기온의 계절 내 변동 특성 및 변화에 대해 알아보고 최근 40년(1973~2012) 및 최근 10년(2003~2012) 겨울철의 변화경향을 비교/분석하고자 한다. 아울러, 우리나라 주변의 동아시아 및 북태평양의 대규모 순환장의 특성을 통해 그 원인을 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 연구 방법

본 연구에서 사용한 자료는 일 평균, 최고, 최저기온 자료이며 분석 기간은 1973년부터 2012년까지로 이 기간에 대해 관측을 수행하고 있는 60개 지점(Figure 1)을 선정하였다. 우리나라 내

의 지역별 특징을 보여주기 위해 대표지점으로 서울, 강릉, 추풍령, 전주, 대구, 목포, 부산의 7개 지점을 선택하여 추가적으로 분석하였다. 겨울은 12월, 다음 해 1월과 2월로 정의하여 1973년 겨울은 1973년 12월에서 1974년 2월까지를 의미한다. 기준 기후값은 1981~2010년의 30년으로 정의하였다. 겨울철 기온의 특성 변화는 20일 보다 적은 규모의 영향을 배제하는(Cha *et al.*, 2007) 20일 이동 평균을 이용하여 종관규모 이상의 시간 및 공간적 분포만을 고려하였으며 3장에서 분석한 계절 내에서의 시간별 변화를 살펴보기 위해 1973년부터 2012년까지 10년 단위로 나누어서 지점별로 비교·분석하였다. 4장에서 분석한 주변 종관장 자료는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 간격의 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 하층 및 상층 바람장, 중층 고도장, 해수면기압으로 모든 변수에 대해 20일 이동 평균을 적용하였다.

1973년부터 2012년까지 남한의 60개 관측지점 자료를 이용하여 겨울철(12·1·2월) 월별 평균 기온을 60개 관측지점과 함께 나타내었다(Figure 1). 우리나라 겨울철 기온의 분포는 남에서 북으로 위도의 북진에 따라, 지형의 고저에 따라 큰 영향을 받는다. 겨울철 내에서는 월별 공간적인 패턴의 변화는 크지 않다. 강원도 지역을 중심으로 가장 낮은 기온이 나타나고 남해안 및 제주도에서 가장 높은 기온을 나타내는 특징을 보인다. 월별로는 1월에 가장 낮은 기온 경향을 가진다.

3. 우리나라 겨울철 기온의 특성 변화

이 장에서는 우리나라 겨울철 일 평균, 최고,

Figure 1. Monthly mean temperature distributions of 60 stations in South Korea during 1973~2012
(a) December (b) January (c) February. 60 stations are plotted in dot.

최저기온의 계절 내의 시계열 변동이 총 분석 기간(1973~2012년) 안에서 어떠한 변화를 보이는지 분석하고자 한다. 일 최고기온 및 최저기온의 겨울철 내 기온변화를 1973년부터 10년 단위로 평균하여 그 변동성을 살펴보았다(Figure 2). 일 최저기온은 $-8\sim 0^{\circ}\text{C}$, 일 최고기온은 $2\sim 10^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 가지며 전반적으로 12월부터 기온이 하강하여 1월에 최저기온을 기록하고 점차 증가하는 추세를 보여준다. 40년(1973~2012년) 전체 연구기간 동안에는 12월 1일부터 일 최저기온이 하강하다가 대한(大寒) 3~4일 후인 1월 23일과 1월 24일에 가장 낮은 최저기온(-5.9°C)을 보였고 이후 상승하는 패턴을 보인다. 10년별 분포를 살펴보면 먼저 1973~1982년은 10년별 4개 기간 중 전반적으로 가장 낮은 일 최저기온을 보인 기간이었다. 1973~2012년의 경우와 마찬가지로 1월 22일과 1월 23일 경에 약 -7.0°C 로 가장 낮은 일 최저기온을 나타냈다. 1983~1992년의 경

우에는 1973~2012년과 유사한 패턴을 보였다. 1993~2002년에는 이전 기간보다 3~4일 정도 늦은 1월 26일과 1월 27일에 약 -5.6°C 로 가장 낮은 일 최저기온을 나타냈다. 가장 낮은 일 최저기온을 보인 날 이후 기온의 상승은 1973~2012년, 1983~1992년과 유사한 패턴을 보였지만 12월 20일 경부터 약 30일 간은 모든 기간에서 가장 높은 일 최저기온을 보였다.

최근 10년인 2003~2012년은 가장 낮은 일 최저기온을 보인 날이 과거의 1월 하순에서 1월 초순 소한(小寒) 무렵인 1월 7일경(-5.9°C)으로 나타나서 이전의 기간보다 15~20일 정도 앞당겨진 것으로 나타났다. 또한 12월 하순인 12월 23일부터 1월 초순인 1월 9일까지는 10년별 4개 기간 중 가장 기온이 낮았던 기간으로 기록되었다. 반면에 1월 하순인 1월 22일부터 2월 12~13일을 제외한 2월 28일까지는 10년별 4개 기간 중 가장 일 최저기온이 높았던 기간으로 나타났다. 특히 최근 5

년(2008~2012년)을 고려해보았을 때는 12월 11일부터 1월 16일까지 약 한달 여 동안 다른 기간에 비해 일 최저기온이 크게 낮았으며, 1월 8일 경 기온이 -7.8°C 로 가장 낮은 기온을 보였다. 일 최고기온의 경우 일 최저기온과 아주 유사한 시간변화를 보여주는데 최근 10년이 그 이전 30년에 비해 일 최고기온이 가장 낮은 날이 15~20일 앞당겨져 나타났으며 10년별 시간에 따른 변화 또한 최저기온의 분포와 유사하게 나타났다.

최근 10년간의 우리나라 겨울철 일 최고 및 최저 기온의 분포를 통해 그 이전 과거 30년과 비교해 보았을 때 계절안의 추이가 변화하였음을

알 수 있다. 계절추이의 변화에 대한 이전 연구(Park, 2011)에서는 1941~1970년에 최저기온이 1월 초에 나타났고 그 이후 30년에 1월 말로 약 20일의 최저기온의 시점이 이동하였음을 언급한 바 있다. 이 연구에서의 결과로부터 최근 10년의 추이의 변화가 장기간의 기후변동의 모습인지 지속적인 온난화의 결과인지에 대한 부분은 추가적인 분석이 필요할 것으로 본다.

우리나라 60개 지점 평균에 대한 결과가 각각의 우리나라 각 지역별 결과를 얼마나 설명해주는지를 살펴보기 위해 우리나라 7개 대표 지점을 선정하여 일 평균기온에 대한 계절 내 추이 변화를 살

Figure 2. Time evolution of daily (a) minimum and (b) maximum temperature averaged over 10-year intervals from 1973 to 2012 during December 1 to February 28.

Figure 3. Same as in Figure 2, except for the daily mean temperature over (a) South Korea(60 station mean) and (b~h) at each stations.

Table 1. Date of daily mean temperature at its minimum value in every 10 years and 40 year mean for each stations and over South Korea.

Stations	1973-2012	1973-1982	1983-1992	1993-2002	2003-2012
South Korea(60 stations)	23, January	22, January	25, January	25, January	7, January
Gangneong	23, January	22, January	25, January	24, January	7, January
Mokpo	24, January	22, January	24, January	26, January	7, January
Daegu	23, January	22, January	25, January	25, January	6, January
Seoul	23, January	22, January	20, January	23, January	4, January
Chungcheong	23, January	22, January	25, January	24, January	6, January
Jeonju	24, January	22, January	25, January	25, January	5, January
Busan	23, January	22, January	22, January	25, January	6, January

펴보았다(Figure 3). 먼저 60개 지점 평균된 일 평균기온은 이전의(Figure 2) 최고 및 최저 기온의 분포와 동일하게 최근 10년에는 1월 초에 가장 낮은 기온이 발생하고 나머지 기간(1973~2002년)에서는 10년 단위로 모두 1월 말 이후에 나타나는 것을 볼 수 있다. 지역별로 각각 살펴보면 강릉, 목포, 대구, 서울, 추풍령, 전주, 부산 모든 지점에서 계절 내 가장 낮은 기온이 나타나는 시점이 과거 1월 말에서 최근 10년에 1월 초로 앞당겨진 것이 동일하게 나타났다. 또한, 1월초에는 과거 어느 때보다 최근 10년이 가장 낮은 기온을 보여주는 것이 공통으로 나타났다.

10년별 계절 안에서의 기온이 가장 낮은 시점이 1월 초로 이동한 부분 이외에 특이한 점은 겨울철 기온의 온난화 현상이 존재하고 있음에도 불구하고 12월 하순부터 1월 상순까지의 최근 10년은 과거에 비해 가장 한랭한 시기를 나타내고 있다는 점이다. 이러한 면은 대구 지방을 제외한 모든 지점에서도 공통으로 나타나며 대구의 경우는 최근 10년에 최저기온의 발생시기의 변화는 있지만 1973~1982년대가 다른 시기에 비해 겨울철 기온이 전반적으로 가장 낮은 기온을 보여주었다.

각 지점별 계절 내에서의 최저기온의 발생 시기를 정확히 알기 위해 10년 단위로 일 평균기온의

가장 낮은 시점을 정리하여 제시하였다(Table 1). 모든 지점에서 1973년부터 2002년까지의 가장 낮은 기온은 1월 20~26일에 발생하였으며 최근 10년에는 1월 4~7일에 나타났음을 알 수 있다. 20일 이전의 단기 규모의 영향을 배제한 결과, 우리나라 모든 지점에서의 겨울철 내의 특성 변화는 지역별 지형적인 효과나 위도 차이, 주변의 환경적인 영향은 크지 않고, 종관 규모 이상의 대기 순환의 영향을 받을 것으로 추정할 수 있다.

4. 우리나라 주변 대규모 순환장의 변화

이 장에서는 겨울철 우리나라의 기온 변동에 영향을 미치는 주요 대기 순환장의 최근 변화 경향을 살펴보고자 한다. 우리나라 지점별 기온자료와 같은 방법으로 20일 이동평균을 수행하여 단기 파동에 의한 영향을 고려하지 않았다. 최근 10년의 변화 경향을 자세히 분석하기 위해 Table 1에 제시된 60개 지점 평균자료를 이용하여 계절 내에 가장 낮은 기온이 나타난 시점을 기준으로 전후 10일을 선택하여 21일 평균값을 모든 변수에 대해 10년 단위로 계산하였다. 이들 중, 2003

~2012년과 1973~1982년을 선정하여 시대별 순환장의 차이가 어떻게 나타나는지, 최저기온이 나타난 시점에서의 차이는 어떤 특성을 보이는지 분석하였다. 1월 초의 경우는 12/29~1/17일 평균을 하였고 1월 말의 경우는 1/13~2/1일 평균으로 하였다.

겨울철 우리나라를 포함한 아시아 대륙과 북태평양에 나타난 지표기온의 분포를 먼저 살펴보았다(Figure 4). 이하에서는 1973~1982년을 P1으로 2003~2012년을 P2로 부르기로 한다. 가장 눈에 띄는 점은 P1에 비해 P2에서 러시아를 포함하여 북유럽, 북극해양 등 위도 70도 북쪽으로 모든 경도대에서 지표기온이 현저하게 상승했다는 점이다. P2 시기에는 몽골 지역 및 중앙아시아에서 지표기온의 하강이 크게 나타나며 오호츠크 해에서는 기온의 상승이, 알류산 열도 및 베링 해에서는 기온의 하강이 나타난다. 우리나라 주변 지역

을 살펴보면 1월 초에 동아시아 전반적으로 기온의 하강이 나타나는 반면 1월 말은 평년대비 편차 값이 존재하지 않는 것을 알 수 있다. P1의 경우 1월 초와 1월 말에 알류산 열도, 알래스카를 포함한 주변 지역에 기온이 현저히 상승하는 것이 가장 특징적이다. 1월 초와 1월 말을 비교하면 유라시아 대륙에서 큰 차이를 보이는데 1월 초에 비해 1월 말에 한랭한 구역이 넓고 기온 또한 낮다. 1월 초의 경우는 기온의 하강 지역이 일부 오호츠크해 서쪽 산맥지역과 시베리아 일부 지역에서만 나타나지만, 1월 말에 시베리아, 러시아 등 유라시아 북부 지역에 기온이 하강하는 것을 알 수 있다.

우리나라 지점 평균 기온의 결과와 동일하게 P1과 P2의 지표기온의 분포에서도 우리나라 부근에는 P2 시기에 1월 초에 기온이 하강하며 P2 시기에는 1월 말에 한랭한 구역이 넓게 나타났다. P1과 P2의 가장 대조적인 결과로는 고위도 지역, 알

Figure 4. Surface air temperature anomalies of (a)(b) 12/29~1/17 mean and (c)(d) 1/13~2/1 mean during (a)(c) 1973~1982 and (b)(d) 2003~2012. For anomalies, 1981~2010 climatology is removed.

류산 열도 부근, 오토츠크해 부근에서 반대의 시그널로 나타난 평년대비 한랭/온난한 구역이다.

겨울철 우리나라의 기온 변동은 시베리아 고기압 및 알류산 저기압, 몬순 순환과 관련된 북풍에 의해 영향을 받는다. 기온의 분포에 영향을 미치는 인자들의 특성을 분석하기 위해 각 시기별 하층의 기압, 중층의 고도, 상·하층의 바람장의 차이를 분석하였다(Figure 5~7). 해수면기압(Figure 5)의 분포를 먼저 살펴보면, P1의 경우, 1월 초와 말에 알류산 저기압이 강하게 나타나며 우리나라 부근으로의 시베리아 고기압이 1월 초에는 약화되고 1월 말에는 강화되는 것을 볼 수 있다. 북대서양에서도 강한 시그널을 보이는데 아이슬란드 저기압과 그 아래 고기압성 순환이 나타나는 음의 북대서양 진동(NAO, North Atlantic Oscillation)의 패턴이 강화됨을 알 수 있다. P2의 경우 유라시아 북쪽 지역 전체에 대해 고기압이 강화되며 이는 알류산 열도 지역까지 확장되어 나타나고 북미 서해안까지 연결된다. 북대서양에서는 P1의 경우 북쪽 고기압 편차, 남쪽 저기압 편차로 남북대조를 이루던 기압배치가 P2에서는 북동 고기압, 남서 저기압성 순환으로 기압 배치가 변하였고 그 세력 또한 약화되었다. 1월 초에 특히 시베리아 고기압이 동아시아 지역 남단까지 확장되어 나타나 1월 말에 비해 기온이 하강할 수 있는 조건을 제공하고 있다.

과거에 비해 최근 시기인 P2에서 시베리아 고기압의 강화, 알류산 저기압의 약화 현상은 Park (2011)의 연구 내용(1941~1970년에 비해 1971~2000년에 최저기온이 나타나는 시점이 1월 말로 이동하였고 이는 시베리아 고기압의 약화, 알류산 저기압의 강화와 관련 있음)과 반대의 시그널로 일치하는 내용으로 겨울철 내 기온의 변화에는 시베리아 고기압 및 알류산 저기압의 두 기압패턴이 아주 중요하게 작용한다는 것을 재확인할 수

있다.

중층(500hPa) 순환장(Figure 6)의 구조를 살펴보면 앞의 해수면기압의 배치와 함께, 중위도 및 고위도에서 하층부터 연직으로 전체적인 구조는 순압구조를 보여주는 것을 알 수 있다. 즉, P1에서는 북태평양에서 저기압성 순환이 강화되고 우리나라 포함 동아시아 지역에서도 이러한 특징이 나타나며 북대서양에서 남북대비의 시그널이 아주 강하게 나타난다. P2의 경우도 해수면기압의 분포와 유사한 특징을 나타내며 유라시아 대륙 북쪽으로 고기압성 순환이 강화되며 이는 북태평양 동쪽 지역까지 확장하여 나타난다. 반면, P1과 P2에서 최저기온이 발생한 시점의 경우, 우리나라 지역을 중심으로 지역규모의 경압구조를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 하층에서 우리나라 부근 작은 규모의 고기압과 그 동쪽으로 저기압성 순환이 P1에는 1월 말, P2에는 1월 초에 나타나며 중층의 순환장에서는 이 시기에 저기압성 순환장이 위치하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우, 연직 경압 불안정이 형성되어 상층 저기압에서 한랭한 공기가 하층으로 유입되어 한랭이류 현상이 발생하게 되어 하층 주변 지역의 기온이 하강하게 된다. 이 연구에서도 P1과 P2의 시기에 따른 순환장의 차이가 있지만 각 시기에서의 최저기온 발생 시의 연직 구조는 유사하게 지역적인 경압불안정 구역 형성에 따른 한랭이류가 발생함을 알 수 있다.

겨울철 동아시아와 서태평양 상층의 제트류(동아시아 제트)는 동아시아-태평양 지역의 겨울철 날씨에 중요한 대기 순환시스템이다(Yang *et al.*, 2004). 동아시아 제트는 저기압 발생, 전선발생, 저지고기압, 폭풍경로 등 종관규모 현상과 밀접한 관계가 있어 이 지역의 날씨와 기후에 많은 영향을 미친다(NIMR, 2004). 동아시아 지역에 대해 좀 더 자세히 분석하기 위해 상층(200hPa) 동서류 및 하층(850hPa) 바람장의 분포를 함께 제시

Figure 5. Same as in Figure 4, but for mean sea level pressure anomalies.

Figure 6. Same as in Figure 4, but for 500hPa geopotential height anomalies.

Figure 7. Same as in Figure 4, but for 200hPa zonal wind anomalies(contour) with climatological mean over 50m/s(shading).

하였다(Figure 7). 상층 동서류에 대한 결과를 살펴보면, 음영으로 표시된 구역은 기후값으로 50 m/s 이상인 동아시아 제트의 중심구역을 의미하고 선으로 표시된 구역은 기후값으로부터의 각 시기별 편차장을 나타낸다. P1과 P2의 가장 큰 차이는 우리나라에서부터 서쪽으로 존재하는 바람의 방향 차이와 상층 풍속의 우리나라 주변 강도의 차이이다. P1의 경우 우리나라 서쪽에서 동풍이 강해지는 반면, P2의 경우 동아시아 전체 지역의 서풍이 강해지며 풍속의 남북 경도도 강해지는 특징을 보이고 있다. 즉, 최근 우리나라 주변 서풍이 더 강화되었음을 의미한다.

하층 바람장의 구조를 보면, 우리나라 중심으로 보았을 때 상층과 반대의 바람이 부는 것을 볼 수 있다. P1에서는 우리나라 서쪽에서 북서/서풍 편

차가 강하게 나타나는 반면 P2에서는 북동/동풍이 영향을 준다. 즉 상·하층의 경압구조가 존재하며 이러한 연직 경압구조에서 우리나라 주변으로 상층 저기압(저기압 남쪽 서풍의 강화)이 존재할 때 하층의 고기압(고기압 남쪽 동풍의 강화) 후면으로 한랭한 공기의 연직 유입이 쉽게 이루어질 수 있는 환경을 제공해 준다. 각 시기별 기온이 최저로 나타나는 시점을 중심으로 보게 되면 P1에서는 1월 말에, P2에서는 1월 초에 각각 북쪽 고기압성 순환으로부터 내려오는 북풍이 강화됨을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 60개 지점의 일 평균, 최고, 최저기온 자료를 통해 1973년부터 2012년까지의 겨울철 계절 내 변동의 특성 변화를 살펴 보았다. 20일 이동 평균을 통해 단기간의 변동은 고려하지 않았으며 기온의 변화를 일으키는 원인을 보고자 해수면기압, 상·하층 바람장, 중층 고도장을 이용하여 대규모 순환장 분포의 특성 변화를 조사하였다.

일 최고기온 및 최저기온의 겨울철 내 기온변화를 1973년부터 10년 단위로 평균하여 그 변동성을 살펴본 결과, 40년(1973~2012년) 전체 연구기간 동안에는 12월 1일부터 일 최저기온이 하강하다가 대한(大寒) 3~4일 후인 1월 23일에 가장 낮은 최저기온(-5.9°C)을 보였고 이후 상승하는 패턴을 보였다. 10년별로 각각의 추이를 살펴본 결과, 1973~1982년, 1983~1992년, 1993~2002년에는 1월 23~25일, 2003~2012년에는 1월 7일로, 과거에 비해 최근 10년에 최저기온이 나타나는 시기가 15~20일 앞당겨져 나타난 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 일 평균, 최고, 최저기온의 분포에서 모두 동일하게 나타났다.

우리나라 7개 대표 지점(서울, 강릉, 추풍령, 목포, 전주, 대구, 부산)을 선정하여 각 지점별 기온의 변화 경향을 살펴본 결과, 모든 지점에서 우리나라 전체 평균에 대한 경우와 동일한 결과가 나타났다. 따라서 과거 40년에 비교해 보았을 때 최근 10년에 겨울철 기온의 계절추이가 변화하였음을 확인했고 모든 지점에서 공통으로 나타난 것으로 보아 지역적인 지형이나 환경에 의한 영향이 아닌 대규모적인 순환에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 추정하였다. 따라서 우리나라 및 동아시아 주변 지역에 영향을 미치는 여러 가지 기후변수들을 이용하여 대기순환장의 분석을 수행

한 결과, 지표기온에서는 P1(1973~1982)에 비해 P2(2003~2012)는 고위도에서의 지표기온의 상승 경향이 현저하였고 오토츠크 해에서의 기온이 상승하였던 반면, 알류산 열도 및 베링해 부근에서는 기온이 감소하는 특징을 보였다. P1에서는 이와 반대의 양상을 나타내었으며, P1에서는 1월 말에, P2에서는 1월 초에 우리나라 주변의 기온이 하강하는 모습을 보였다.

해수면기압 및 중층(500hPa) 순환장의 특성을 분석한 결과, P1에서 알류산 저기압성 순환의 강화와 북대서양에서 음의 북대서양 진동의 강화가 발생하였고, P2의 경우 시베리아고기압성 순환이 강화되며 알류산 저기압이 약화되고 북대서양에는 시그널이 약하게 나타났다. 중층 순환장은 하층과 함께 중위도 및 고위도에서 순압구조를 보였지만 우리나라 지역의 작은 규모에서 최저기온이 발생한 시점인 P1의 1월 말, P2의 1월 초에 경압구조가 발생하였다. 중층 상공에 저기압성 순환과 하층의 서쪽에 고기압, 동쪽에 저기압이 우리나라 중심으로 위치해 경압불안정에 의한 한랭기류의 유입이 발생할 조건이 되었다.

동아시아 지역에 대한 하층(850hPa) 및 상층(200hPa) 바람장의 분포를 구해본 결과, 하층바람 P1에서는 우리나라를 중심으로 북서/서풍 편차가 강하게 나타나는 반면 P2에서는 북동/동풍이 영향을 주었다. 이에 비해 상층(200hPa) 동서류에서는 우리나라 서쪽에서 P1의 경우 동풍이 강해지고 P2의 경우 서풍이 강해지는 특징을 보였으며 특히, P2에서 우리나라 주변에서 바람속도의 남북으로의 경도가 아주 강하게 나타나는 것을 알 수 있었다. P1의 1월 말, P2의 1월 초에 북쪽에서 한랭 기류의 유입이 강화되어 이 시기의 기온 하강과 관련이 있음을 알 수 있었다.

겨울철 기온의 계절 내에서의 특성에 대한 연구는 계절 평균 및 연평균 변화에 관한 연구에 비해

많지 않아 앞으로 지속적인 추가연구가 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서 제시한 최근 10년의 추이의 변화가 장기간의 기후변동의 일부인지에 대한 분석도 향후 진행하고자 한다.

사사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A2005137).

References

- Ahn, J.-B. and H.-J. Kim, 2010, Characteristics of monsoon climate in the Korean Peninsula, *Journal of Climate Research*, 5(2), 91-99 (in Korean).
- Blackmon, M.L., Lee, Y.M., and Wallace, J.M., 1984, Horizontal structure of 500mb height fluctuations with long, intermediate, and short time scales, *J. Atmos. Sci.*, 41, 961-979.
- Cha, E.-J., Kimoto, M., Lee, E. -J., and Jhun, J.-G., 2007, The recent increase in the heavy rainfall events in august over the Korean Peninsula, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 28(5), 585-597 (in Korean).
- Cho, A. and Suh, M.-S., 2010, Weekly to intra-monthly variabilities and their trends of daily maximum-minimum temperature and diurnal temperature range in South Korea, *Journal of Climate Research*, 5(3), 189-201 (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, *J. Korean Geograph. Soc.*, 43(5), 681-700 (in Korean).
- Choi, Y., 2002, Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern regions of Korea, *Korea Soc. Environmental Impact Assessment*, 11, 189-203 (in Korean).
- Ho, C.-H., Lee, J.-y., Ahn, M.-H., and Lee, H.-S., 2003, A sudden change in summer rainfall characteristics in Korea during the late 1970s, *Int. J. Climatol.*, 23, 117-128.
- Hong, K.-O., Lee, J.-y., Ahn, M.-H., and Lee, H.-S., 2006, Temporal and spatial variations of precipitation in South Korea for recent 30 years(1976-2005) and geographic environments, *J. Kor. Earth Science Soc.*, 27, 433-449 (in Korean).
- Im, E.-S. and Ahn, J.-B., 2004, Analysis of relationship between Korean winter temperature variability and global circulation indices, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 40(4), 441-452 (in Korean).
- 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, Y.-K. and Lee, D.-K., 1993, Atmospheric variability and teleconnection patterns over Asia/North Pacific ocean during the Northern Hemisphere winter, Part I: Characteristics of the high and low frequency variability, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 29(4), 345-363 (in Korean).
- Jung, H.-S., Choi, Y., Oh, J.-H., and Lim, G.-H., 2002, Recent trends in temperature and precipitation over South Korea, *Int. J. Climatol.*, 22, 1327-1337.
- Kang, I.-S., 1988, Recurrent tropospheric circulation anomalies in the Northern Hemisphere associ-

- ated with fluctuations of winter monthly-mean temperature in Korea, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 24, 1-15 (in Korean).
- Kang, I.-S. and Baek, H.-J., 1993, Long-range prediction of winter monthly-mean temperature in Korea, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 29, 253-262 (in Korean).
- Kim, H.-J. and Ahn, J.-B., 2010, The large-scale atmospheric circulation related to Korea winter temperature variability, *Journal of Climate Research*, 5(2), 118-130 (in Korean).
- Kim, M.-K., Kang, I.-S., and Kwak, J.-H., 1999, The estimation of urban warming amounts due to urbanization in Korea for the recent 40 years, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 35(1), 118-126 (in Korean).
- Kim, M.-K., Kang, I.-S., and Ho, C.-H., 2000, Scenario of Korean winter precipitation using large-scale predictors of a gradual CO₂ increasing experiment, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 36, 65-74 (in Korean).
- Ko, J.-W., Kwon, W.-T., and Kim, Y.-H., 2009, Analysis on characteristics of climate and its trends of changes in the southwestern region of Korea, *Journal of Climate Research*, 4(1), 14-29 (in Korean).
- Lee, B.-S., 1985, Regular temperature fluctuations and the singularity in winter, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 7(1), 34-45 (in Korean).
- Lee, D.-K., Kim, S.-S., Park, S.-U., and Jeong, Y.-K., 1988, An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation associated with the cold winter and the warm winter of Korea. Part I: stationary wave, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 24, 16-35 (in Korean).
- NIMR, 2004, *Climate of Korea*, NIMR (in Korean).
- Park, B.-I., 2011, The change of seasonal trend appeared in wintertime daily mean temperature of Seoul, Korea, *J. Korean Geograph. Soc.*, 46(2), 152-167 (in Korean).
- Ryoo, S.-B., Moon, S.-E., and Cho, B.-K., 1993, Air temperature change due to urbanization in South Korea, *J. Korean. Meteor. Soc.*, 29, 99-116 (in Korean).
- Ryoo, S.-B. and Kwon, W.-T., 2002, Climatic characteristics of cold winter over South Korea, *Atmosphere*, 12(1), 288-291 (in Korean).
- Ryoo, S.-B., Kwon, W.-T., and Jhun, J.-G., 2004, Characteristics of wintertime daily and extreme minimum temperature over South Korea, *Int. J. Clim.*, 24, 145-160.
- Thomson, D. J., 1995, The seasons, global temperature, and precession, *Science*, 268, 59-68.
- Yang, S., Lau, K.-M., Yoo, S.-H., Kinter, J.L., Miyakoda, K., and Ho, C.-H., 2004, Upstream subtropical signals preceding the Asian summer monsoon circulation, *J. Climate*, 17, 4213-4229.

책임 편집: 허인혜

영문 교열: 이은걸