동아시아의 겨울철 일평균 기온 변화에 나타난 계절 내 변동 유형의 종관 특성

박병익

서울대학교 지리교육과

(2017년 3월 9일 접수, 2017년 3월 26일 수정, 2017년 3월 27일 게재 확정)

Synoptic Characteristics of Intra-seasonal Fluctuation Patterns Appeared in Wintertime Daily Mean Temperature Change in East Asia

Byong-Ik Park

Department of Geography Education, Seoul National University

(Received 9 March 2017, Revised 26 March 2017, Accepted 27 March 2017)

Abstract : In this paper, for selected station of 8 clusters in East Asia (Park, 2017) more (less) warming periods than the wintertime mean warming of intra-seasonal fluctuation curves were taken and their means were computed. Long term trends and synoptic features of the mean temperature changes were examined. In most clusters, around the third of January there were less warming periods (LWP) than the mean wintertime warming. On the contrary, in February and the first and second of January there were more warming periods (MWP) than the winter mean or LWPs having a warming trend with statistical significance. Time series of the daily Siberian High indices showed they had been weakening in February and being stagnant around late January. In most stations, the mean temperatures of MWP or LWP had large negative correlation coefficients with the Siberian high intensity. This result explains the occurrences of MWPs in most clusters in February and LWPs in late January. In cluster B there were LWPs in early February due to the influence of the Aleutian Low which were strengthening in that periods. Cluster E showed different features without LWPs in late January. The cluster is considered to be affected by its plateau environment of West Yunnan and the Tibet Plateau which prevent cold air of the lower atmosphere in Northern Asia flowing southward, and by the regional atmospheric circulation of 500hPa surface centered in this region.

Key Words : intra-seasonal fluctuation, patterns of intra-seasonal fluctuation, wintertime temperature change, more warming period, less warming period, East Asia, synoptic analysis

주요어 : 계절 내 변동, 계절 내 변동 유형, 겨울철 기온 변화, 고 상승 시기, 저 상승 시기, 동아시아, 종관분석

1. 서론

평균적으로 동아시아의 겨울철에는 강한 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 나타나고, 북위 30도 이북에는 북서풍이 그 이남에는 북동풍이 뚜렷하게 나타난다(Zhang *et al.*, 1997 등). 시베리아 고기압의 발달과 남으로의 확장은 동아시아의 한파발생과 기온 변화와 밀접한 관련이 있으며(Zhang *et al.*, 1997; Gong *et al.*, 2001; Gong and Ho, 2002; Wang and Chen, 2010; Park *et al.*, 2011 등), 알류산 저기압의 위치와 강도는 시베리아 고기압과 함께 한국을 중심으로 하는 동아시아의 기후에 영향을 준다(Park, 2011, Kim *et al.*, 2014; Choi, 2015 등). 동아시아의 기후에 영향을 미치는 것으로는 이외에 북극진동(AO), 엘니뇨, 북대서양진동(NAO) 등이 있다(Gong *et al.*, 2001; Gong and Ho, 2002; Park *et al.*, 2011; Yoo *et al.*, 2015 등).

우리나라의 겨울철 기온 변화에 관한 종관 특성 연구는 크게 3가지로 구분될 수 있다. 하나는 월평균 혹은 계절 평균 기온과 대규모 대기순환과의 관련성에 관한 것이고(Kim and Ahn, 2010; Lim *et al.*, 2012; Yoo *et al.*, 2015 등), 또 하나는 기온이 매우 낮았거나 높았던 겨울 등 특색이 있는 겨울철의 기온 변화와 대기순환과의 관련성을 살펴본 것이며(Lee *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2016 등), 세 번째는 한파 등과 같은 특색이 있는 사례들에 대한 연구이다(Ryoo *et al.*, 2005; Shin *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2011; Min *et al.*, 2015 등). 이런 연구들로 우리나라 겨울철의 월(혹은 계절) 평균 기온 또는 한파 발생 등은 시베리아 고기압의 강도변화, 북극진동 등의 대규모 대기순환과 밀접한 관련이 있다는 것 등이 밝혀졌다. 그러나 월보다 짧은 기간의 기온 변화 혹은 겨울철 기온의 계절 내 변동 등에 관한 연구는 많지

않다. Park(2011)은 서울의 일평균 기온 변화에 계절 내 변동이 있으며 이는 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 변화와 관련이 크다는 것을 밝혔다. Choi(2015)는 1980년대 중반 이후 겨울철 전반기에는 강한 남북 순환 패턴이, 후반기에는 동서 순환 패턴이 탁월하게 나타나 후반기의 기온 상승이 뚜렷하게 나타난 점을 밝혔다.

시베리아 고기압의 강도는 보통 월 혹은 계절 평균 해면기압(sea level pressure, SLP)으로 구해지나(Gong *et al.*, 2001; Wu and Wang, 2002; Kim *et al.*, 2013 등) 한파(cold surge 혹은 cold wave)의 연구에서는 일평균 해면기압으로 계산하기도 한다(Park *et al.*, 2008; 2011; Ou *et al.*, 2015 등). 그런데 시베리아 고기압의 강도는 평균적으로 시베리아 고기압이 강한 지역의 평균 해면기압으로 흔히 계산하는데, 연구자에 따라 지역의 범위에 미묘한 차이를 보인다. 일부 연구자들은(Gong *et al.*, 2001; Jhun and Lee, 2004 등) 시베리아 고기압 강도를 동아시아 겨울철 몬순 지수로 규정하기도 하는데, 중국 동부의 기온과 밀접한 관련이 있다고 한다(Gong *et al.*, 2001).

한국의 겨울철 기온 변화에는 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 영향을 미치는데(Park, 2011; Lim *et al.*, 2012 등) 비해 중국 동부의 경우 시베리아 고기압과의 관계가 밀접하다. 중국의 북서부 지역은 시베리아 고기압의 영향권에 있고 알류산 저기압 지역에서 멀리 있으므로 이 저기압의 영향은 적을 것으로 보이는데, 다른 지역의 경우는 어떤 영향을 받고 있는지에 대한 종합적인 평가가 모두 이루어진 것은 아니다.

이 연구에서는 겨울철 계절 내 변동 특성이 유사한 지역별 클러스터를 구분한 결과를 바탕으로(Park, 2017) 각 군집의 대표 지점에서 겨울철 기온변화가 잘 나타나는 시기의 종관 특성을 살펴보기로 한다. 구체적으로는 먼저 대표지점의 계절

내 변동에서 겨울철 평균보다 기온이 더 상승한 시기(고 상승 시기)와 적게 상승하거나 하강한 시기(저 상승 시기)의 평균기온의 변화경향을 조사하여 군집 간의 차이를 살펴본다. 다음에 많은 군집에서 공통적으로 나타나는 고 상승 시기와 저 상승 시기의 기온 변화와 시베리아 고기압 강도 지수, 알류산 저기압 강도 지수 등과의 관련성을 조사하여 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 영향이 동아시아의 여러 지역에서 어떻게 나타나는지를 살펴볼 것이다. 이들 지수들은 동아시아의 넓은 지역에 큰 영향을 미치므로(Gong and Ho, 2002 등) 많은 군집에서 공통적으로 나타나는 기온변화와는 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 그러나 이들 지수로도 설명이 되지 않는 경우에는 고(저) 상승 시기의 평균기온과 해면기압(SLP), 상층의 지위고도, 바람 등과의 상관계수를 조사하여 종관 특성을 살펴본다.

2. 연구자료 및 방법

이 연구에서 사용한 자료는 다음과 같다. 먼저 동아시아의 96개 지점의 일평균자료를 daily GHCN(Global Historical Climatology Network)에서 얻었다. 대부분의 지점에서 일평균기온은 1951년부터 사용할 수 있다. 해면기압과 상층자료는 NCEP/NCAR의 재분석자료(reanalysis data)에서 구하였다.¹⁾ 재분석자료는 1948년 1월 1일부터 이용할 수 있으며, 경위도 2.5도 간격의 해상도를 가진다.

연구방법은 다음과 같다. Park(2017)에서 구한 각 군집에서 대표 지점을 선정²⁾, 기온변화의 계절 내 변동 곡선을 구하고 이 변동곡선에서 겨울철 평균보다 많이 상승한 시기(고 상승 시기)와 적게 상승한 시기(저 상승 시기)를 구한 다음 각 시기의

평균기온을 1951년부터 2013년에 대해 계산하여 선형회귀분석으로 그 변화경향을 구한다.

겨울철(11월 1일~3월 31일)에 대해 일별 시베리아 고기압 지수와 알류산 저기압 지수를 1951년부터 2013년까지 구한 후 선형 회귀분석으로 이 지수들의 일별 변화경향을 계산한다. 이 지수들이 시간과 함께 약화되는 시기와 강화 혹은 정체되는 시기를 중심으로 위에서 구한 대표 지점의 고(저) 상승 시기의 평균기온 변화와의 관련성을 조사한다. 특히 많은 군집에서 공통적으로 저 상승 시기가 나타났던 1월 하순 경과 그 전후의 고 상승 시기(Park, 2017)를 중심으로 지수들과 평균기온의 변화 경향의 관련성을 살펴본다. 그리고 이 지수들로 설명이 되지 않는 경우는 평균기온과 해면기압, 등압면(850hPa, 500hPa)의 지위고도와 바람 등과의 상관계수를 계산, 그 분포도를 작성하여 평균기온의 변동과 대기 순환과의 관련성을 조사한다. 이 경우 상관계수가 높은 지역에 대해 해당 변수(해면기압, 500hPa면 지위고도 등)의 평균값의 변화경향도 살펴본다.

시베리아 고기압 지수는 시베리아 고기압이 평균적으로 강한 지역의 평균 해면기압으로 구하는데, 여기서는 Wu and Wang(2002)의 기준을 따라 40–60°N, 80–120°E 지역의 평균 SLP로 한다. 이와 같이 시베리아 고기압 지수를 구한 예는 Park *et al.*(2008), Kim *et al.*(2013) 등이 있다. 알류산 저기압 지수는 이 저기압이 자주 나타나는 지역의 평균 SLP로 구하는데, 여기서는 Kim *et al.*(2013, 2014)를 따라 40–60°N, 160°E–160°W의 평균 SLP로 하였다. 이들은 모두 일평균 SLP로 계산하였다.

3. 군집 대표지점의 고 상승 시기와 저 상승 시기 평균 기온의 변화 특성

먼저 Park(2017)에서 구한 각 군집에서 대체로 중심 부근에 위치한 대표 지점을 선정하였다(Figure 1). 선정된 지점들은 창춘(S29, 군집 A1), 병부(S77, 군집 A2), 모리오카(S92, 군집 B), 우루무치(S10, 군집 C), 간저우(S76, 군집 D), 리징(S49, 군집 E), 명지(S54, 군집 F), 인촨(S20, 군집 G)이다.

군집 A1에 속하는 창춘(S29)의 계절 내 변동 곡선을 보면(Figure 2의 실선), 전체적인 기온 상승이 뚜렷하게 나타난다. 1951~1980년(전기)보다 1981~2010년(후기)에 기온이 하강한 시기는 11월 초순, 중순, 하순, 12월 중순의 일부뿐이다. 후기의 기온 상승이 두드러진 시기는 1월 29일에서 3월 15일까지이고, 그 외에 겨울철 평균보다 더 상승한 시기(고 상승 시기)는 12월 21~28일, 1월 15

~21일 등이고 평균보다 적게 상승한 시기(저 상승 시기)는 11월 24일~12월 20일, 12월 29일~1월 14일, 1월 22~28일 등이다.

창춘에서 가장 뚜렷한 고 상승 시기는 1월 29일에서 3월 15일인데, 이 시기의 평균 기온의 시계열을 보면(Figure 3) 전체적으로 기온 상승이 잘 나타난다. 기온 상승률은 $0.75^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 이고 이 겨울기의 유의확률은 0.000이다. 이에 비해 평균보다 적게 상승한 저 상승 시기인 1월 22일에서 1월 28일까지의 평균기온의 시계열을 보면(Figure 4) 평균기온은 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 비율로 상승하고 있으나 통계적으로 유의하지 않다. 창춘의 다른 고 상승 시기와 저 상승 시기의 평균기온의 회귀계수를 Table 1에 제시한다.

군집 A2에 속하는 병부(S77)의 계절 내 변동 곡선(Figure 5의 실선)을 보면 고 상승 시기가 창춘(Figure 2)에 비해 짧다. 고 상승 시기는 11/22~28, 12/25~1/17, 2/5~18, 3/4~16 등이고 저 상승

Figure 1. Selected stations (point with red circle) from each cluster (A1, A2, B, ..., G). For numbers and names of all stations and clusters, refer to Park (2017).

Figure 2. Temperature differences of two daily normals (dashed line) and synthesized harmonics (solid line) of Changchun (cluster A1) for 1951~1980 and 1981~2010. Thick dashed line denote the mean differences between synthesized harmonics for the period from 1 Nov. to 31 Mar.. Solid line is defined as a intra-seasonal fluctuation of temperature change.

Figure 3. Time series of mean temperature of the period (29 Jan. to 13 Mar.) which are more warming than winter season mean warming of Changchun (S29) in cluster A1. Dashed line is linear regression line with its formula.

시기는 11/13~21, 12/16~24, 1/18~28, 2/19~3/3 등이다(Table 2). 병부에서는 1월 하순의 저 상승 시기가 뚜렷하게 나타나며, 2/19~3/3의 저 상승 시기의 평균기온은 통계적으로 유의하게 상승

하고 있다(Figure 6).

군집 B의 모리오카(S92)의 계절 내 변동 곡선(Figure 7)을 보면 기온 상승폭이 군집 A1, A2에 비해 작고, 전기(1951~1980년)에 비해 후기(1981

Figure 4. Time series of mean temperature of the period (22 Jan. to 28 Jan.) which are less warming than winter season mean warming of Changchun (S29) in cluster A1. Dashed line is linear regression line with its formula.

Table 1. Features of MWP and LWP of Changchun (S29, cluster A1).

Division	Period	Reg. Coef.
LWP	11/24~12/20	0.005
MWP	12/21~12/28	0.051
LWP	12/29~1/14	0.030
MWP	1/15~1/21	0.065*
LWP	1/22~1/28	0.024
MWP	1/29~3/15	0.086**

LWP: less warming period than winter mean warming

MWP: more warming period than winter mean warming

Reg. Coef.: regression coefficient of simple linear regression line

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

~2010년)에 기온이 하강한 시기도 많이 나타난다. 고 상승 시기와 저 상승 시기의 평균기온의 기온변화 경향을 보면(Table 3) 12/11~20일의 저 상승 시기의 회귀계수가 음수로 나타난다. 5% 유의수준에서 유의한 시기는 11/8~15일, 1/17~23일뿐이다.

군집 C의 우루무치(S10)의 계절 내 변동 곡선을 보면(Figure 8) 전기에 비해 후기의 기온이 하강한 시기가 나타나지 않으며 겨울철 평균 기온 상승

폭이 매우 크다(2.36℃). 고 상승 시기는 12/18~1/16, 1/28~2/22로 길게 나타나며 저 상승 시기는 11/22~12/7, 1/17~1/27, 3/9~3/31 등이다. 이들 시기의 평균 기온의 회귀계수를 보면(Table 4) 고 상승 시기들은 유의수준 1%에서 기온 상승이 유의하며 저 상승 시기 11/22~12/17의 평균기온도 유의 수준 5%에서 기온 상승이 유의하다.

군집 D의 간저우(S76)의 계절 내 변동 곡선을 보면(Figure 9) 후기에 기온이 하강한 시기가 많이

Figure 5. Same as in Figure 2 except for Bengbu (cluster A2).

Figure 6. Same as in Figure 4 except for Bengbu in cluster A2 and period (19 Feb. to 3 Mar.).

Table 2. Same as Table 1 except for Bengbu (S77, cluster A2).

Division	Period	Reg. Coef.
LWP	11/13~11/21	0.002
MWP	11/22~11/28	0.034*
LWP	12/16~12/24	0.004
MWP	12/25~1/17	0.028*
LWP	1/18~1/28	0.014
MWP	2/5~2/18	0.038*
LWP	2/19~3/3	0.040*
MWP	3/4~3/16	0.048**

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

Figure 7. Same as in Figure 2 except for Morioka (cluster B).

Table 3. Same as Table 1 except for Morioka (S92, cluster B).

Division	Period	Reg. Coef.
MWP	11/8~11/15	0.033*
LWP	11/16~12/5	0.010
MWP	12/6~12/10	0.002
LWP	12/11~12/20	-0.009
MWP	12/21~1/11	0.012
MWP	1/17~1/23	0.027*
LWP	1/24~2/9	0.002
MWP	2/10~3/3	0.016
LWP	3/4~3/11	0.013
MWP	3/12~3/27	0.001

* significant at the 95% confidence level.

Figure 8. Same as in Figure 2 except for Wulumuqi (cluster C).

Table 4. Same as Table 1 except for Wulumuqi (S10, cluster C).

Division	Period	Reg. Coef.
LWP	11/22~12/17	0.056*
MWP	12/18~1/16	0.097**
LWP	1/17~1/27	0.030
MWP	1/28~2/22	0.084**
LWP	3/9~3/31	0.046

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

Figure 9. Same as in Figure 2 except for Ganzhou (cluster D).

나타나고 있어 겨울철 평균 기온 상승폭이 작음을 알 수 있다(평균 0.35℃ 상승). 1/20~29과 3/16~31의 저 상승 시기들이 두드러지게 나타나며 이 시기의 전후 혹은 앞에 고 상승 시기가 나타나고 있다. 고·저 상승 시기의 평균 기온의 회귀계수를 보면(Table 5) 회귀계수가 음수인 시기가 많이 나타나며 특히 1/20~29일의 회귀계수는 상당히 크다.

군집 E의 리징(S49)의 계절 내 변동 곡선을 보면(Figure 10) 앞에서 본 다른 군집의 계절 내 진동과는 다른 양상을 보이는데, 먼저 1월 하순의 저 상승 시기가 나타나지 않으며 12월 하순의 기온 하강이 겨울철 중 가장 크게 나타나는 점, 고 상승 시기와 저 상승 시기의 길이가 상당히 짧은 점 등이 다르다. 리징의 고 상승 시기 평균 기온은 기

온 상승 경향이 잘 나타난다(통계적으로 유의함, Table 6).

군집 F의 멩지(S54)의 계절 내 변동 곡선을 보면(Figure 11) 12월 하순, 1월 하순, 3월 상순에 저 상승 시기가 잘 나타나고 있으며 그 전후로 고 상승 시기가 나타난다. 또한 인근의 군집 D의 간저우와 마찬가지로 후기의 기온이 전기보다 낮아진 시기가 많이 나타난다. 고·저 상승 시기의 평균기온의 회귀계수를 보면(Table 7) 고 상승 시기에는 대체로 통계적으로 유의한 기온 상승이 나타나며 저 상승 시기인 12/1~10의 평균기온은 통계적으로 유의한 기온 상승이 나타난다.

군집 G에 속하는 인환(S20)의 계절 내 변동 곡선은(Figure 12) 12/23~1/18, 1/27~3/1의 고 상

Table 5. Same as Table 1 except for Ganzhou (S76, cluster D).

Division	Period	Reg. Coef.
MWP	11/21~12/5	0.036**
LWP	12/17~12/27	-0.010
MWP	12/28~1/8	0.019
LWP	1/20~1/29	-0.035
MWP	2/7~2/25	0.044*
LWP	3/16~3/31	-0.001

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

Figure 10. Same as in Figure 2 except for Lijing (cluster E).

Table 6. Same as Table 1 except for Lijing (S49, cluster E).

Division	Period	Reg. Coef.
MWP	12/9~12/19	0.029**
LWP	12/20~12/31	0.000
MWP	1/1~1/8	0.025*
MWP	1/14~2/1	0.023**
MWP	2/8~2/16	0.046**
LWP	3/1~3/8	0.015

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

승 시기가 잘 나타나며 저 상승 시기도 11월 상순과 중순, 1월 하순 경, 3월 상순에서 중순 등에 나타난다. 이들 시기의 평균 기온의 회귀계수를 보면(Table 8) 고 상승 시기의 평균 기온은 유의수준 1%로 유의하게 상승하고 있으며 저 상승 시기의

11/1~23, 3/2~19의 평균기온도 통계적으로 유의하게 상승하고 있다.

이상 8개 군집의 고 상승 시기, 저 상승 시기와 유의한 회귀계수를 정리하면 Figure 13과 같다. 군집 E를 제외하면 1월 하순경에 저 상승 시기가 나

Figure 11. Same as in Figure 2 except for Mengzi (cluster F).

Table 7. Same as Table 1 except for Mengzi (S54, cluster F).

Division	Period	Reg. Coef.
LWP	11/1~11/18	0.008
MWP	11/19~11/30	0.029*
LWP	12/1~12/10	0.026*
MWP	12/11~12/18	0.035*
LWP	12/19~12/31	0.004
MWP	1/1~1/21	0.025
LWP	1/22~1/28	0.005
MWP	2/9~3/1	0.044**
LWP	3/2~3/10	-0.002

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

Figure 12. Same as in Figure 2 except for Yinchuan (cluster G).

Table 8. Same as Table 1 except for Yinchuan (S20, cluster G).

Division	Period	Reg. Coef.
LWP	11/1~11/23	0.028*
LWP	12/16~12/22	0.035
MWP	12/23~1/18	0.056**
LWP	1/19~1/26	0.030
MWP	1/27~3/1	0.061**
LWP	3/2~3/19	0.043**

*, ** significant at confidence level 95%, 99% respectively.

Figure 13. Summary of MWP (red bar) or LWP (blue bar) for 8 clusters. *, ** are significant at confidence level 95%, 99% respectively, + shows warming trend in mean temperatures of that period.

타나며, 군집 B를 제외하면 2월 전체에서 고 상승 시기 혹은 유의한 기온 상승이 나타난다. 또한 1월 상순과 중순에는 대체로 고 상승 시기가 많이 나타난다(군집 A1 제외). 그 외의 시기에는 고 상승 시기와 저 상승 시기가 혼재하고 있다. 따라서 전체 군집의 기온 변화에 영향을 미치는 대기 순환의 특성이 있을 것이라고 생각할 수 있다.

많은 군집에서의 공통성이 잘 나타나는 1월과 2월만을 살펴보면 1월 전반부에 군집 A1이, 1월 하

순에 군집 E가, 2월 상순에 군집 B가 인접 군집과는 다른 양상을 보인다. 군집 B는 바다의 영향이 강할 수 있다는 점에서, 군집 E는 해발고도가 높다는 점에서 다른 군집과 차별화될 수 있다. 그러나 군집 A1은 비록 특정 시기이지만 인접한 군집 A2와 다른 양상을 보이는데 이는 흥미로운 연구 주제로 보인다. 다른 달에서도 대체로 인접한 군집 사이에는 유사성이 보이나 11월 상순과 중순, 3월 하순에는 차이가 많이 나타난다.

4. 고 상승 시기와 저 상승 시기의 평균 기온 변화의 종관 특성

여기서는 먼저 1월과 2월에 대해 시베리아 고기압 지수의 변화와 각 군집의 고(저) 상승 시기의 관련성을 살펴본다. 다음으로 시베리아 고기압 지수로 설명이 잘 되지 않는 군집 B의 저 상승 시기와 군집 E의 고 상승 시기의 종관특성을 살펴볼 것이다.

동아시아의 기온 변화에 시베리아 고기압, 알류산 저기압은 매우 큰 영향을 미치므로(Gong *et al.*, 2001; Wu and Wang, 2002; Lim *et al.*, 2012 등) 먼저 시베리아 고기압 지수, 알류산 저기압 지수를 계산, 이들의 일별 평균과 회귀계수를 구하였다.

일별 평균 시베리아 고기압 지수는(Figure 14a) 11월 상순에 크게 커지고 이후 점차 증가하여 12월 하순에서 2월 초까지 가장 큰 값을 보인다. 이 지수는 이후 급격하게 감소하는데, 2월 상순, 3월

Figure 14. a) Daily mean Siberian High index, b) daily mean Aleutian Low index for 1952-2013. The Siberian High index is area mean SLP of 40-60°N, 80-120°E, and the Aleutian Low index is area mean SLP of 40-60°N, 160°E-160°W. Dashed lines are moving average of 5 days.

Figure 15. Daily regression coefficient of the Siberian High index for 1952-2013. Dashed line is moving average of 5 days.

중순, 하순에 큰 변동을 보인다. 일별 평균 알류산 저기압 지수를 보면(Figure 14b) 2월 상순에 기압이 가장 낮아져 매우 강한 저기압이 형성되고 있음을 알 수 있다. 이 저기압은 11월부터 계단상으로 강해져 1월 중순에서 2월 상순까지가 최대 강도를 보인다. 이후 이 저기압은 급격하게 약화되고 있다.

시베리아 고기압 지수의 일별 회귀계수를 보면(Figure 15) 전체적으로 이 지수가 낮아지고 있어 시베리아 고기압이 약화되고 있다는 기존 연구와 일치한다(Kim *et al.*, 2005). 시베리아 고기압 지수가 낮아지는 시기를 보면 11/18~12/5, 12/20~1/4, 1/10~1/21, 2/2~3/10 등이며, 높아지는 시기는 11/10~17, 12/6~19, 3/11~17 등이다.

시베리아 고기압 지수가 낮아지는 시기에 고 상승 시기가 나타나는 군집들의 대표로 군집 A2의 경우를 살펴보기로 한다. 병부의 고 상승 시기의 평균기온과 해면기압과의 상관계수를 보면(Figure 16a) 바이칼 호 부근 지역에서 중국의 화중 지방에 이르는 넓은 지역에서 매우 큰 음의 상관계수가 나타나며 알류산 저기압이 자주 나타나는 지역에서

는 양의 상관계수가 나타나지 않는다. 병부의 기온이 낮을 경우 시베리아 고기압이 발달하고 또 남쪽으로 확장되고 있고 850hPa 면에서는 북동풍이 불 것으로 예상된다(Figure 16b). 이 북동풍은 고위도에서 발달한 850hPa면의 시베리아 고기압 남쪽에 나타난다(그림 생략). 기온이 높은 경우 시베리아 고기압이 약하고 남쪽으로의 확장도 나타나지 않고 850hPa 면에서는 서풍이 불 것으로 예상된다. 이는 이 지역의 기온에 시베리아 고기압의 강도가 매우 큰 영향을 미치나 알류산 저기압은 거의 영향을 미치지 못하는 것을 보여준다. 또 이 시기에 시베리아 고기압의 강도가 약화되고 있으므로(Figure 15) 병부의 기온이 상승할 것이 예상된다. 이 군집의 다른 사례와 다른 군집의 다른 사례들을 살펴본 결과 대체로 고(저) 상승 시기의 평균기온과 시베리아 고기압 중심 부근의 SLP와는 큰 음의 상관계수를 보여 시베리아 고기압의 영향을 잘 보여준다(그림 생략).

시베리아 고기압 지수가 뚜렷하게 낮아지는 기간인 2/2~3/10에 각 군집의 고 상승 시기와 저 상승 시기, 각 시기의 평균기온의 유효한 변화경향

Figure 16. a) Correlation between the mean temperature of Bengbu (cluster A2) and the SLP for the MWP 2/5-18. b) as in a) but for the 850hPa wind. Thick contours and shaded areas are significant at 95% confidence level. Red circle show the location of Bengbu.

을 보면(Figure 13) 대체로 이 기간에 평균 기온의 상승이 잘 나타나는데, A2와 G 군집의 경우 저 상승 시기가 이 기간에 나타나나 평균기온은 상승하고 있다. 군집 B, E, F에서 저 상승 시기가 나타나 시베리아 고기압 외에 기온 변화에 영향을 미치는 요인이 있다고 판단된다.

시베리아 고기압이 약화되고 있는 2월에 저 상승 시기가 나타나는 군집 B의 사례를 살펴보자. 군집 B에 속하는 모리오카의 저 상승 시기인 1/24~2/9의 평균기온과 해면기압(SLP), 850hPa 면의 바람과의 상관계수 분포를 보면(Figure 17) 시베리아 고기압의 영향이 크다는 것을 알 수 있

Figure 17. Same as Figure 16 except for Morioka (cluster B) and the LWP 1/24-2/9.

Figure 18. Same as in Figure 16 except for the Aleutian Low index.

Figure 19. a) Correlation between the mean temperature of Lijing (cluster E) and the geopotential height of 500hPa surface for the MWP 1/14-2/1. b) as in a) but for the 500hPa wind. Thick contours and shaded areas are significant at 95% confidence level. Red circle show the location of Lijing.

며 동시에 일본 동쪽의 해면기압과의 양의 상관도 나타난다. 850hPa 면의 바람장과의 상관계수를 보면 일본 동쪽의 큰 고기압성 회전이 나타나는데, 이는 모리오카의 기온이 하강할 경우 이 지역에 강력한 저기압이 형성, 북풍 계열의 바람이 나타난다는 것을 의미한다. 이 저 상승 시기의 기온변화는 시베리아 고기압 지수의 변화로는 전체를 설명

할 수 없으나 1월 하순의 경우는 시베리아 고기압이 약화되지 않으므로 모리오카의 기온 상승을 억제할 수 있다고 생각된다.

알류산 저기압 지수의 회귀계수를 보면(Figure 18) 1월 30일부터 2월 13일까지 기압이 낮아지고 있으므로, 즉 이 저기압이 강화되고 있어 모리오카 지역에 북풍이 강하게 불어올 것이므로 이 지

역의 기온이 하강하는 것이라고 판단된다. 따라서 모리오카의 저 상승 시기의 기온은 그 전반부는 시베리아 고기압의 정체에 의해, 후반부는 알류산 저기압의 강화로 저 상승 시기가 나타나는 것이라고 볼 수 있다.

1월 하순에 고 상승 시기가 나타나는 군집 E의 리징을 살펴보기로 한다. 리징은 해발고도 2,394m에 위치하므로 해면기압이나 850hPa 면의 고도는 의미가 없어 고 상승 시기 1/14~2/1의 평균기온과 500hPa 면의 고도(Z500)의 상관계수를 구하였다(Figure 19a). 상관계수를 보면 티베트 고원의 남쪽, 중국의 남서지역을 중심으로 양의 상관, 바이칼 호 동쪽을 중심으로 음의 상관역이 나타난다. 기온이 하강할 때에는 바이칼 호 부근에 고기압과 고기압성 회전이 나타나며(Figure 19b), 중국의 남서지방에는 저기압성 회전이 나타난다. 기온이 상승할 때에는 중국 남서지역의 고도가 높아져 고기압성 회전이 나타나며 리징 부근에 약한 북서

풍이 불어올 것으로 예상된다. 우리나라 부근에서와 같이 북서풍이 불면 기온이 하강할 것이라는 논리는 여기에서는 통용되지 않는 것 같다. 티베트 고원 북쪽의 기류와 분리된 북서풍과 고기압성 회전(Figure 19b)은 이 지역 기온의 상승에 기여하는 것으로 보인다. 상관계수가 높은 지역(Figure 19의 리징 부근)의 500hPa 면의 평균고도의 시계열을 보면(Figure 20) 이 지역의 고도는 유의하게 상승하고 있어(유의확률 0.028) 이 지역에 고기압성 회전이 강화되어 기온이 상승하는 것이라고 볼 수 있다.

이상으로 1월 하순의 저 상승 시기와 그 전후의 고 상승 시기가 대부분의 군집에서 나타나는데, 이를 시베리아 고기압 지수의 변화로 설명할 수 있다. 다만, 군집 B의 경우 알류산 저기압의 영향도 나타나며, 군집 E의 경우 대기 중층의 순환 특성과 국지적인 지형 특성의 영향을 받는다고 할 수 있어 다른 군집과는 다른 양상을 보인다. 또한 이

Figure 20. Time series of mean geopotential height (thin solid line) of 500hPa surface over the Southwest China (22.5-30°N, 92.5-107.5°E). Dashed line is 5 year moving average, Thick dashed line is linear trend line with a formula.

연구에서 얻어진 모리오카의 결과는 Park(2011)의 연구 결과와 부합하고 있다.

5. 요약 및 결론

이 연구에서는 Park(2017)이 구한 8개 군집 별로 대표 지점을 선정, 대표 지점의 1951~1980년, 1981~2010년 평균 기온의 제1~36 합성파의 차이로 정의된 기온변화의 계절 내 변동을 구하고, 이 변동에서 겨울철 평균 기온상승보다 많이 상승한 고 상승 시기, 적게 상승한 저 상승 시기를 선정, 각 시기의 평균기온의 경년변화를 살펴보았다. 그리고 고 상승 시기와 저 상승 시기의 평균기온의 변화와 시베리아 고기압 지수, 알류산 저기압 지수 등과의 관련성을 1월 하순과 그 전후의 시기를 중심으로 살펴보았다. 그리고 이들 지수로 설명이 되지 않는 경우 기온 변화에 영향을 미치는 종관 특성을 살펴보았다. 얻어진 결과들은 다음과 같다.

1월 하순에 대부분의 군집에서 저 상승 시기가 나타나고 그 전후의 시기에 고 상승 시기가 나타났다. 다만 군집 E의 경우 1월 하순에 고 상승 시기가 나타나 다른 군집과는 다른 특성을 보였고, 군집 B의 경우 2월 상순까지 저 상승 시기가 연장되고 있다.

2월에 군집 B를 제외하면 모든 군집에서 고 상승 시기 혹은 유효한 기온 상승이 나타나는데, 이는 시베리아 고기압 지수의 약화와 관련이 된다. 한국과 일본을 포함하여 바다의 영향이 강한 군집 B의 경우 2월 상순에 강화되고 있는 알류산 저기압의 영향으로 저 상승 시기가 연장되는 것으로 판단된다. 군집 E는, 아시아 북부 대기 하층 공기의 남하를 차단하고 있는 티베트 고원의 동부지역과 그 남쪽의 윈난 성 서부의 고원지역을 포함하고 있어 다른 군집과는 차별화된 환경을 보인다. 군집

E의 경우 1월 하순에 고 상승 시기가 나타나는데, 이 시기의 평균기온은 이 지역의 지형과 지역적인 대기 순환과 관련이 있는 것으로 나타났다.

또한 중국과 우리나라, 일본에 미치는 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 영향 정도가 다를 것으로 예상되는데, 이에 대한 연구도 동아시아의 기후 이해에 큰 도움이 될 것이다. 그리고 계절 내 변동과 저지 고기압, 북극진동 등과의 연관성을 조사하는 것도 흥미로운 주제가 될 것이다.

주

- 1) 재분석자료는 NOAA Earth System Research Laboratory의 Physical Sciences Division(PSD)의 웹 사이트 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>에서 내려받았다(download). 자료 제공에 감사드린다(Thanks for data).
- 2) 군집에 속하는 지점들의 30년 평균기온들을 겨울철에 대해 표시하고 이들의 평균기온 곡선도 나타낸 후 평균기온 곡선에 근접한 지점들을 중심으로 대표 지점을 선정하였다. 이때 군집의 평균 계절 내 변동 곡선과도 유사한 계절 내 변동 곡선을 보이는 지점을 우선적으로 선정하였다. 이 결과 대표 지점은 위도로 볼 때 대체로 군집의 중앙에 위치하는 경향이 있다.

참고문헌

- Choi, G., 2015, Asymmetric changes in intra-seasonal means and extreme events of winter temperature in the Republic of Korea, *Journal of Climate Research*, 10(2), 137-151 (in Korean).
- Choi, W., Jung, J., and Jhun, J.-G., 2013, Characteristic features observed in the East-Asian cold anomalies in January 2011, *Atmosphere*, 23(4), 401-412 (in Korean).
- Gong, D.-Y. and Ho, C.-H., 2002, The Siberian High and climate 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.
- Jeong, J.-H., Park, T.-W., Choi, J.-H., Son, S.-W., Song, K., Kug, J.-S., Kim, B.-M., Kim, H.-K., and Yim, S.-Y., 2016, Assessment of climate variability over East Asia-Korea for 2015/16 winter, *Atmosphere*, 26(2), 337-345 (in Korean).
- Jhun, J.-G. and Lee, E.-J., 2004, A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon, *Journal of Climate*, 17(4), 711-726.
- Kim, D. W., Byun, H. R., and Lee, Y. I., 2005, The long-term changes of Siberian high and winter climate over the northern hemisphere, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 275-283.
- 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, Y., Kim, K.-Y., and Jhun, J.-G., 2013, Seasonal evolution mechanism of the East Asian winter monsoon and its interannual variability, *Climate Dynamics*, 41(5).
- Kim, Y., Kim, K.-Y., and Park, S., 2014, Seasonal scale variability of the East Asian winter monsoon and the development of a two-dimensional monsoon index, *Climate Dynamics*, 42(7-8), 2159-2172.
- Lee, H.-S., Jhun, J.-G., Kang, I.-S., and Moon, B.-K., 2007, Characteristics of atmospheric circulation over East Asia associated with unusual climate of Korea in winter 2006/2007, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28(3), 374-387 (in Korean).
- Lim, S.-M., Yeh, 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).
- Min, S.-K., Son, S.-W., Seo, K.-H., Kug, J.-S., An, S.-I., Choi, Y.-S., Jeong, J.-H., Kim, B.-M., Kim, J.-W., Kim, Y.-H., Lee, J.-Y., and Lee, M.-I., 2015, Changes in weather and climatic extremes over Korea and possible causes: A review, *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(2), 103-121.
- Ou, T., Chen, D., Jeong, J.-H., Linderholm, H. W., and Zhou, T., 2015, Changes in winter cold surges over Southeast China: 1961 to 2012, *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(1), 29-37.
- 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, B.-I., 2017, Regional classification of intra-seasonal fluctuations appeared in wintertime daily mean temperature change in East Asia by cluster analysis, *Journal of Climate Research*, 12(1), 1-16 (in Korean).
- Park, T.-W., Jeong, J.-H., Ho, C.-H., and Kim, S.-J., 2008, Characteristics of atmospheric circulation associated with cold surge occurrences in East Asia: A case study during 2005/06 winter, *Advances in Atmospheric Sciences*, 25(5), 791-804.
- 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.
- Ryoo, S.-B., Kwon, W.-T., and Jhun, J.-G., 2005, Surface and upper-level features associated with wintertime cold surge outbreaks in South Korea, *Advances in Atmospheric Sciences*, 22(4), 509-524.
- Shin, S.-C., Kim, M.-K., and Lee, W.-S., 2006, Cold surges over Korean Peninsula associated with

- Arctic Oscillation and the role of heat source, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 27(3), 302-312 (in Korean).
- Wang, L. and Chen, W., 2010, How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon?, *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(4), 855-870.
- Wu, B. and Wang, J., 2002, Winter Arctic Oscillation, Siberian high and the East Asian winter monsoon, *Geophysical Research Letters*, 29(19), doi: 10.1029/2002GL015373.
- Yoo, Y.-E., Son, S.-W., Kim, H.-S., and Jeong, J.-H., 2015, Synoptic characteristics of cold days over South Korea and their relationship with large-scale climate variability, *Atmosphere*, 25(3), 435-447 (in Korean).
- Zhang, Y., Sperber, K. R., and Boyle, J. S., 1997, Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis, *Monthly Weather Review*, 125(10), 2605-2619.
- <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily>
https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep_reanalysis.html
- 책임편집: 허인혜
 영문교열: 조창현