

서울에서 겨울철 기온이 -5°C 이하인 날 수의 십년간 변동 특성

최재원[†] · 차유미 · 김정윤 · 박철홍

국립기상과학원

Interdecadal Changes in the Number of Days on Which Temperatures are not Higher Than -5°C in Winter in Seoul

Choi, Jae-Won[†], Cha, Yumi, Kim, Jeoung-Yun and Park, Cheol-Hong

National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

ABSTRACT

In the present study, the time series of the number of days on which temperatures were not higher than -5°C in winter in Seoul was analyzed. The results showed a decreasing tendency until recently. Statistical change-point analysis was conducted to examine whether climate regime shifts existed in this time series. According to the results, the number of days on which temperatures were not higher than -5°C in winter in Seoul drastically decreased since 1988. Therefore, to find out the reason for the recent decrease in the number of days, differences between the means of large-scale environments in winter during 1988~2010 and those during 1974~1987 were analyzed. In all layers of the troposphere, anomalous anticyclones developed in regions around the Korean Peninsula and thus the Korean Peninsula was affected by westerlies or south-westerlies. This was associated with the recent a little further northward development of western North Pacific subtropical high. Therefore, environments good for warm and humid air to flow into the Korean Peninsula were formed. To examine whether relatively warm and humid air actually flowed into the Korean Peninsula recently, temperatures and specific humidity in all layers in the troposphere were analyzed and according to the results the Korean Peninsula showed warm and humid anomalies. In the analyses of sensible heat net flux and maximum temperatures at a height of 2 m that can be felt by humans, the East Asia Continent including the Korean Peninsula showed positive anomalies.

Key words: Temperature, Seoul, Statistical Change-point Analysis, Climate Regime Shifts

1. 서 론

그 동안 수행된 한반도 기온변화에 관한 많은 연구들은 주로 계절 평균 및 연평균 기온의 변화에 초점을 맞춰왔다(Ryoo *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 1999). 그러나 IPCC(2001)은 평균 기온의 증가가 혹한일과 혹서일과 같은 특이 기온의 발생에 영향을 미칠 수 있음을 시사하고, 그에 대한 조사의 중요성을 언급하였다. 또한 홍수, 집중호우, 태풍, 혹한과 혹서, 한파와 열파 등 특이 기후의 변화 및 변동성에 관한 연구는 최근에 수행되고 있는 기후관련 연구의 주요 주제 중 하나이다. 특히 겨울철 특이 기온(혹한 및 한파)의 발생빈도는 기후변화와 관련

하여 최근에 연구 대상이 된 주요 기후 요소 중 하나이다. 국내에서는 Ryoo and Kwon(2002)이 겨울철 우리나라의 지역 평균 일 최저기온을 분석하여, 혹한일의 발생빈도와 계절 평균기온의 관계를 최근 조사하였다. 그들에 의하면 우리나라 겨울철 평균기온과 혹한일의 발생빈도의 선형 상관계수는 -0.89 로 아주 강한 음의 상관을 갖고 있었음을 보였다. 즉, 혹한일의 발생빈도가 높을수록 계절평균 기온이 낮은 한랭 겨울이 되고, 빈도가 낮을수록 기온이 높은 온난 겨울이 된다는 것이다. 그리고 이러한 선형관계는 한랭 겨울일수록 강해진다. 또한, 1980년 중반 이후 비정상적인 온난 겨울이 한반도에서 지속되었으며, 이런 온난 겨울의 지속은 혹한일의 발생감소와 관

[†] Corresponding author : choikiseon@korea.kr

Received December 14, 2015 / Revised January 15, 2016(1st), January 29, 2016(2nd) / Accepted February 5, 2016

련이 있음을 보였다.

한파는 갑작스런 기온 하강으로 인해 인명 및 시설물 피해를 발생시킬 수 있는 기상 현상으로, 인간생활과 밀접한 관련이 있다. 한파는 시베리아 고기압의 생성과 유지를 필요 조건으로 하며, 북극진동(Arctic Oscillation)으로 대표되는 광역규모 대기 순환과 밀접한 관련을 가지고 발생한다(Shin *et al.* 2006). Ryoo *et al.*(2004)은 한반도의 일 최저기온이 1980년대 중반 이후 상당한 양의 편차가 나타났고, 최저 기온이 -5.5°C 이하인 일수는 1971/72~1985/86년과 1986/87~2000/01년에 각각 276일과 123일로 1980년대 중반 이후에 2배 이상 감소하였다고 제시하였다. 1980년대 중반 이후 겨울기온의 급격한 증가에 대한 연구가 많이 진행되었다(Watanabe and Nitta, 1998; Wang and overland, 2009, Garfinkel, 2013). 이와 같이 상대적으로 안정적인 어떤 상태에서 또 다른 상태로 급격하게 변화하여 유지되는 현상을 “체제변환”이라 한다. 또한 Garfinkel(2013)은 1980년대 중반 겨울철 기온의 급격한 증가는 북극진동과 유사한 패턴에 지배적인 영향을 받았음을 제안했다. Jeong and Ho(2005)는 동아시아의 한파와 연관된 북극진동에 대하여 중국 192개 관측소, 한국 5개 관측소의 지상 기온 자료를 이용하여 알아보았다. 그 결과, 한파는 북극진동, 매든-줄리안 진동 등으로 대표되는 극 및 적도 지역의 광역규모 대기 순환과 밀접한 관련을 갖고 발생한다. Ding and Krishnamurti(1987)는 중국을 중심으로 하여 시베리아 고기압의 영향에 따른 열원과 열흡수원이 한파 발생의 필요조건인 시베리아 고기압의 수명과 연관이 있다는 것을 분석하였다. Kim *et al.*(2005)은 한반도에 영향을 주는 겨울 한파가 3~4일 전 바이칼호 부근에서 한랭핵이 형성되어 파동형태를 보이며, 중국을 거쳐 남동진하면서 발생한다고 하였다. 그리고 이 한랭핵의 이동 경로는 열흡수원의 이동경로와 유사하다. 아울러 한파에 영향을 주는 시베리아 고기압은 겨울 동안 하층 대류권에 열흡수원이 나타난다.

동아시아 한파는 시베리아 고기압의 강화와 지속적인 강한 북풍을 통해 고위도의 찬 공기를 지속적으로 동아시아에 가져와 급격한 온도 강하를 유도한다. 한파의 주요한 발생 기작은 대류권 상부의 파열과 밀접하게 관련되어 있다(Jeong *et al.*, 2006). 남동진하는 파열이 동아시아 해안의 상층골과 북서풍을 유도해 원래 있었던 차가운 시베리아 공기가 이루어 한파가 발생한다. 이 과정에서 시베리아 고기압 발달에 따른 차가운 공기가 파열과 상호작용하여 각각의 요소들을 더욱 발달시켜 한파를 발달, 지속시킨다(Takaya *et al.*, 2005a). 한파

의 또 다른 기작으로써, 북태평양의 고위도 지역에서 기원하는 블로킹이 시베리아 고기압의 발달과 한파 발생을 유도한다(Takaya *et al.*, 2005b). Park *et al.*(2014)에서는 계층적 클러스터링 방법을 이용해서 한파를 파열과 블로킹 형태로 분류하였다.

이 연구는 서울에서의 겨울철 -5°C 이하인 날 수의 빈도 추세를 조사하고, 추세변화의 원인이 되는 중관환경의 변화에 대해 조사하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

이 연구는 1974~2010년 동안 우리나라 서울에서 관측된 -5°C 이하인 날 수의 자료를 한국 기상청(Korea Meteorological Administration)으로부터 제공받아 사용하였다.

또한 이 연구는 미국 국립환경예측센터-국립대기과학연구소(National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)에서 제공하는 다음과 같은 변수를 가진 재분석 자료를 사용하였다(Kalnay *et al.*, 1996; Kistler *et al.*, 2001): 지위고도(gpm), 수평바람(m s^{-1}), 기온($^{\circ}\text{C}$), 비습(g kg^{-1}), 가강수량(kg m^{-2}) 및 전운량(%). 이 자료는 위·경도 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 및 연직 17층(비습은 8층, 가강수량 및 전운량은 단층)의 공간해상도로 구성되어 있다. 이 자료들은 1948년부터 현재까지 사용이 가능하다. 또한 가우시안 격자로 된 적설량(water equivalent of accumulated snow depth, WEASD, kg m^{-2})의 자료를 사용하였다. 이 자료는 1948년부터 사용 가능하다. 적설량 자료에 대한 자세한 설명은 Wu and Kirtman(2007)을 참고하기 바란다. 위의 재분석 자료들은 모두 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center(CDC)¹⁾에서 이용이 가능하다.

2.2 분석방법

이 연구에서 -5°C 를 기준값으로 정한 것은 Ryoo *et al.*(2004)의 연구에서 한반도의 일 최저기온의 장기변동을 보기 위해 이 기온을 정했기 때문이다.

두 평균 사이의 유의성 비교는 독립표본 *t*-검정(independent two-sample *t*-test)을 사용하였다. 두 독립변수의 시계열이 *t*-분포를 따르고, 표본의 평균이 각각 \bar{X}_1 , \bar{X}_2 로 정의될 경우, *t*-test의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

¹⁾ <http://www.cdc.noaa.gov/Datasets>

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{X_1, X_2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

여기서 두 집단의 표본분산이 동일하다는 가정하에 S_{X_1} , S_{X_2} 는 표준편차이고, n_1 , n_2 는 두 시계열에서 총 개수이다. 만약 위의 식으로부터 t 의 절대값이 유의수준의 문턱값보다 크게 산출되면, 귀무가설(null hypothesis)은 $\alpha(\times 100)$ %의 신뢰수준에서 기각되어 낮은 신뢰수준을 보이며, 기각되지 않으면 높은 신뢰수준을 보이는 것으로 정의된다(Wilks, 1995).

또한 본 연구에서 주어진 시계열에 대해 포아송 시점변화 분석(Poisson change-point analysis)이 적용되었다. 이 분석 방법을 적용하게 되면 t 값이 산출되는데 t 의 절대값이 가장 큰 해에 기후레짐이동이 존재한다는 것을 의미한다. 이 분석에 대한 좀 더 자세한 내용은 Elsner *et al.*(2000), Chu(2002), Ho *et al.*(2004)의 연구를 참고하기 바란다.

본 연구에서는 서울에서 -5°C 이하인 날 수의 감소추세 원인을 파악하기 위해 겨울철 대기환경에 대한 종관상태를 분석하였다. 본 연구에서의 겨울은 이전해 12월부터 당해 1, 2월을 의미한다. 예로 1994년 겨울은 1993년 12월과 1994년 1, 2월을 나타낸다.

3. 서울에서 -5°C 이하인 날 수의 시계열 분석

Fig. 1(a)는 서울에서 -5°C 이하인 날 수의 시계열을 나타낸 것이다. 전체적으로 감소하는 경향을 보이며(굵은 실선), 이 경향은 90% 신뢰수준에서 유의하다. 한편, 이 시계열에서 기후레짐이동(climate regime shift)이 존재하는지 알아보기 위해 이 시계열에 통계적 시점 변화 분석을 적용하였다(점선). 분석결과, 1988년에 가장 큰 t 값이 존재하였으며, 따라서 1974~1987년의 다빈도 기간과 1988~2010년의 소빈도 기간과 같이 전체 분석기간이 두 기간으로 나뉘어질 수 있었다. 이 결과는 베이시안 시점변화분석을 통해 1980년대 중반 이후로 우리나라 겨울철 기온이 급격히 상승하고 있다는 Lee *et al.*(2011) 및 Lee *et al.*(2013)의 연구와 일치한다. 서울에서 기후평균 -5°C 이하인 날 수는 39.5일로 1974~1987년 기간 동안에는 단지 3년(1978, 1981, 1982년)만이 기후평균 날 수를 넘지 못한 반면, 1988~2010년 기간 동안에는 단지 7년(1990, 1995, 1996, 1999, 2003, 2004, 2009, 2010년)만이 기후평균 날 수를 넘었다. 따라서 1974~1987년 기간 평균 날 수는 47.1일이며(파란색), 1988~2010년 기간 평균 날 수는 34.9일로(붉은색) 후자 기간의 날

수는 전자 기간의 날 수 보다 약 13일 적다. 이는 1988~2010년 기간의 겨울 평균온도가 1974~1987년 기간의 겨울 평균온도보다 높았음을 의미한다. 두 기간 사이에 -5°C 이하인 날 수의 평균차는 95% 신뢰수준에서 유의하다.

이렇게 서울에서 -5°C 이하인 날 수의 십년간 변동 특징은 이 날수에 대해 노말라이즈 된 시계열에서 좀 더 정확하게 볼 수 있다(Fig. 1b). 1974~1987년 기간 동안에 많은 해에서 0보다 큰 값을 가지는 반면, 1988~2010년 기간 동안에는 많은 해에서 0보다 작은 값을 가진다. 전자기간의 평균 값은 0.7이며(파란색), 후자기간의 평균값은 -0.4 로서(붉은색) 두 기간의 차는 1이상의 값을 나타낸다. 역시 두 기간 사이에 평균값 사이 차는 95% 신뢰수준에서 유의하다. 따라서 이 연구는 최근에 서울에서 -5°C 이하인 날 수가 감소하게 된 원인을 알아보기 위해 종관 환경에 대해 1988~2010년 기간의 겨울 평균과 1974~1987년 기간의 겨울 평균 사이에 차를 분석한다.

4. 1988~2010년 평균과 1974~1987년 평균 사이에 차

먼저 850 hPa 유선분석의 결과에서 북서태평양에는 거대한 고기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다. 한편, 한반도는 중국 북부지역에 중심을 두고 있는 저기압 아노말리에 의해

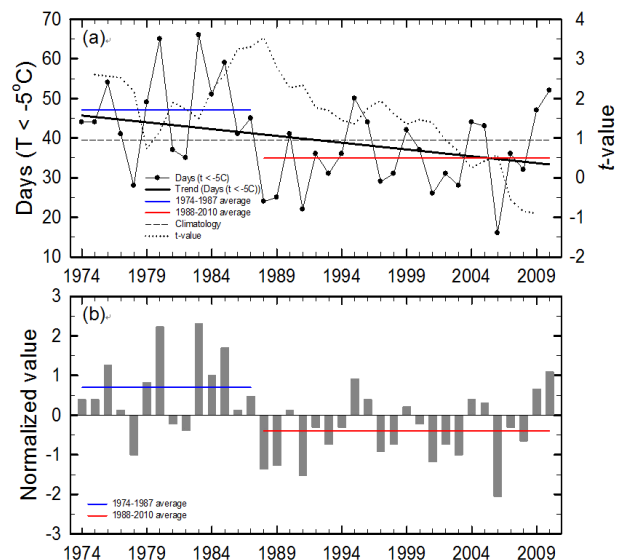
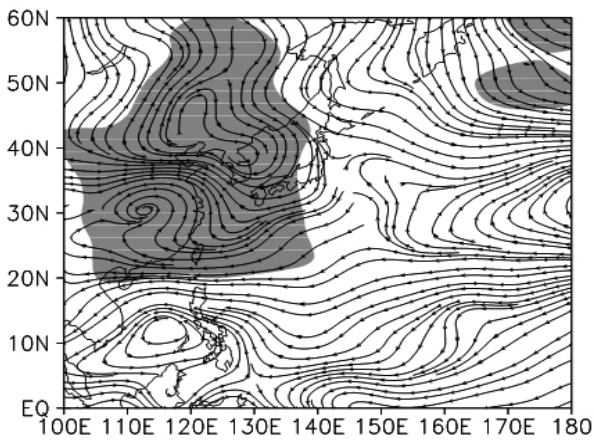
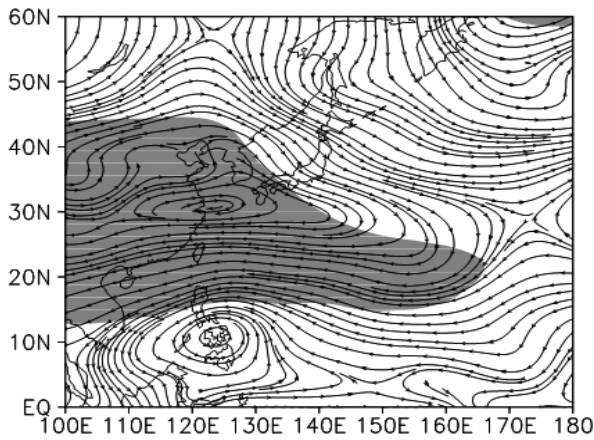


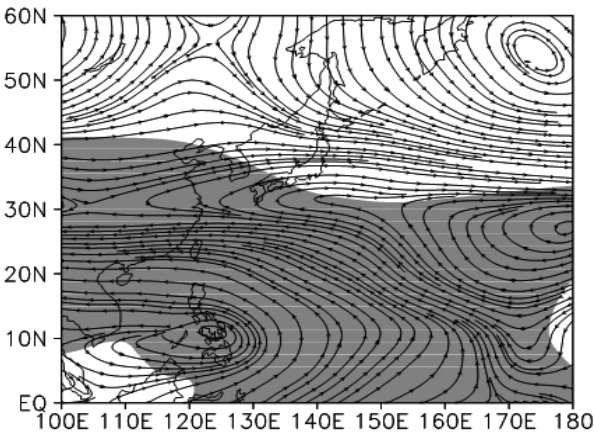
Fig. 1. Time series of (a) days that are less than -5°C for December-February in Seoul and t -value through statistical change-point analysis (dotted line) and (b) normalized value of days that are less than -5°C for December-February.



(a) 850 hPa



(b) 500 hPa



(c) 200 hPa

Fig. 2. Differences in (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa stream flows between 1988~2010 and 1974~1987. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

남동풍 아노말리의 영향을 받고 있다. 일반적으로 겨울철에 한반도는 차고 건조한 북풍계열의 탁월풍의 영향을 받지만, 1988~2010년 기간의 겨울에는 북풍이 약했음을 알 수 있다. 따라서 서울을 포함한 한반도는 약화된 북풍에 의해 최근에 겨울 -5°C 이하인 날 수가 감소할 수 있음을 알 수 있다.

500 hPa과 200 hPa 유선분석의 결과에서 한국은 동아시아 중위도 지역에 발달한 고기압성 순환 아노말리에 의해 서풍 또는 남서풍 아노말리의 영향을 받고 있다. 서풍 또는 남서풍의 아노말리는 저위도의 상대적으로 온난 다습한 공기를 한반도에 유입시킬 수 있다. 따라서 대류권 하층뿐만 아니라, 대류권 중상층에서도 최근에 겨울 기온이 증가할 수 있는 좋은 대기순환이 형성되어 있음을 알 수 있다.

이렇게 최근에 대류권 중상층에서 동아시아 중위도 지역에 발달한 고기압성 순환 아노말리는 북태평양 고기압의 발달과도 연관될 수 있다. 따라서 이 연구는 두 기간에 대해 북태평양 고기압의 발달 정도를 분석하였다(Fig. 3). 여기서 북태평양 고기압은 500 hPa 고도에서 5,870 gpm보다 큰 지위고도 값을 갖는 영역으로 정의된다. 그림에서 볼 수 있듯이, 1988~2010년 기간의 북태평양 고기압은 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 의 위도대 전체에서 발달한 반면(실선), 1974~1987년 기간에는 거의 발달하지 못했다(파선). 비록 이 북태평양 고기압의 위치는 한반도와 다소 떨어져 있지만, 최근에 한반도 지역으로 저위도의 상대적으로 습하고 더운 공기를 유입시킬 수 있는 좋은 환경이

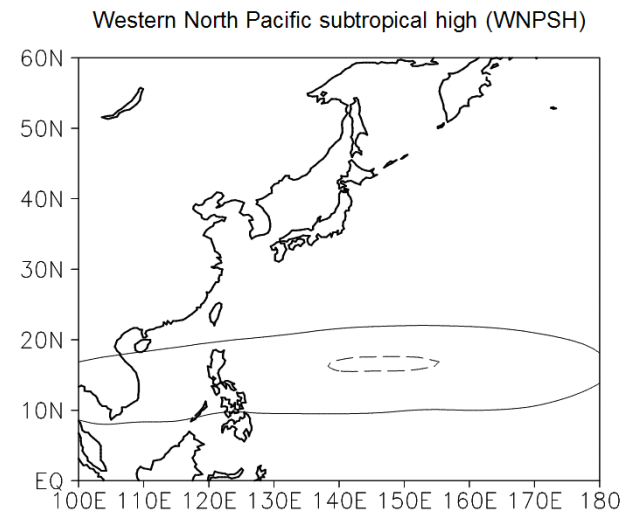


Fig. 3. Distribution of western North Pacific subtropical high (WNPSH) in 1988-2010 (solid line) and 1974~1987 (dashed line). Here, the WNPSH is defined as areas that 500 hPa geopotential height is greater than 5,870 gpm.

형성되어 있음을 알 수 있다.

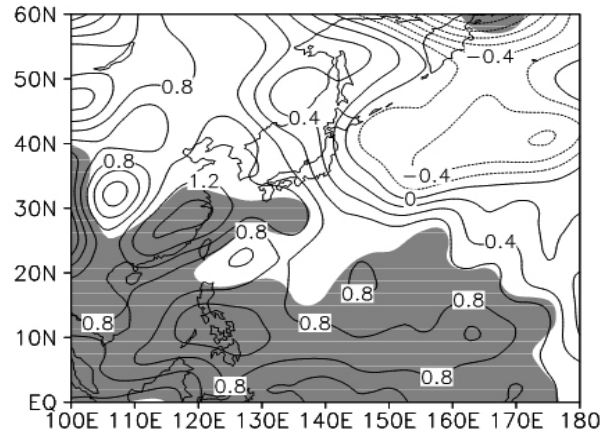
실제로 최근에 북태평양 고기압의 발달로 인해 서울을 포함한 한반도가 온난해졌는지를 알아보기 위해 850, 500, 200 hPa 기온에 대해 분석하였다(Fig. 4). 850 hPa와 500 hPa에서 기온의 분석결과에서는 북서태평양의 북부지역을 제외한 분석영역의 대부분의 지역에서 온난 아노말리를 나타낸다(Fig. 4a, 4b). 특히 온난 아노말리의 중심은 중국 중부지역으로부터 한국을 향해 동쪽으로 뻗어 있다. 200 hPa 기온의 분석결과에서는 한반도가 속해 있는 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 의 위도대에 온난 아노말리가 형성되어 있다(Fig. 4c). 즉, 한반도는 대류권 전 층에서 최근에 기온이 상승하였음을 알 수 있다.

기온이 높을수록 수증기량은 증가한다. 따라서 850 hPa, 500 hPa, 300 hPa에서 비습에 대해 분석하였다(Fig. 5). 대류권 전 층에서 한반도는 양의 아노말리에 속해 있다. 이는 앞서 분석되었듯이, 최근에 북태평양 고기압의 발달로 인해 저위도에서의 상대적으로 온난 다습한 공기가 한반도로 공급되었기 때문이다.

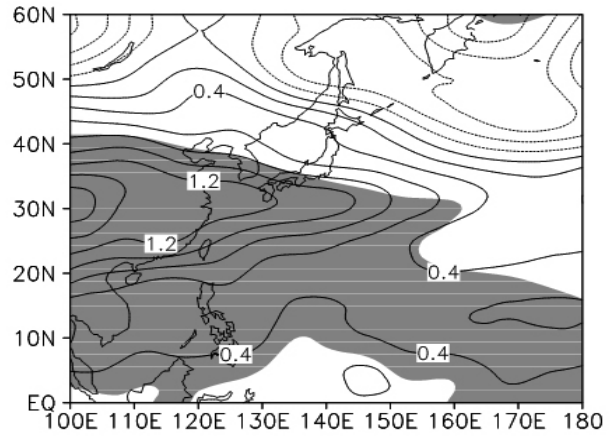
실제로 최근에 한반도에서 강수의 가능성이 높았는지를 알아보기 위해 가강수량과 전운량에 대해 분석하였다(Fig. 6). 두 분석에서 음과 양의 아노말리의 공간분포는 비슷해 보인다. 동아시아 대륙의 북부지역에서는 음의 아노말리를 보이는 반면, 35°N 이남에서는 양의 아노말리를 나타낸다. 이는 최근에 한반도에서 겨울철 강수가 많을 수 있음을 의미한다. 일반적으로 겨울철에 맑은 날에는 대기의 복사냉각에 의해 기온이 더 떨어질 수 있다. 하지만 구름이 많은 날에는 지표면으로부터의 열 방출을 구름이 막아 지표 및 대기의 기온이 따뜻해진다. 따라서 최근에 한반도에 구름과 강수가 더 많았던 최근에 기온이 상승할 수 있었음을 알 수 있다.

또한 현열과 사람이 체감할 수 있는 높이인 2 m에서 일 최대기온에 대해 분석하였다(Fig. 7). 현열에서 한반도를 포함한 동아시아 대륙은 모두 양의 아노말리를 나타낸다(Fig. 7a). 특히 양의 아노말리의 중심은 동아시아 대륙의 해안을 따라 형성되어 있다. 2 m에서 일 최대기온에서는 북서태평양의 북부지역을 제외한 분석영역 대부분의 지역에서는 양의 아노말리를 나타낸다(Fig. 7b). 특히 큰 양의 아노말리는 동아시아 대륙에 위치해 있다. 이 결과로부터 서울을 포함하여 한반도는 최근에 겨울 -5°C 이하인 날 수가 감소하였음을 알 수 있다.

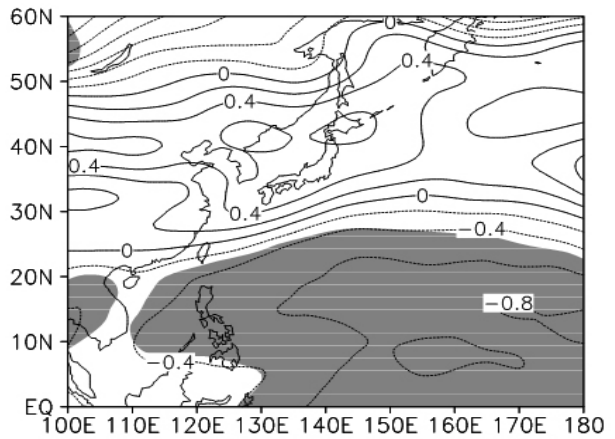
앞서 설명하였듯이, 한반도는 최근에 강수의 가능성이 많았음을 보았다. 이를 좀 더 명확하게 알아보기 위해 적설량에 대해 분석하였다(Fig. 8). 한반도를 포함한 동아시아 중위도 지역에서 양의 아노말리를 나타낸다. 이는 앞서 분석된 것처럼 최근에 북태평양 고기압의 발달로 인해 저위도에서의 상대적



(a) 850 hPa

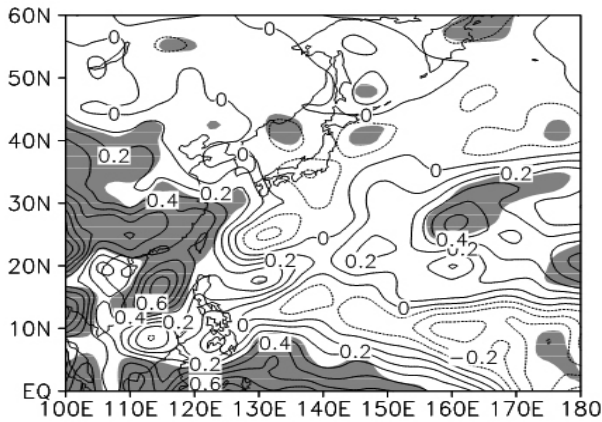


(b) 500 hPa

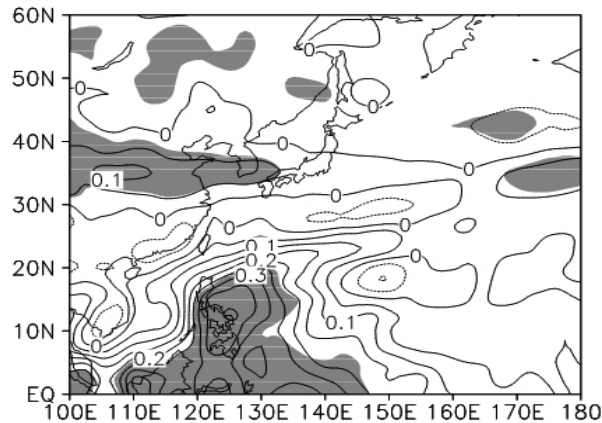


(c) 200 hPa

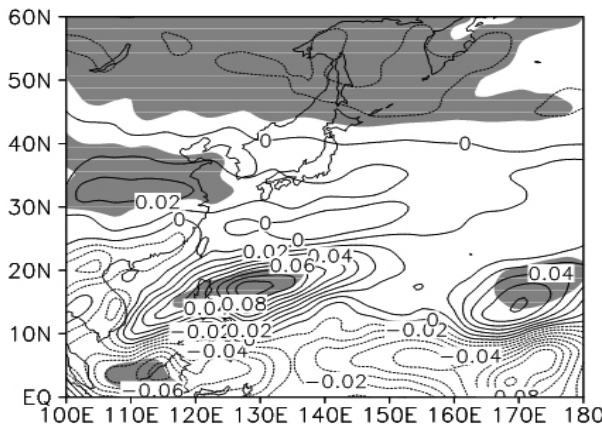
Fig. 4. Same as in Fig. 2., but for (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa air temperatures. Contour interval is 0.2°C . Shaded areas are significant at the 95% confidence level.



(a) 850 hPa

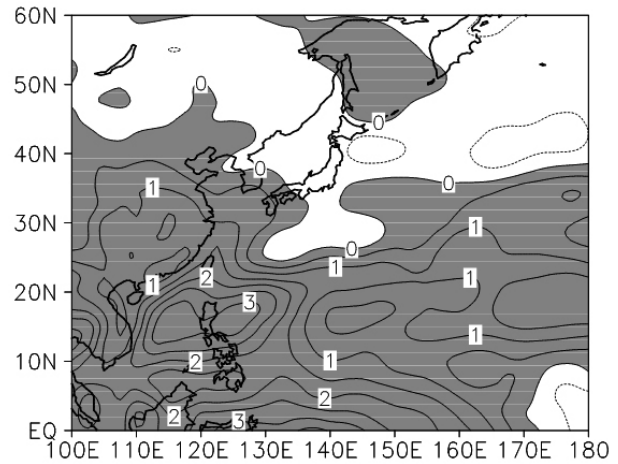


(b) 500 hPa

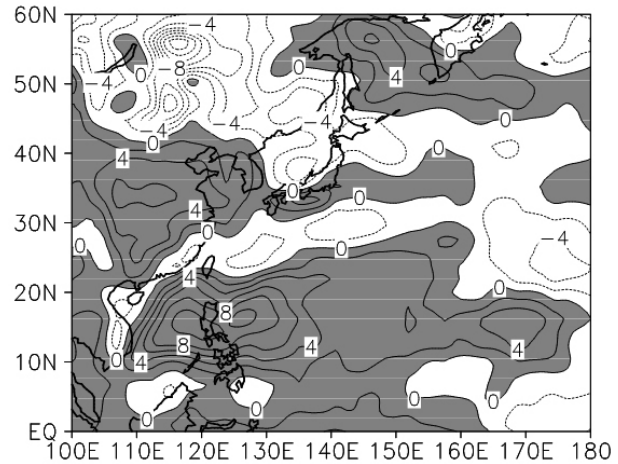


(c) 300 hPa

Fig. 5. Same as in Fig. 4, but for specific humidity. Contour intervals are 0.1 g kg^{-1} for 850 hPa specific humidity, 0.05 g kg^{-1} for 500 hPa specific humidity, and 0.01 g kg^{-1} for 300 hPa specific humidity. Shaded are as are significant at the 95% confidence level.



(a) Precipitable water



(b) Total cloud cover

Fig. 6. Same as in Fig. 2., but for (a) precipitable water and (b) total cloud cover. Contour intervals are 1 kg m^{-2} for precipitable water and 1% for total cloud cover. Shaded are as indicate positive values.

으로 온난 다습한 공기가 한반도로 유입되어 한반도에서의 대기에 수증기가 많아졌기 때문이다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 서울에서 겨울철 기온이 -5°C 이하인 날 수의 시계열을 분석하였고, 최근까지 날 수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 서울에서 최근 겨울철 기온이 점차 상승하고 있다는 것을 의미하였다. 이 시계열에서 기후레짐이동이 존재하는 지를 알아보기 위해 통계적 시점 변화 분석을 이 시계열에 적

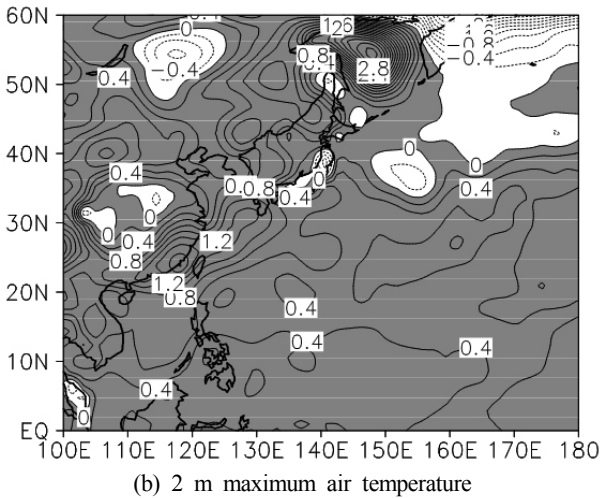
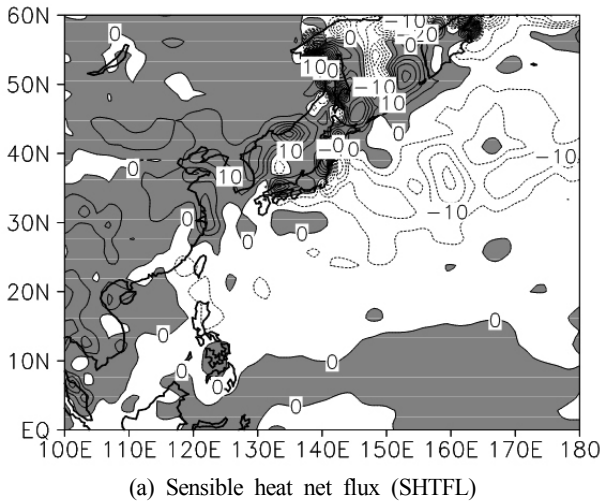


Fig. 7. Same as in Fig. 2, but for (a) sensible heat net flux (SHTFL) and (b) 2 m maximum air temperature. Contour intervals are 2 Wm^{-2} for SHTFL and 0.2°C for 2m maximum air temperature. Shaded areas are positive values.

용하였다. 그 결과, 1988년에 이후에 서울에서 겨울철 기온이 -5°C 이하인 날 수가 급격하게 감소하였다. 따라서 최근에 날 수가 감소한 원인을 알아보기 위해 겨울 동안 중관 환경에 대해 1988~2010년 기간의 평균과 1974~1987년 기간의 평균 사이에 차를 분석하였다.

대류권 전 층에서 한반도 부근지역에서는 고기압 아노말리가 발달하여 한반도는 서풍 또는 남서풍의 영향을 받고 있었다. 이는 최근에 북태평양 고기압이 좀 더 북쪽으로 발달한 것과 연관되었으며, 따라서 저위도에서의 상대적으로 온난 다습한 공기가 한반도로 공급될 수 있는 좋은 환경이 형성되어

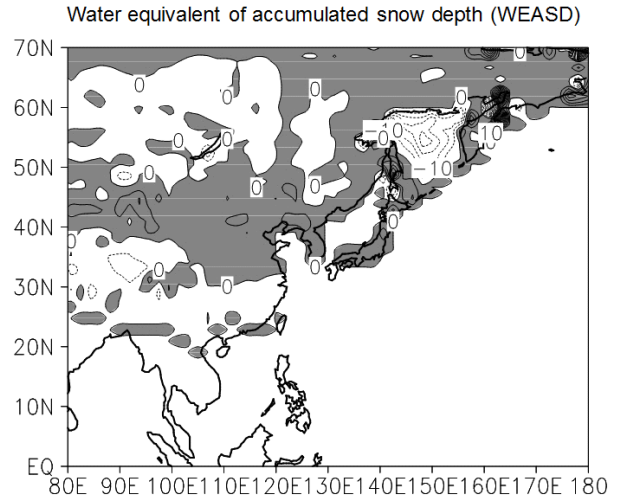


Fig. 8. Same as in Fig. 2, but for water equivalent accumulated snow depth (WEASD). Contour inter is 10 kgm^{-2} . Shaded are as are positive values.

있었다. 실제로 최근에 상대적으로 온난 다습한 공기가 한반도로 유입되었는지를 알아보기 위해 대류권 전 층에서 기온 및 비습에 대해 분석하였다. 한반도는 대류권 전 층에서 온난 다습한 아노말리를 나타내고 있었으며, 따라서 서울을 포함한 한반도는 최근에 -5°C 이하인 날 수가 감소할 수 있었다. 이에 대해 Kim *et al.*(2016)은 북반구 중위도 지역에서 겨울 지표기온이 1980년대 후반 이후로 급격하게 증가하였으며, 이는 페렐순환의 강화와 에디열속 증가와 연관되어 있음을 언급한 바 있다. 이들의 연구결과는 본 연구의 결과와 잘 일치한다.

현열과 사람이 체감할 수 있는 높이인 2 m에서의 일 최대 기온 분석에서도 한반도를 포함한 동아시아 대륙에서는 양의 아노말리를 나타내었다.

최근 한반도에서의 기온 및 비습의 증가는 가강수량 및 전운량의 증가로 이어졌다. 동아시아의 북부지역을 제외한 대부분의 지역에서 두 변수는 최근에 증가하는 경향을 보였다. 이로 인해 동아시아 중위도 지역에서의 적설량이 증가하였다. 일반적으로 겨울철에 맑은 날에는 대기의 복사냉각에 의해 기온이 더 떨어질 수 있다. 하지만 구름이 많은 날에는 지표면으로부터의 열 방출을 구름이 막아 지표 및 대기의 기온이 따뜻해진다. 따라서 한반도에 구름과 강수가 더 많았던 최근에 -5°C 이하인 날 수가 감소할 수 있는 한 원인이 되었다.

한편, Kim *et al.*(2014)은 여름철 극한일의 기온이 증가하고, 겨울철 낮에 따뜻한 날이 감소하며, 겨울철 최저기온이 1990년대 후반을 전후로 증가추세에서 감소추세로 바뀌고 있음을 보였다. 또한 Yoo *et al.*(2015)와 Min *et al.*(2015)는

2000년대 후반 이후 혹한일이 집중적으로 발생하였음을 주장하였다. 이 연구들의 결과는 본 연구의 결과와 상충되는 것으로서 본 연구의 기간과 다른 기간을 가지며, 특히 본 연구의 연구지역이 서울로 제한되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 차후 연구에서는 분석영역과 분석기간을 확대하여야 할 필요성이 제기된다.

사 사

본 연구는 국립기상과학원 주요 사업 “예보기술지원활용 연구”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chu PS. 2002. Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific. *J Climate* 15:2678-2689.
- Ding Y, Krishnamurti TN. 1987. Heat budget of the Siberian high and winter monsoon. *Mon Wea Rev* 115:2428-2449.
- Elsner JB, Jagger T, Niu XF. 2000. Changes in the rates of North Atlantic major hurricane activity during the 20th century. *Geophys Res Lett* 27:1743-1746.
- Garfinkel CI, Hurwitz MM, Waugh DW, Butler AH. 2013. Are the teleconnections of Central Pacific and Eastern Pacific El Niño distinct in boreal wintertime? *Clim Dyn* 41:1835-1852.
- Ho CH, Baik JJ, Kim JH, Gong DY. 2004. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks. *J Climate* 17:1767-1776.
- IPCC. 2001. *Climate change 2001*. Korea Meteorological Administration, 991pp.
- Jeong JH, Kim BH, Ho CH, Chen D, Lim GH. 2006. Stratospheric origin of cold surge occurrence in East Asia. *Geophys Res Lett* 33:L14710. doi:10.1029/2006GL026607.
- Jeong JH, Ho CH. 2005. Changes on occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett* 32: Doi: 10.1029/2005GL023024.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Grandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewsk C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc* 77:437-471.
- Kim MK, Shin SC, Lee WS. 2005. Characteristics of atmospheric circulation and heat source related to winter cold surge in Korea. *J Korean Earth Sci Soc* 26:560-572.
- Kim SW, Song KH, Kim SY, Son SW, Franzke C. 2014. Linear and nonlinear trends of extreme temperatures in Korea. *Atmosphere* 24:379-390.
- Kim YH, Kim MK, Lau WKM, Kim KM, Cho CH. 2016. Possible mechanism of abrupt jump in winter surface air temperature in the late 1980s over the Northern Hemisphere. *J Geophys Res* 102: doi:10.1002/2015JD023864.
- Kistler R, Collins W, Saha S, White G, Woollen J, Kalnay E, Chelliah M, Ebisuzaki W, Kanamitsu M, Kausky V, Dool H, Jenne R, Fiorina M. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull Amer Meteor Soc* 82:247-267.
- Lee K, Sung JH, Kim YO, Lee S. 2011. Change-point analysis of mean temperature and extreme temperature in the Republic of Korea. *J Korean Geographical Society* 46:583-596.
- Lee SS, Kim SH, Jhun JG, Ha KJ, Seo YW. 2013. Robust warming over East Asia during the boreal winter monsoon and its possible causes. *Environ Res Lett* 8:03401.
- Min SK, Son SW, Seo KH, Kug JS, An SI, Choi YS, Jeong JH, Kim BM, Kim JW, Kim YH, Lee JY, Lee MI. 2015. Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 51:103-121.
- Park TW, Ho CH, Deng Y. 2014. A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Clim Dyn* 43:753-770.
- Ryoo SB, Kwon WT. 2002. Climatological characteristics of cold winter and hot days in South Korea. *Atmosphere* 12:288-291.
- Ryoo SB, Kwon WT, Jhun JG. 2004. Characteristic of wintertime daily and extreme minimum temperature over South Korea. *Int J Climatol* 24:145-160.
- Shin SC, Kim MK, Lee WS. 2006. Cold surges over Korean peninsula associated with arctic oscillation and the role of heat source. *J Korean Earth Sci Soc* 27:302-312.
- Takaya K, Nakamura H 2005a. Mechanisms of intraseasonal

- amplification of the cold Siberian high. *J Atmos Sci* 62: 4423-4440.
- Takaya K, Nakamura H. 2005b. Geographical dependence of upper level blocking formation associated with intraseasonal amplification of Siberian high. *J Atmos Sci* 62:4441-4449.
- Wang M, Overland JE. 2009. A sea ice free summer Arctic within 30 years? *Geophys Res Lett* 36: DOI: 10.1029/2009-GL037820.
- Watanabe M, Nitta T. 1998. Relative impacts of snow and sea surface temperature anomalies on an extreme phase in the winter atmospheric circulation. *J Climate* 11:2837-2857.
- Wilks DS. 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, 467.
- Wu R, Kirtman BP. 2007. Observed relationship spring and summer East Asia rainfall with winter and spring Eurasian snow. *J Climate* 20:1285-1304.
- Yoo YE, Son SW, Kim HS, Jeong JH. 2015. Synoptic characteristics of cold days over South Korea and their relationship with large-scale climate variability. *Atmosphere* 25:435-447.