

최근 40년(1979~2018) 우리나라 겨울 일 평균기온의 장기 변화 경향 및 주기 분석

최지영¹⁾³⁾ · 황승언^{1)*} · 예상욱²⁾ · 송세용²⁾ · 김윤재¹⁾

¹⁾국립기상과학원 지구시스템연구과, ²⁾한양대학교 ERICA 해양융합공학과,
³⁾조선대학교 지구과학과

(접수일: 2019년 9월 18일, 수정일: 2019년 10월 29일, 게재확정일: 2019년 11월 16일)

Long-term Trend and Period Analysis of Korean Daily Temperature During Winter Season of 40 Years (1979~2018)

Ji-Yeong Choi¹⁾³⁾, Seung-On Hwang^{1)*}, Sang-Wook Yeh²⁾, Se-Yong Song²⁾, and Yoon-Jae Kim¹⁾

¹⁾Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Department of Marine Sciences and Convergent Engineering, Hanyang University, ERICA, Ansan, Korea

³⁾Department of Earth Science, Chosun University, Gwangju, Korea

(Manuscript received 18 September 2019; revised 29 October 2019; accepted 16 November 2019)

Abstract The change and periodicity of Korean winter temperature in the period 1979-2018 are investigated. It is shown that the winter temperature is on a long-term rise, with two regime shifts of winter temperature during 40 years. In addition, the decrease in cold days is confirmed along with the rise in temperature. Analysis of the periodicity of daily temperature in winter is carried out by means of power spectral analysis. Of the spectral peaks that are statistically significant, the most frequent detection exists on the time scale between 7 and 8 days. It is found that the number of significant periods have decreased since 2014, particularly no longer existent around the period of 7 day. The longer periods than 7 days gradually increase during 40 years, while the shorter periods show the tendency of decrease but recently rebound. Spectral analysis calculated from high/low-pass filtered daily temperature data also shows similar results.

Key words: Korean winter temperature, periodicity, power spectral analysis

1. 서 론

우리나라의 겨울철 기후는 아시아 대륙의 동쪽에 위치하고 있는 차가운 성질의 시베리아 고기압과 상대적으로 따뜻한 북태평양 지역의 알류산 저기압의 서고동저 기압형태와 동아시아 겨울 몬순의 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Jeong and Lee, 1993; Ahn and Kim, 2010; Lim et al., 2012). 이러한 기압

배치 아래에서 어느 정도의 시간 규모를 가지고 시베리아 고기압이 장출하게 되며, 이에 따라서 변동하는 북서풍은 한반도 지역의 겨울철 기온에 직접적으로 영향을 미친다(Ryoo and Kwon, 2002; Jhun and Lee, 2004; Wang and Chen, 2010). 따라서 우리나라 겨울철 기온은 한랭한 기간과 상대적으로 온화한 기간이 다양한 시간규모를 가지고 교차하는 경향을 보이게 된다(Lee, 1985; Jeong, 1988; Wang and Chen, 2010).

우리나라 겨울철 기온의 변화 경향에 대한 연구는 지구 온난화와 기후학적 관점에서 연구되어 왔는데, 겨울철 기온은 20세기 기상 관측 이후 지속적으로 상승하는 패턴을 보였으며, 특히 1986년 이후 겨울철 기온의 급격한 상승 경향을 보인 것으로 알려졌다(Jung

*Corresponding Author: Seung-On Hwang, Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6737, Fax: +82-64-738-6514
E-mail: compassion@korea.kr

Table 1. Summary of antecedent studies on the periodicity of daily temperature over Korea.

	Analysis period	Stations	Analysis method	Periodicity
Lee (1971)	40 yrs (1930~1969)	Seoul	Frequency analysis	9 days (4.4 cold days and 4.6 warm days)
Lee (1985)	73 yrs (1908~1980)	Seoul	Power spectral analysis	12.0~12.9 days & 10.0~10.9 days
Jeong (1988)	25 yrs (1961~1986)	Seoul, Chupungnyong, Kwangju	Power spectral analysis	5.5~7.5 days
Kim and Roh (2010)	30 yrs (1979~2008)	Seoul	Cyclostationary EOF	~7 days (7.1 and 7.5 days)

et al., 2002; Lim et al., 2012; Moon et al., 2014; NIMS, 2018). 그러나, 최근에는 2010년을 기점으로 겨울철 평균기온의 상승 추세가 약해지고 다시 하강하는 경향성도 관측되고 있다(Choi et al., 2018; Lee et al., 2018; NIMS, 2018). 이상의 연구에서는 한파를 비롯한 겨울철 기온의 계절 내 특성뿐만 아니라 그와 관련된 대기순환 메커니즘과 상관성 분석 등이 주로 이루어졌다. 겨울철 기온과 대기순환 메커니즘의 상관성 연구의 예로, Lim et al. (2012)이 1986년 이전보다 그 이후에 북극진동과 우리나라 겨울철 기온과의 상관성이 크게 증가한 반면, 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 변동성은 그 상관성이 크게 감소하였다는 점을, Lee et al. (2018)은 한파 발생시 해양의 잠열 방출의 양의 되먹임에 의한 지상 저기압 발달이 한파를 강화시키는 지역적인 메커니즘으로 작용한다는 점을 보였다.

한편, 우리나라 겨울철 기온에 대한 특성이나 역학적 관련 분석 이외에 기온의 주기성 분석에 관한 연구도 활발하게 이루어져 왔다. 다른 계절과 달리 우리나라의 겨울철 기온은 ‘삼한사온’이라고 불리는 한랭기와 온난기의 주기적 출현이 대중적으로 인식되어 왔기 때문에 이 같은 주기성에 대한 조사 필요성이 있었을 것이다(Lee, 1985; Jeong, 1988). 우리나라 겨울철 일 평균 기온의 주기성을 분석한 선행 연구들을 Table 1에 정리하였다. 먼저, 겨울철 삼한사온의 초창기 연구로서 Lee (1971, 1985)는 빈도 분석과 스펙트럴 분석을 통해 서울 관측소에서 9일 이상의 주기가 존재함을 밝혔다. 이 연구들은 삼한사온으로 표현되는 7일 보다 긴 주기들이 지배적이라는 점이 특징적이다. 이후 Jeong (1988)은 기온과 기압에 대해 30일 미만의 주기성과 그 특성을 조사해 보고자, 4계절 전체에 대한 스펙트럴 분석을 수행하여, 그 중 겨울철 기온은 앞선 연구 보다는 짧은 주기인 5.5~7.5일에서 스펙트럴 극치의 출현 빈도가 비교적 높다는 것을 보였다. 한편, Kim and Roh (2010)는 Cyclostationary EOF 분석을 통해 겨울철 기온의 변동성을 유발하는 역학

적 메커니즘을 파악하고, 지구온난화가 이 메커니즘에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구와 더불어 주기성을 추출하였는데, 10일 기준의 고주파 필터를 사용하여 삼한사온으로 표현되는 약 7일 주기의 기온 변동이 가장 우세하다는 것을 제시하였다. 이 삼한사온 주기는 동진하는 로스비파의 7일 내지는 7~9일의 주기에 의한 것임을 밝히고 있다.

이상의 주기 분석에 대한 선행 연구들은 겨울 기간의 정의, 자료의 기간, 분석 방법 등 상이한 구성을 통하여 각기 우세하게 나타난 주기를 추출하였다. 종합해보면, 대체로 장기간 동안 서울 관측소 자료를 사용하여 수행되었고, 스펙트럴 분석이나 EOF 등의 주기 분석 방법이 주로 사용되었으며, 그 결과는 7일 정도의 주기와 이보다 긴 주기의 10일 정도의 주기의 기온 변동성이 우세하게 나타났다는 것으로 정리될 수 있다. Kim and Roh (2010)가 비교적 최근 년도까지의 주기성 분석을 상당히 정밀하게 수행하였으나, 이후 10년이 더 지난 현재까지 지구온난화 경향과 더불어 겨울철 기온의 변동성, 그 주기성의 변화, 특히 삼한사온 주기의 존재 여부, 또한 주기성의 장기적 변화 경향 등을 살펴보는 것은 의미가 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 1979~2018년 기간 우리나라 겨울철 일 평균 기온의 변화 경향을 간단히 살펴보고, 스펙트럴 분석을 통한 기온의 주기 검출뿐만 아니라 주기의 변화 양상을 살펴보고자 하였다. 또한, 선행 연구들 중 겨울철 기온과 한랭일수 사이의 관계를 분석한 Jeon and Cho (2015)의 결과를 재현하여 비교 분석하였다.

제 2장에서는 자료 및 분석 방법, 제 3장에서는 일 평균 기온의 변화 경향, 제 4장에서는 주기 분석, 제 5장에서는 결론 및 토의를 제시하였다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구에서는 우리나라 21개(속초, 춘천, 강릉, 서울, 인천, 수원, 서산, 청주, 대전, 추풍령, 포항, 군산,

대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 통영, 목포, 여수, 진주) 관측소의 1979년부터 2018년까지 총 40년 겨울의 일 평균 기온을 사용하였다. 본 연구는 2010년까지의 겨울 기온을 사용한 Lim et al. (2012)의 연구의 연속성 상에서 향후 대기순환과의 상관성 분석 연구를 염두에 두고, 위 연구에서 사용한 21개 지점과 동일한 지점을 채택하였다. 여기서 언급되는 겨울은 12~2월의 3개월을 뜻하며, 1979년 12월부터 시작되는 겨울을 1979년 겨울이라 정의한다. 자료 처리의 통일성을 기하기 위해 윤년의 2월 29일은 다루지 않았기 때문에 각 년도 별 겨울의 기간은 90일로 하였다. 또한, Jeon and Cho (2015) 결과와 비교를 위하여, 춘천관측소의 1971년부터 2014년까지 겨울의 시간 기온 자료를 사용하였다.

겨울철 일 평균 기온의 시계열의 주기성을 조사하기 위해, 21개 관측소의 일 평균 기온을 평균하였으며, 이 공간 평균된 겨울 일 평균 기온에 대해 매년 파워 스펙트럼 분석법(Power spectral analysis)을 수행했다. 이 스펙트럼 분석을 위해서는 NCL (NCAR Command Language) 함수인 specx_anal을, 통계적인 유의수준을 검토하기 위해 하위 5%, 상위 95% 유의수준의 경계값을 산정하는 NCL 함수 specx_ci을 사용하였다. 고주파 및 저주파 통과 필터(High- and Low-pass filter)를 위해서는 NCL 함수 filwgt_lanczos와 wgt_runave를 사용하였다.

3. 겨울 일 평균 기온의 변화 경향

21개 지점의 공간 평균된 겨울철 평균 기온의 변화 추이를 Rodionov (2004)의 regime shift 분석을 사용하여 알아보았다(Fig. 1a). 분석 기간 중 우리나라 겨울철 평균 기온 변동성에 두 번의 regime shift가 관측되었다. 서론에 소개되었던 연구 결과와 유사하게, 1980년대 중반 이후 평균 기온이 이 전 시기에 비해 2.1°C 상승한 것으로 나타났다. 이러한 1980년대 중반 이후 기온 상승의 원인으로 Lim et al. (2012)은 우리나라 겨울철 기온 변동에 주요하게 작용하는 북반구 대기 순환이 시베리아 고기압과 알류산 저기압에서 북극진동으로 바뀌었다는 결과를, Choi (2015)는 1980년대 중반 이후 특히 겨울철 후반기에 동아시아 북부에서는 유라시아 서부로부터 유입되는 강한 서풍 계열의 바람과 그 남부에서는 아열대 북태평양으로부터 유입되는 동풍 계열의 바람이 탁월해지는 동서순환패턴의 형성으로 기온이 상승하고 극한저온현상이 감소하는데 유리한 중관 패턴이 형성되었다는 결과를 제시하였다. 반면 2010년 이후 현재까지 이 전 시기에 비해 0.7°C 하락한 것으로 보인다. 2010년 이후에는 2010~2012년과 2017년의 상대적으로 추웠던 겨울

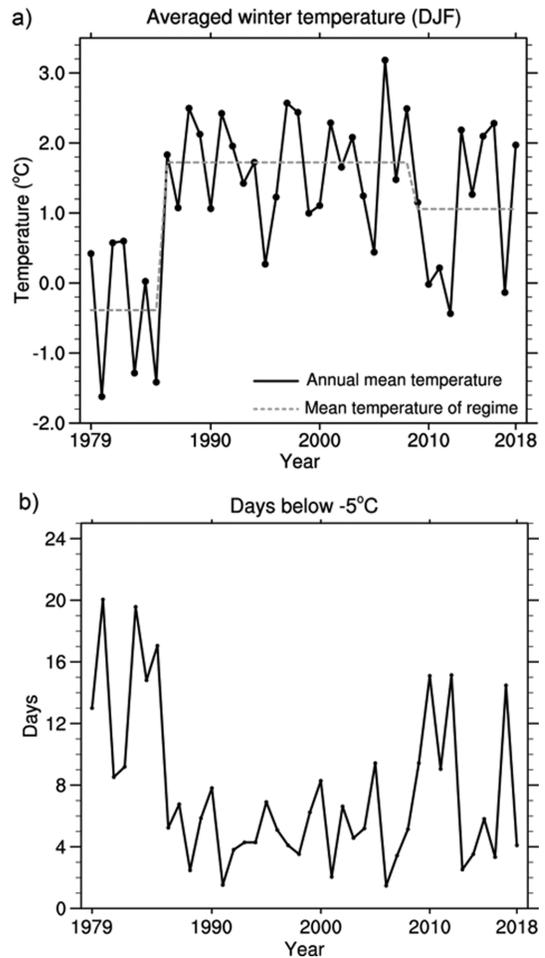


Fig. 1. a) Averaged daily mean winter temperature over 21 stations for the period of 1979~2018. Dot lines indicate the mean value for the periods before and after the significant regime shifts, based on Rodionov (2004). For determining the regime shift, the following parameters were used: cutoff length = 15; probability level = 0.2; and Huber's weight parameter = 1.5. The 1986 and 2009 are detected the regime shift significant at 99% and 90%, respectively. b) Averaged days below -5°C over 21 stations for the period of 1979~2018.

로 인하여 이러한 기온 하강 양상이 나타난 것으로서 이 양상이 추세적인 것인지 일시적인지에 관해서는 더 지켜봐야 할 것이다. 다음은, 21개 지점의 공간 평균된 -5°C 이하 한랭일수를 각각 알아보았다(Fig. 1b). 여기서, Jeon and Cho (2015)가 -5°C 기온을 극한기온지수로 정하고 한랭일을 조사하였으므로, 그 결과와 비교하기 위해 본 연구에서도 이 기준 온도를 채택하였다. 한랭일수는 기온과 반비례해서 증감하고 있

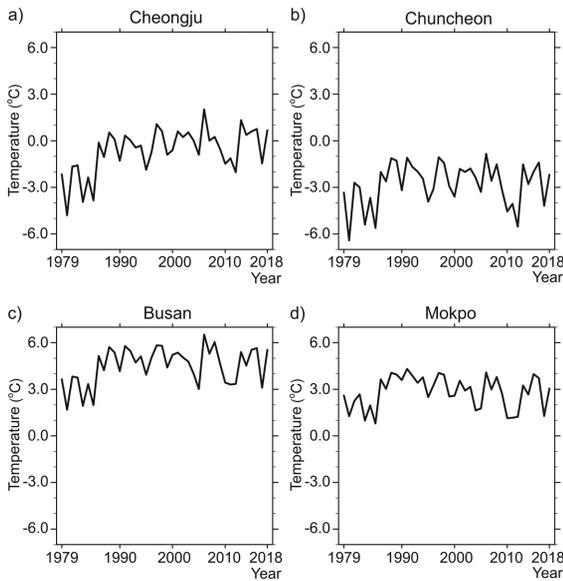


Fig. 2. The same as Fig. 1a but for a) Cheongju, b) Chuncheon, c) Busan, and d) Mokpo.

음을 알 수 있다. 즉 한랭한 regime 시기에는 증가하고, 온난한 regime 시기에는 감소하는 단순한 패턴을 보이고 있다.

21개 관측소 중 특징적인 기온 변화 추이를 보인 대표적인 관측소들의 기온 시계열을 표출하였다(Fig. 2). 먼저, 청주(Fig. 2a)는 40년 전보다 기온 상승이 가장 두드러진 도시로 나타났다. 2010년부터 보인 한랭한 기간에도 기온이 비교적 크게 낮아지지는 않았다. 이러한 특징을 보인 관측소는 내륙의 수원, 대구 등이 있다. 춘천(Fig. 2b)은 분석기간 전체적으로 보면 기온이 상승했지만, 2010년대의 한랭한 기간에는 크게 영향을 받는 모습을 보였고, 21개 관측소 중 가장 높은 곳에 위치한 추풍령(해발고도 245 m)도 1986년 이전의 한랭한 기간의 기온만큼 하락하는 모습을 보였다. 남쪽에 위치한 부산(Fig. 2c)은 1986년 이후 기온이 상승한 후 대체로 유지하고 있고, 울산, 포항, 여수, 진주 등도 유사한 패턴을 보인다. 목포(Fig. 2d)는 1986년 이후 기온이 상승했으나, 40년간 전체적인 기온 상승이 가장 작은 것으로 나타났다. 서산이나 군산도 다른 관측소에 비해 비교적 기온 상승이 적은 양상을 보인다.

한편, Fig. 1b에 나타난 바와 같이, 일반적으로 겨울철의 기온 상승은 한랭일수의 감소를 동반할 것이라는 예상을 할 수 있다. 이러한 사실을 특정 관측소에서 알아보기 위해서, 춘천 관측소에서의 1971~2014년 겨울 기온의 시간 자료를 사용하여 -5°C 및 -10°C 이하 일수를 분석하였다(Fig. 3a). 우리나라에서 비교

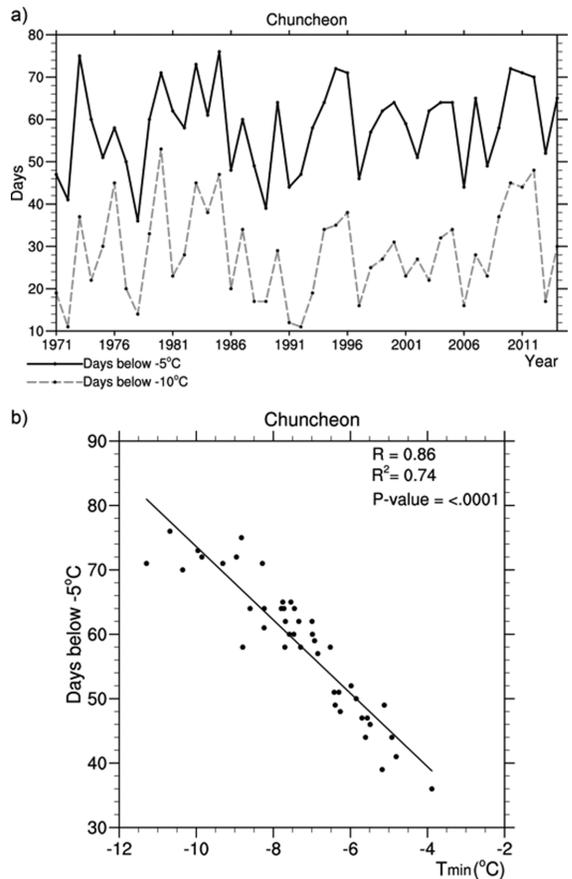


Fig. 3. a) The number of days below -5°C (solid) and -10°C (dotted), and b) the relation between days below -5°C and averaged minimum temperature at Chuncheon station in each winter during 1971~2014.

적 추운 지역에 위치한 춘천관측소의 -5°C 이하의 한랭일수는 35일에서 76일까지의 분포를 보이고 있으며, -5°C 및 -10°C 이하의 한랭일수의 변화는 Fig. 1a의 기온의 regime의 변화와 반비례하는 양상을 보인다. 한편, 기온과 한랭일수의 상관관계(association)를 알아보기 위해 춘천의 44년간 연별 일최저기온의 평균값과 -5°C 이하 한랭일수의 산포도를 분석하였다(Fig. 3b). 분석 결과, 겨울철 기온이 상승할수록 한랭일수는 감소하는 반비례 추세를 보이며, 이 분석은 높은 상관계수(R)와 통계적으로 유의한 결과(P-value)를 보여주고 있다. 춘천 이외의 다른 관측소에서도 유사한 결과를 보여준다(그림 생략).

Figure 3a의 결과는 Jeon and Cho (2015)의 Fig. 5b에 상응하는 것으로서 춘천의 기온이 상승추세를 보임에 따라 -5°C 및 -10°C 이하인 한랭일수도 비교적 선형적으로 동반 상승하는 추세를 보인다는 그들의

결과와는 다른 것이며, 특히 본 연구의 분석에서는 비교적 한랭한 regime이었던 1986년 이전에도 큰 한랭일수를 보여주고 있다. 이어서, Jeon and Cho (2015)의 평균 아침최저 기온과 한랭일수(Fig. 7a1, a2)를 그대로 재현해본 결과, 수치상 상당히 차이가 나는 것을 확인하였다(그림 생략). Jeon and Cho (2015)는 ‘한랭일은 증가하는 경향’을 보이고, ‘평균아침최저기온은 상승하는 반면, 한파일수는 점차 증가’하고 있고, 따라서 ‘기온의 극단적 현상은 점차 심각해질 것’이라는 결론을 도출하고 있다. 그러나, 이는 연도별 기온 변화가 선형적이지 않음에도 이를 한랭일수나 한파일수 등과 함께 일차 선형관계로 해석하여 얻은 결과로 추측된다. 이상의 한랭일에 대한 주제에 대해서, 한랭일의 추세는 결국 기온의 추세와 역의 관계에 있으며, 겨울 기온이 낮은 한랭기에는 한랭일이 늘어나고, 온난기에는 한랭일이 줄어든다는 단순한 결론을 얻을 수 있다.

4. 겨울 일 평균 기온의 주기 분석

매년 겨울 일 평균 기온 90일의 시계열에 대해서 2장에서 설명한 방식으로 스펙트럴 분석을 수행하였다. Figure 4는 40년 중 스펙트럴 극치(Spectral peak)가 매우 강하게 검출된 1980년 겨울의 예를 든 것으로서 스펙트럴 분석을 NCL로 수행한 결과인 주기별 스펙트럴 강도를 표시한 것이다. 1980년에서의 스펙트럴 극치는 3.8일, 4.1일, 5.0일, 7.5일, 18.0일, 30일 등 여러 주기에서 나타나고 있고, 이 가운데 95%의 유의수준(점선들 중에서 가장 윗부분)을 넘어서는 주기는 4.1일과 7.5일임을 보여준다. 향후 논의들은 이 같은 스펙트럴 분석 결과를 토대로 진행된다.

한편, Fig. 4에서도 잘 나타나듯이 스펙트럴 분석에서 스펙트럴 강도는 일반적으로 주기가 짧을수록 일률적으로 감소하므로, 스펙트럴 강도를 주기별로 단순 비교하기 어려운 점이 있다(Zangvil, 1975). 물론, 그럼에도 불구하고 시그널이 존재하는 주기에는 스펙트럴 극치는 나타난다(Jeong, 1988). 따라서, Fig. 4와 같이 매년 산출되는 스펙트럴 강도가 연도별 주기별로 어떻게 분포하고 변화하는지 알아보기 위해서는 주기별 스펙트럴 강도를 상대적인 지표로 대신 표현할 필요가 있다. 이러한 점을 고려하여 스펙트럴 강도가 연도별 및 주기별로 어떻게 분포하고 변화하는지 표현하기 위해 각 주기별로 스펙트럴 강도의 40년 평균에 대한 편차 중 양의 편차만을 나타내었다(Fig. 5a). 여기서, 편차로 나타낸 것은 주기별로 상대적인 강도를 알 수 있게 되고, 양의 편차는 40년 평균값보다 강한 강도를 갖는 것으로 간주하여 각 주기 내에서는 다른 해보다 특정한 주기가 강한 것으로 볼 수

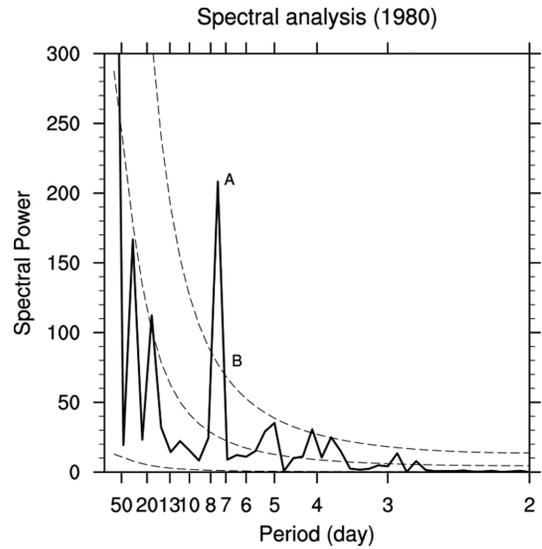


Fig. 4. Power spectra for the daily mean temperature averaged over 21 stations in 1980 winter. Thick line shows the power spectra. As an indicator for significance, dashed lines show confidence bound with its 5th (lower), 95th (upper) percentiles, and Markov red noise spectrum (middle). A and B denote spectral power and 95th percentile of confidence bound, respectively, which are used for calculation of normalized vales in Fig. 6.

있기 때문이다. 다만, 이러한 방법은 주기들 간의 단순 비교는 피할 수 있으나, 각 주기 내에서 유의수준이 연도별로 다르다는 점을 고려하지는 않고 있다는 것을 주의해야 한다. Figure 5b는 Fig. 5a를 구할 때 쓰인 스펙트럴 강도의 40년 평균값으로서, 평균에 의해 평활이 되어 나타나고 있지만, 여기서도 7~8일과 13~14일 주기에서 국소적으로 스펙트럴 피크가 나타나고 있다. Figure 5a에서 스펙트럴 강도는 해마다 강했다가 약했다가 하는 불규칙한 분포를 보이고 있는데, 최근으로 올수록 대부분의 주기에서 평균을 넘는 강도가 전체적으로 다소 증가하는 경향을 보인다. 즉, 음영의 빈도와 강도가 이전에 비해 2010년과 2017년 부근에서 뚜렷해 보이는데, 이때는 2009년의 regime shift가 시작한 이후 나타났던 추운 겨울과 일치한다. 그러나, 이러한 이유로 뚜렷한 주기성이 전반적으로 나타나는 것인지에 대해서는 본 연구의 범위를 넘어가는 것으로 향후 연구에서 다루도록 하겠다. 특히 8일 이상의 장주기 변동성은 2000년 이후에서 좀더 뚜렷하며 그 강도도 강해지고 있는 것을 알 수 있다. 5일 이하의 주기에서는 2010년 이후 강한 주기가 좀더 자주 출현한다는 점이 특징이다.

이번에는 95% 유의수준을 넘어서는 스펙트럴 강도

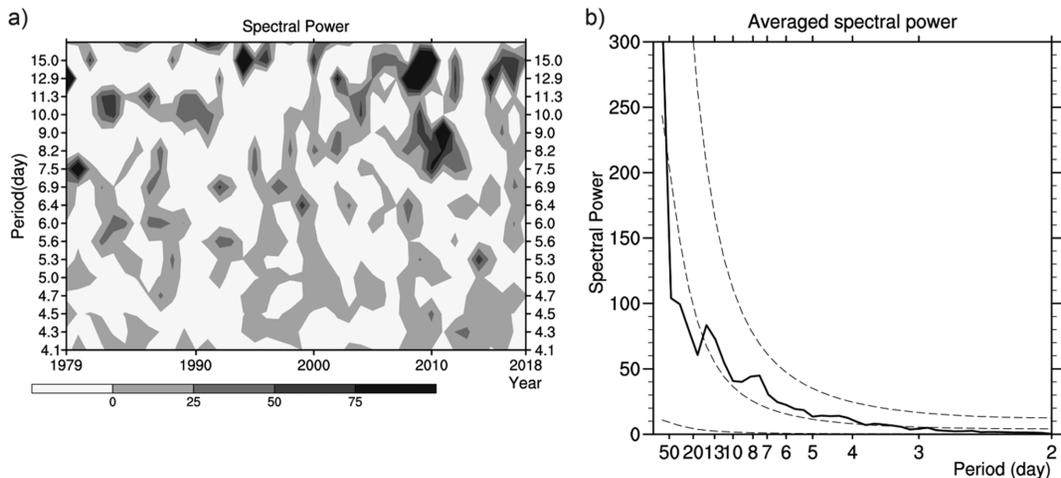


Fig. 5. a) Power spectra at each period indicating positive anomaly over averaged spectral power, and b) averaged spectral power during 1979~2018 used in Fig. 5a.

를 보인 주기만을 나타내어 분석하였다(Fig. 6). 주기별 스펙트럴 강도를 상대적으로 비교하기 위해 편차를 구해서 그렸던 Fig. 5와 달리, 이 그림에서는 Fig. 4에 A로 표시된 스펙트럴 강도 값과 B로 표시된 95% 유의수준 값을 이용하여 A가 B보다 큰 주기에 원을 표시하고, 정규화 $((A - B)/B)$ 시킨 후, 큰 값일수록 검정색에 가깝게 표시하여 나타내었다. 이 정규화된 값이 양수라는 것은 스펙트럴 강도가 95% 유의수준을 넘는다는 의미로서 통계적으로 유의하다는 것을 의미한다. 따라서, 흰색부터 검정색에 이르는 원으로 표시된 모든 것들은 통계적으로 유의미한 것들이 된다. 예를 들어, 이 정규화된 값이 1이 넘는다는 것(검정색 원)은 스펙트럴 강도가 95% 유의수준 기준값의 두 배 이상이 되는 매우 유의미한 주기가 검출되었다는 것을 뜻한다. 유의수준 95%를 넘는 주기들의 개수는 해마다 다르지만 한번도 나타나지 않는 해도 있고, 5년까지 나타나는 해도 있었다. 7일 이상의 유의한 수준의 주기는 드물게 나타나다가 1990년 이후 2010년 중반까지 증가하는 경향을 보였으며 최근 들어 유의한 주기가 줄어들고 있다. 반면 6일 이하의 단주기에서는 의미있는 주기들이 1990년대 이후 감소하다가 2010년 이후에는 다시 증가하고 그 강도도 강한 모습을 보인다. 그림의 오른쪽은 매 주기별 유의한 스펙트럴 강도의 출현 횟수를 계수한 것으로서 8.2일을 최고 빈도로 하는 6.9~8.2일 밴드의 주기에서 가장 큰 빈도수를 보였다. 다음은 4일의 주기와 12.9~15.0일의 주기에서 많이 나타났다. 이 빈도 수 분석 결과는 전체 분석 기간 중 우리나라 겨울철 기온의 변동성은 약 7~8일 주기에서 가장 우세한 것을 보여준다. 이 그림

에서 주목할 만한 것은 1990년대 이전에 비해 그 이후 시기에 유의한 뚜렷한 주기들이 상대적으로 많이 출현했으나, 2014년 이후에는 5일 이상의 유의한 주기가 크게 줄어들었고, 특히 삼한사온의 현상을 설명할 수 있는 7일 근처의 주기가 전혀 나타나고 있지 않다는 점이다. 즉 최근 들어서 삼한사온을 포함하여 전형적인 겨울철 기온의 뚜렷한 주기(7~8일)가 사라지는 경향이 있음을 보여주는 것이다.

장주기와 단주기의 요란이 미치는 영향을 줄이기 위해 고/저주파 필터를 사용하면, 단주기와 장주기를 좀 더 명확하게 검출할 수 있다. Figure 6의 유의미한 주기가 많이 검출되었던 7~8일과 13일 사이에 주기성이 거의 나타나지 않은 10일 주기를 기준으로 필터를 적용하였다. 즉, 고주파 필터를 통과시키면 10일 주기 이하의, 저주파 필터를 통과시키면 10일 주기 이상의 스펙트럴 강도를 얻을 수 있다. 이 결과를 앞의 Fig. 6과 같이 정규화시켜 같은 방법으로 표현하였다(Fig. 7). 필터로 인하여 통계적으로 유의한 주기들이 대폭 증가하였으며, 11.7~14.0일과 7.0~7.8일 주기에서 가장 큰 빈도수를 보이고 있다. 또한, 앞의 Fig. 6의 결과와 같이 최근으로 올수록 10일 이상의 유의한 장주기가 증가하고 있다. 한편, 7~7.8일 주기가 최근에는 거의 나타나지 않고 있으며, 4일 정도의 단주기는 다소 증가하는 것으로 보인다. 이처럼 필터를 통해 매해 유의한 주기들이 많이 검출되었기 때문에, 스펙트럴 강도의 연도별 변화를 조사하는 것이 의미가 있을 것으로 판단되어, Fig. 7에서 10일 주기를 기준으로 필터된 자료의 스펙트럴 강도를 고주파(단주기) 영역과 저주파(장주기) 영역으로 나누어 평균하여 시계열

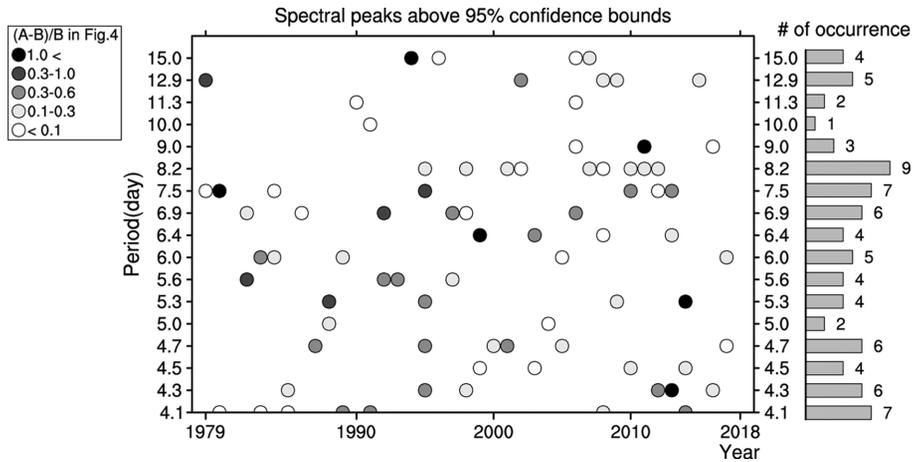


Fig. 6. Significant power spectra that lie above the 95% confidence bounds. Circle dots indicate normalized magnitude of significant power spectra $((A - B)/B)$ from A and B as shown in Fig. 4). Black, heavy grey, grey, light grey, and white circle dot mean the magnitude greater than 1, 0.6, 0.3, 0.1, and 0, respectively. The number of these significant power spectra appeared at each period for 40 years was shown at the right bar graph.

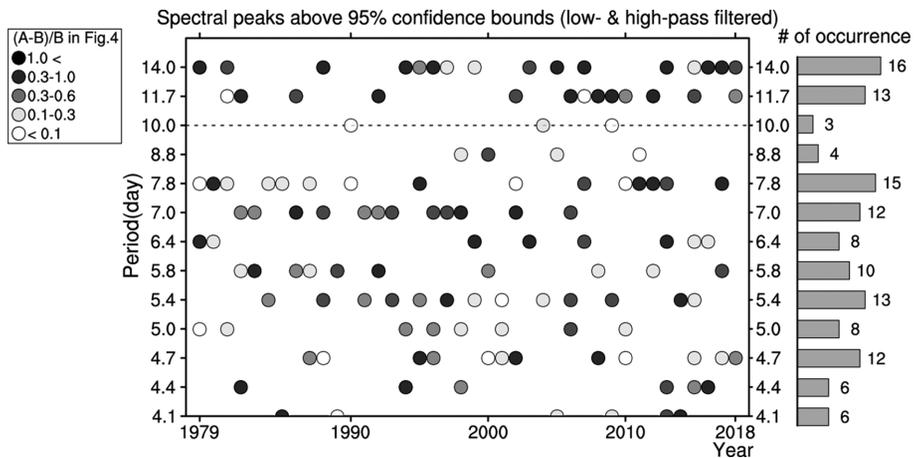


Fig. 7. The same as Fig. 6 but for significant power spectra after applying high- and low-pass filter.

로 나타내었다(Fig. 8). 장주기에서는 분석기간 초기 이후 regime이 바뀌는 1986년 이후 감소하는 추세를 보이다가 2000년 이후 증가 추세를 보이며, regime이 바뀌는 2009년 이후에는 감소 후 최근으로 올수록 그 강도가 증가하는 추세를 보이며 변동이 큰 모습을 보이고 있다. 10일 이하의 단주기는 전반적으로 스펙트럴 강도 자체가 크지 않아서 변동은 커보이지 않으나, 1986년 부근에서 전반적으로 감소하기 시작하다가, 다음 regime이 바뀌는 2009년 즈음에 서서히 증가하다가 2018년에 급감하는 모습을 보이고 있다. 이상에서 보면, 최근에 주기성의 변동폭이 커지는 모습을 보이는데, 이 사실들이 최근의 기후체계에 대한 변화를 나

타내는 것인지에 대한 원인 분석이 필요할 것으로 보인다.

4. 결론 및 토의

우리나라 21개 관측소의 겨울철 40년간(1979~2018년) 일 평균 기온을 사용하여 기온 변화 경향 및 주기성을 조사하였다. 이 기간 동안 우리나라 겨울 기온은 장기적인 기온 상승 경향을 보이면서, 두 번의 regime shift가 있었다. 기온 상승과 함께 한랭일수의 감소도 확인되었다. 또한 겨울 기온의 주기성 분석을 위하여 각 연도별로 스펙트럴 분석을 수행한 결과

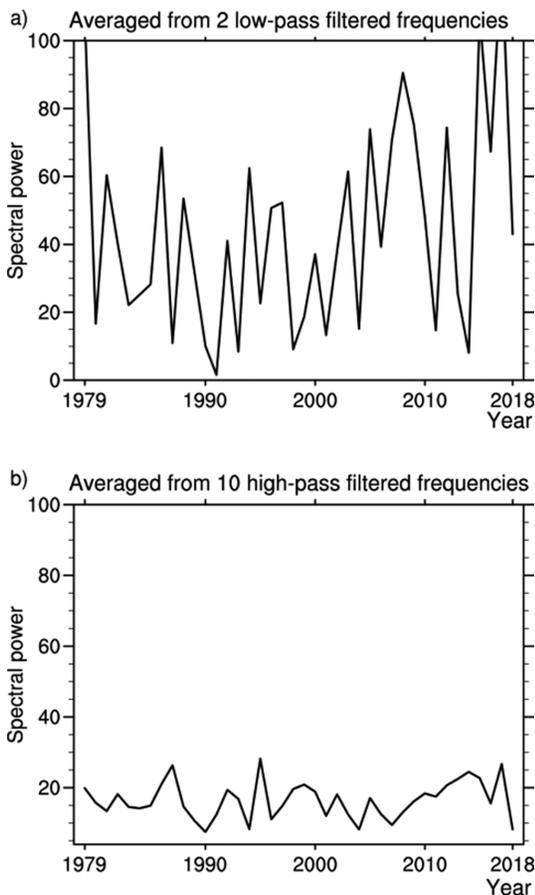


Fig. 8. Spectral power averaged from a) 2 low-pass filtered frequencies and b) 10 high-pass filtered frequencies shown in Fig. 7.

6.9~8.2일 밴드에서 가장 뚜렷한 주기성을 보였고, 다음으로 4일의 단주기와 12.9~15.0일의 장주기도 검출되었다. 특히 최근 2014년 이후에는 유의한 주기의 검출이 매우 감소하였고, 삼한사온을 설명하는 7일 부근의 주기가 전혀 나타나지 않았다. 관측자료를 그대로 사용하여 분석하거나 또는 고/저주파 필터를 사용하여 분석한 통계적으로 유의한 주기들을 분석한 결과는 모두 7일 이상의 장주기가 점차 강화되는 경향과 7일 이하의 단주기가 감소하다가 최근 다시 증가하는 경향을 보여주었다. 이상의 겨울철 기온 주기성의 변화가 지구 온난화에 기인한 것인지 또는 자연적 변동성에 기인한 것인지에 대해서는 좀더 지켜봐야 할 것이다.

본 논문에서는 우리나라 겨울 기온의 변동 추세와 그 추세 안에서 파악되는 주기성의 변동에 대한 분석 결과를 제시하였으나, 그 원인에 대해서는 조사하지

않았다. 따라서 본 논문의 결과는 북반구 대기 순환과 관련한 역학적 원인 분석을 통해 규명될 수 있을 것이라 사료된다. 나아가 우리나라 겨울 기온의 장기 변동 추세가 온난화 경향 및 북극 해빙의 상태와 어떤 관련성이 있는지에 대해서도 살펴볼 필요가 있다. 최근 연구 결과에 의하면 우리나라 겨울철 한파의 발생 빈도는 온난화로 인해 감소하고 있는 것으로 나타났다(Min et al., 2015). 또한 우리나라 기후에 직, 간접적인 영향을 주고 있는 것으로 알려진 태평양 십년 주기 변동성(Pacific Decadal Oscillation)과의 관련성이나 북극진동, 시베리아 고기압, 알류산 저기압 강도의 장기적 변화에 기인한 영향에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「장기예측시스템 개발」(1365003054)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., and H.-J. Kim, 2010: Characteristics of monsoon climate in the Korean Peninsula, *J. Climate Res.*, **5**, 91-99 (in Korean with English abstract).
- Choi, G., 2015: Asymmetric changes in intra-seasonal means and extreme events of winter temperature in the Republic of Korea. *J. Climate Res.*, **10**, 137-151 (in Korean with English abstract).
- Choi, W., C.-H. Ho, M.-K. Kim, J. Kim, H.-D. Yoo, J.-G. Jhun, and J.-H. Jeong, 2018: Warming trend mixed with abrupt increase and linear increase of temperature over the Korean Peninsula. *Proc. Spring Conf. Kor. Meteor. Soc.*, 57-58 (in Korean).
- Jeon, M. J., and Y. Cho, 2015: An analysis of a winter-time temperature change and an extreme cold waves frequency in Korea. *J. Clim. Change Res.*, **6**, 87-94 (in Korean with English abstract).
- Jeong, Y.-K., 1988: Power spectral analysis of daily mean temperature and pressure in South Korea. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **9**, 71-80 (in Korean with English abstract).
- _____, and D.-K. Lee, 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. Kor. Meteor. Soc.*, **29**, 345-363 (in Korean with English abstract).
- Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new East Asian Winter Monsoon Index and associated characteristics of the

- winter monsoon. *J. Climate*, **17**, 711-726.
- Jung, H.-S., Y. Choi, J.-H. Oh, and G.-H. Lim, 2002: Recent trends in temperature and precipitation over South Korea. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1327-1337.
- Kim, K.-Y., and J.-W. Roh, 2010: Physical mechanisms of the wintertime surface air temperature variability in South Korea and the near-7-day oscillations. *J. Climate*, **23**, 2197-2212, doi:10.1175/2009JCLI3348.1.
- Lee, B.-S., 1971: On the winter temperature surges in Seoul Area. *J. Kor. Meteor. Soc.*, **7**, 41-46 (in Korean with English abstract).
- _____, 1985: Regular temperature fluctuations and the singularity in winter Seoul, Korea. *J. Korean. Meteor. Soc.*, **21**, 34-45 (in Korean with English abstract).
- Lee H.-Y., J. Kim, I.-G. Park, H. Kang, and H. Ryu, 2018: Local enhancement mechanism of cold surges over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **28**, 383-392 (in Korean with English abstract).
- Lim, S.-M., S.-W. Yeh, and G.-R. Kim, 2012: Analysis on the relationship between the Korean temperature and the atmospheric circulation over the northern hemisphere during winter. *Atmosphere*, **22**, 187-197 (in Korean with English abstract).
- Min, S.-K., and Coauthors, 2015: Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 103-121, doi:10.1007/s13143-015-0066-5.
- Moon, J.-Y., C. Park, Y. Choi, and D. Pyeon, 2014: Recent change in the intraseasonal characteristics of winter temperature over South Korea. *Climate Res.*, **9**, 167-180 (in Korean with English abstract).
- NIMS, 2018: Report on climate change for 100 years over the Korean Peninsula. NIMS 11-1360620-000132-01, 31 pp (in Korean).
- Rodionov, S. N., 2004: A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09204, doi:10.1029/2004GL019448.
- Ryoo S.-B., and W.-T. Kwon, 2002: Climatological characteristics of cold winter and cold days over South Korea. *Atmosphere*, **12**, 288-291 (in Korean).
- Wang, L., and W. Chen, 2010: How well do existing indices measure the strength of the East Asian Winter Monsoon? *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 855-870, doi:10.1007/s00376-009-9094-3.
- Zangvil, A., 1975: Temporal and spatial behavior of large-scale disturbances in tropical cloudiness deduced from satellite brightness data. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 904-920.