

서울 지역 겨울철 풍향별 풍속과 발생빈도의 장기 추세에 관한 연구

배진호

건국대학교 경제학과 교수

Long-term Trends in Winter Wind Speed and Frequency by Direction in Seoul

Bae, Jinho

Professor, Department of Economics, Konkuk University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study investigated long-term linear trends in both wind speed and frequency of 16 wind directions during winter in Seoul. Annual data on speed and frequency were analyzed by direction for Dec., Jan. and Feb. from 1963 to 2019. Six wind directions, representing westerlies and northerlies, exhibited downward trends in speed: WNW and W in all three months, WSW in Dec. and Jan., N and NNE in Dec., and NNW in Jan. WNW and W had the largest decreases. Overall speed regardless of direction showed a downward trend for all three months. The weakening Siberian High was related to the decline in wind speed. Long-term trends were found in frequency of occurrence as well; downward trends were detected in ENE for Dec. and Jan., and in WSW for Jan. Upward trends were observed for three northerlies, NNW, N and NNE: for NNE in Dec. and Feb., and for N and NNW in Jan. The large downward trend in ENE winds led to a change in annual prevailing wind direction.

Key words: Wind Speed, Frequency of Occurrence of Wind Direction, Long-Term Trend, Seoul

1. 서론

바람은 일상생활과 밀접하게 관련된 기후 요소이다. 바람의 세기 즉 풍속은 신재생에너지인 풍력 발전의 생산성을 결정하는 핵심 요소이다(Pieralli et al., 2015). 대기 중 미세먼지 농도와도 깊이 관련돼 있어서 바람이 느리게 불 때 대기는 정체되고 미세먼지의 이동이 저하되어 농도는 상승한다(Chae, 2009). 또한 토목구조물의 내풍 설계에 사용되는 설계기본풍속(basic design wind speed)을 산정하는데 중요한 요소이다(Choi et al., 2010). 바람이 불어오는 방향인 풍향의 중요성도 무시할 수 없는데, 풍향의 변화는 날씨 조건이 경제나 사회에 끼치는 영향에 중요하게 작용할 수 있다(Bierstedt et al., 2015). 풍향은 또한 사고로 유출된 유해화학물질의 대기확산으로부터 안전하게

벗어날 수 있는 대피 장소의 위치 선정에 있어서 중요한 요소이며(Jeon et al., 2017) 환경친화적인 건축물의 설계에 필요한 기초자료로 사용된다(Yoon, 2003).

지구온난화에 기인한 기후변화는 대기 순환을 변화시켜 바람의 패턴에 영향을 준다(Lehmann et al., 2011). 풍속에 변화가 발생하며(Eichelberger et al., 2008; Keevallik, 2008) 풍향별 발생빈도도 달라진다(Jaagus and Kull, 2011; Lehmann et al., 2011). Hasanean et al. (2013)은 Hadley 순환이 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 겨울철 기후에 지배적 영향을 미치는 시베리아 고기압과 깊이 관련돼 있음을 보고한다. 그리고 기후변화와 더불어 시베리아 고기압의 특성에는 상당한 변화가 있었음이 밝혀졌다. 그 강도는 점점 약해졌으며(Gong and Ho, 2002; Panagiotopoulos et al., 2005; Bae, 2019), 중심 세력의 위

†Corresponding author : jinhbk@konkuk.ac.kr (05029, Department of Economics, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-450-3646)

ORCID 배진호 0000-0001-5040-3770

치는 남서쪽으로 이동하였다(Sugimoto and Hanawa, 2009; Surrey and King, 2015). Niu et al.(2010)과 Li et al. (2016)에 따르면 시베리아 기단의 세력 약화는 중국의 겨울철 풍속 감소의 원인이다. 이 기단의 직접적 영향권 안에 있는 우리나라도 이 기단의 세력 약화로 인해 기압경도력의 변화가 발생했을 수 있고 그에 따라 풍속이 영향 받았을 것으로 예상된다. 또한, 이 기단의 중심 지역의 이동은 기압경도 방향에도 변화를 가져와서 그 결과 겨울철 바람의 풍향이 변화를 일으켰을 수 있다.

다수의 연구에서 우리나라 바람 특성 변화가 밝혀져 왔다. Lee (2012)는 1월과 8월의 평균 풍속과 최대 풍속이 해안 지역에서 감소한 것을 밝힌다. Lee et al.(2020)은 도시 지역의 지표면 풍속이 장기적으로 감소 추세를 보여 왔으며 이는 대기 정체도를 증가시킨다고 보고한다. 풍향의 변화에 대해서는, Lee et al.(2012)는 1월의 동해안에서는 남서풍 발생빈도 감소와 서남서풍 혹은 서풍 발생빈도의 증가가 일어나며 남해안에서는 북서풍 발생빈도가 감소함을 밝힌다. An et al.(2020)은 지구온난화로 인한 겨울철 기온 체계 변화가 우리나라 바람의 풍향에 영향을 미침을 보고한다.

본 연구는 서울 지역의 겨울철 풍향별 풍속과 발생빈도의 장기 추세를 분석하고자 한다. 서울은 대도시로서 많은 인구가 거주하고 있으며 시민들의 미세먼지 농도에 대한 민감도가 무척 높다. 또한 한반도 서쪽에 위치하여 겨울철에는 시베리아 기단의 영향을 강하게 받는다. 따라서 기후변화와 더불어 서울의 바람 특성에도 장기적인 변화가 발생했을 가능성이 크다. 기상청에서는 기상 월보·기상 연보를 통해 서울 지역의 월별·연도별 바람 특성을 보고하고 있지만, 서울 지역만을 대상으로 한 장기간에 걸친 바람 특성 변화에 관한 연구는 드물다. Yoon (1992)는 1981~1990년 기간을 분석하였지만 10년간에 걸친 변화가 아닌 이 기간의 평균적인 바람 특성을 분석하였다. 본 연구는 1963~2019년 57년간의 연도별 시계열 자료를 이용하여 풍향별 풍속과 풍향별 발생빈도가 장기 추세를 갖는지를 16방위 각각에 대해 파악하고자 한다. 겨울철은 12월, 1월, 2월로 규정하였고 월별로 분석한다. 본 연구에서 밝히고자 하는 풍향별 풍속과 풍향별 발생빈도에 있는 장기 추세는 겨울철 몬순의 변화가 그 원인이다. 이 인과관계의 특징을 규명하는 것은 서울 지역뿐만 아니라 우리나라 겨울철 기후변화를 이해하는데 있어서 중요하다. 이 주제는 본 연구의 목적을 넘어서며 추후 많은 연구로 이어질 것으로 기대된다.

탁월풍은 가장 자주 부는 풍향을 가리키는데, 서울의 겨울철 탁월풍은 서풍 또는 서북서풍으로 알려져 있다.

1981~1990년 10년간을 볼 때는 서풍이 가장 빈도가 높았고(Yoon, 1992), 1999년은 서북서풍(SI, 2000), 2005년은 북서풍(SI, 2007), 2012년은 서북서풍이 탁월풍이었다(SI, 2013). 기후변화는 탁월풍의 풍향을 변화시킬 수 있다(Lee et al., 2012). 만약 장기간에 걸쳐 꾸준히 어떤 풍향의 발생빈도는 증가하고 또는 어떤 풍향의 빈도가 감소한다면 탁월풍 풍향은 변할 수 있다. 이에 본 연구는 서울의 겨울철 탁월풍 풍향이 57년간 매년 어떻게 변화해 왔는지 보고자 하며 그 변화 양상이 풍향별 발생빈도의 장기 추세와 어떤 관련이 있는지 분석하고자 한다.

2. 연구 자료 및 분석 방법

분석에 사용된 원자료는 12월, 1월, 2월의 서울 지역의 지상 풍속과 풍향의 시간별 자료이다. 1일 24시간 정시의 자료로써 각 시각의 값은 정시 이전 10분간의 평균풍향·풍속이다(KMA, 2016). 분석 기간은 1963~2019년의 57년이다. 1963년은 해당 3개월의 풍속과 풍향 모두 일24회 정시 관측자료를 얻을 수 있는 가장 빠른 연도이다. 풍향은 16방위로 구분하였다. 즉 북북동=20°, 북동=50°, 동북동=70°, 동=90°, 동남동=110°, 남동=140°, 남남동=160°, 남=180°, 남남서=200°, 남서=230°, 서남서=250°, 서=270°, 서북서=290°, 북서=320°, 북북서=340°, 북=360°이다. 자료는 기상청 기상자료개방포털의 종관기상관측에서 내려받았다(KMA, 2020). 측정 지점은 37°34'N, 126°58'E로서 서울시 송월동의 서울기상관측소이다. 풍속계의 고도는 1979년과 1999년에 두 차례 변화했는데 1963~1978년 기간에는 11.5 m, 1979년~1998년 기간에는 10.6 m, 그 이후에는 10.0 m였다(KMA, 1963~2019).

장기 추세 분석을 하기 위해 시간별 자료를 연도별 자료로 전환하였다. 1월을 예로 들면 전환 과정은 다음과 같다. 어느 한 해의 1월에는 744개의 시간 자료가 관측된다. 이 자료를 16개의 풍향별로 분류한 후 풍향별 평균 풍속과 풍향별 발생빈도를 구하였다. 풍향별 평균 풍속은 같은 풍향을 갖는 풍속들의 평균값이다. 풍향별 발생빈도는 상대적 빈도로서 16방위 풍향뿐만 아니라 정온(calm)을 포함한 744개 전체 시간 자료에서 각 풍향이 차지하는 비율을 퍼센트로 표현한 값이다. 정온의 기준이 2006년에 0.2 m/s 이하에서 0.4 m/s 이하로 변경되어 2005년까지의 자료도 변경된 기준을 적용하여 정온 여부를 판단하였다. 이러한 계산을 1963년부터 2019년까지 실행하여 1월의 16 풍향별 평균 풍속(이하에서는 풍속)과 풍향별 발생빈도에 대한 57년간의 연도별 자료를 얻었다. 같은 방식으로 12월과 2월에 대한

연도별 자료를 얻었다. 12월은 1월과 마찬가지로 744개, 2월에는 672개(윤년의 경우 696개)의 시간별 관측값이 있다.

위와 같이 구축된 연도별 자료에 대해 선형 추세 모형을 적용하여 장기 추세를 추정하였다. 추정은 16개 풍향별로 그리고 12월, 1월, 2월의 달별로 개별적으로 실시하였다.

3. 분석 결과

3.1 풍향별 풍속의 추세

Table 1(a)는 12월, 1월, 2월 풍속의 연도별 자료에 선형 추세 모형을 적용하여 추정한 추세의 값을 16개 풍향

에 대해 보고하고 있다. 항목 “Overall”은 풍향을 고려하지 않은 모든 바람의 풍속으로서 16개 풍향과 정온을 포함한다. 진하게 표시된 값은 통계적으로 유의한 추세값이며 ***와 **는 각각 1%와 5% 수준을 가리킨다.

3.1.1 12월

5% 수준에서 통계적으로 의미 있는 추세를 갖는 풍향은 16개 중 5개이고 모두 음(-)의 추세를 보였으며 증가 추세를 보이는 풍향은 없었다. Fig. 1(a)는 이들 5개 풍향에 대한 풍속 추세값의 크기를 16방위도에 표시한 것이다. 원 바깥(안)쪽으로 향하는 화살표는 풍속 증가(감소) 추세를 가리킨다.

Table 1. Trend slopes for (a) wind speed and (b) frequency by direction

| Direction | (a) Speed trend (m·s ⁻¹ /year) | | | (b) Frequency trend (%p/year) | | |
|-----------|---|-------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| | Dec. | Jan. | Feb. | Dec. | Jan. | Feb. |
| NNE | -0.0052** | -0.0035 | -0.0035 | 0.0835*** | 0.0524 | 0.0469** |
| NE | 0.0032 | 0.0014 | -0.0046 | -0.0229 | -0.0476 | -0.0476 |
| ENE | 0.0045 | -0.0032 | -0.0035 | -0.1383*** | -0.1298** | -0.1179 |
| E | 0.0055 | 0.0042 | 0.0021 | -0.0164 | -0.0037 | -0.0090 |
| ESE | -0.0025 | -0.0007 | 0.0021 | 0.0111 | 0.0016 | 0.0024 |
| SE | 0.0079 | -0.0033 | -0.0054 | 0.0047 | 0.0003 | -0.0015 |
| SSE | -0.0013 | -0.0038 | 0.0082 | 0.0034 | -0.0012 | 0.0012 |
| S | 0.0064 | 0.0014 | -0.0014 | -0.0046 | 0.0000 | 0.0013 |
| SSW | -0.0063 | 0.0022 | -0.0054 | -0.0045 | 0.0017 | 0.0079 |
| SW | -0.0040 | -0.0016 | 0.0010 | -0.0095 | -0.0131 | -0.0228 |
| WSW | -0.0132*** | -0.0083** | -0.0074 | -0.0393 | -0.0568** | -0.0344 |
| W | -0.0099** | -0.0124*** | -0.0157*** | 0.0789 | 0.1090 | 0.0939 |
| WNW | -0.0128*** | -0.0146*** | -0.0165*** | 0.0730 | 0.0552 | 0.0507 |
| NW | -0.0065 | -0.0044 | -0.0007 | -0.0323 | -0.0163 | 0.0164 |
| NNW | -0.0068 | -0.0104*** | 0.0006 | 0.0176 | 0.0524** | 0.0311 |
| N | -0.0076** | -0.0052 | -0.0058 | 0.0253 | 0.0338*** | 0.0158 |
| Overall | -0.0054*** | -0.0072*** | -0.0078*** | | | |

Bold entries are statistically significant with *** and ** being 1% and 5% level, respectively. “Overall” indicates wind of all 16 wind directions, including calm.

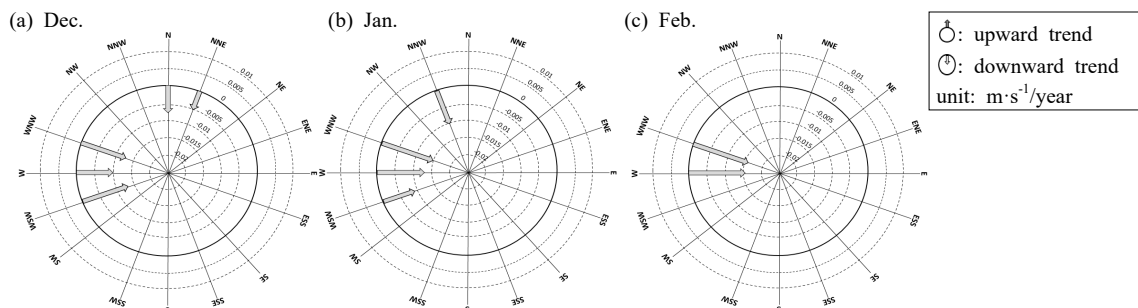


Fig. 1. Magnitude of the linear trend of wind speed by direction for (a) Dec., (b) Jan., and (c) Feb. Inward (outward) arrows indicate downward (upward) trends. Only directions with a statistically significant trend at the 5% level are shown

풍속이 추세에 따라 감소한 풍향은 서남서풍, 서풍, 서북서풍, 북풍, 북북동풍으로서 서풍계열과 북풍계열의 바람이다. 가장 큰 감소 추세를 보인 풍향은 서남서풍으로서 매년 0.0132 m/s씩 감소하였다. 서북서풍은 매년 0.0128 m/s만큼 속도가 감소하여 두 번째로 큰 감소 추세를 보였다. 이어서 서풍은 0.0099 m/s, 북풍은 0.0076 m/s, 북북동풍은 0.0052 m/s만큼의 풍속 감소를 매년 보였다. 한편, 풍향을 고려하지 않은 전체 바람의 12월 풍속은 매년 0.0054 m/s만큼 감소했고 이 추세값은 1% 수준에서 통계적으로 유의하다.

3.1.2 1월

16개 풍향 중 4개 풍향에서 통계적으로 의미 있는 추세가 나타났고 그 부호는 모두 음(-)이었고 증가 추세를 갖는 풍향은 없었다. 풍속이 꾸준히 감소한 풍향은 서남서풍, 서풍, 서북서풍, 북북서풍의 서풍계열과 북풍계열이다. 서남서풍, 서풍, 서북서풍에서 풍속 감소 추세가 있는 점은 12월과 동일하다. Fig. 1(b)는 풍속 감소 추세를 보이는 4개 풍향에 대한 추세의 크기를 16방위도에 표시하고 있다. 가장 큰 감소 추세를 보이는 풍향은 서북서풍으로서 매년 서북서풍은 0.0146 m/s만큼의 풍속 하락을 보였다. 그 뒤를 이어 해마다 서풍은 0.0124 m/s씩, 북북서풍은 0.0104 m/s씩, 서남서풍은 0.0083 m/s씩 풍속이 감소하였다. 한편, 풍향을 고려하지 않고 볼 때 1월의 모든 바람의 풍속은 그 추세값이 -0.0072 m/s이고 1% 수준에서 통계적으로 유의하다. 따라서 전반적으로 1월의 풍속은 12월보다 더 빠르게 감소했다.

3.1.3 2월

16개 풍향 중 2개 풍향에서만 통계적으로 의미 있는 추

세가 나타났고 그 부호는 모두 음(-)이었다. 풍속 감소 추세를 보이는 두 풍향은 서풍과 서북서풍이다. 이들 풍향의 풍속 추세의 크기는 Fig. 1(c)의 16방위도에 화살표로 표시되어 있다. 풍속 증가 추세를 갖는 풍향이 없으면서 서풍과 서북서풍에서 풍속 감소 추세가 있었던 점은 12월, 1월과 같다. 서북서풍과 서풍은 매년 각각 0.0165 m/s, 0.0157 m/s만큼의 큰 풍속 하락이 있었다. 한편, 풍향을 고려하지 않을 때 2월 풍속의 추세는 -0.0078 m/s이고 통계적으로 유의하다. 따라서 2월의 풍속 하락 속도는 1월 보다는 약간 더 크고 12월보다는 훨씬 더 크다. 감소 추세를 보이는 풍향의 개수가 12월과 1월보다 더 작은데도 전체적인 풍속의 하락 속도가 큰 이유는 서북서풍과 서풍의 풍속 감소 추세가 다른 달에 비해 월등히 크기 때문이다.

3.2 풍향별 발생빈도의 추세

각 풍향이 전체 풍향에서 차지하는 발생빈도는 일정하지 않고 매년 변화한다. 그리고 그 빈도는 장기적으로 증가 또는 감소 추세를 가질 가능성이 있다. 이러한 가능성을 파악하기 위해 각 풍향의 연도별 발생빈도 자료에 선형 추세 모형을 적용하였고 Table 1(b)에 추세값 추정치를 풍향별로 보고하고 있다.

3.2.1 12월

16개 풍향 중 2개 풍향의 발생빈도가 유의적인 추세를 갖는 것으로 나타났고 증가 추세와 감소 추세를 보이는 풍향은 각각 1개씩이었다. Fig. 2(a)는 이 두 풍향의 발생빈도 추세의 크기를 16방위도에 화살표로 표시한 것이다. 원 바깥(안)쪽으로 향하는 화살표는 증가(감소) 추세를 나타낸다.

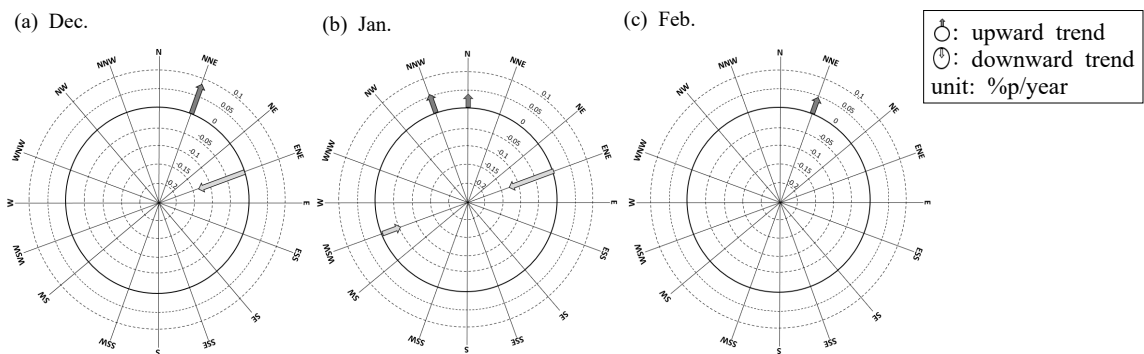


Fig. 2. Magnitude of the linear trend of wind frequency by direction for (a) Dec., (b) Jan., and (c) Feb. Inward (outward) arrows indicate downward (upward) trends. Only directions with a statistically significant trend at the 5% level are shown

발생빈도에 감소 추세가 있었던 풍향은 동북동풍이다. 동북동풍의 발생빈도는 매년 0.1383%p씩 큰 폭으로 감소하였다. 이에 반하여 발생빈도에 증가 추세가 있었던 풍향은 북북동풍이다. 이 풍향의 발생빈도는 해마다 0.0835%p씩 증가하였다.

3.2.2 1월

4개 풍향에서 발생빈도의 추세값이 유의적으로 나타났고 2개 풍향은 감소 추세, 2개 풍향은 증가 추세를 보였다. Fig. 2(b)는 이들 풍향의 발생빈도 추세의 크기를 16방위도에 표시하고 있다. 동북동풍은 12월과 마찬가지로 발생빈도가 감소 추세를 보였으며 그 추세의 크기도 -0.1298%p/년으로서 매우 컸다. 서남서풍도 발생빈도에 감소 추세가 있었으며 매년 0.0568%p만큼의 하락이 있었다. 발생빈도에 증가 추세가 있었던 풍향은 북북서풍과 북풍이다. 이 두 풍향의 발생빈도는 각각 매년 0.0524%p와 0.0338%p씩 증가하였다.

3.2.3 2월

발생빈도 추세가 유의적인 풍향은 유일하게 북북동풍 1개이며 증가 추세를 보였다. 북북동풍의 발생빈도가 증가한 것은 12월과 유사한 점이다. 이 풍향의 발생빈도 추세의 크기는 Fig. 2(c)의 16방위도에 표시하였다. 이 풍향의 발생빈도는 해마다 0.0469%p씩 증가하였다.

3.2.4 탁월풍 풍향의 변화

Fig. 3은 12월, 1월, 2월에 대한 각 연도의 탁월풍의 풍향이다. 수직축은 풍향을 가리키며 원으로 표시된 풍향이 그해의 탁월풍 풍향이다.

12월, 1월, 2월에서 공통으로 나타나는 점은 탁월풍 풍향은 매년 일정한 것은 아니며 서북서풍이 탁월풍으로서 가장 빈도가 높은 풍향이라는 점이다. 서북서풍이 탁월풍이었던 해는 전체 57년 중 12월은 31년, 1월은 32년, 2월은 30년이며 이는 대략 55%를 차지한다. 나머지 45%는 서풍, 북서풍, 서남서풍의 서풍계열 3개 풍향과 동북동풍, 북동풍, 북북동풍, 동풍의 북·동풍계열 4개 풍향이 었다. 서풍계열 3개 풍향 중에서는 서풍이, 북·동풍계열 4개 풍향 중에서는 동북동풍의 비율이 가장 높았다. 1999년 12월의 탁월풍이 정온인 것은 특이한 점이다.

서북서풍은 전체 기간 고르게 탁월풍이었던 것으로 보인다. 반면 동북동풍과 서풍이 탁월풍이었던 시기는 1979/1980년을 기준으로 차이를 보인다. 1979/1980년 이전에는 동북동풍이 탁월풍으로 자주 등장하였으나 서풍은 반대로 1979/1980년 이후에만 대체로 탁월풍으로 나타난다. 이는 그 횟수와 비율을 보고한 Table 2를 통해 확인된다.

동북동풍이 1963 ~ 1979/1980년 기간 탁월풍이었던 횟수는 12월, 1월, 2월에 각각 4회, 5회, 2회이었다. 1963 ~ 1980년의 18년 기준으로 볼 때 그 비율은 각각 22.2%, 27.8%, 11.1%이었다. 1979/1980 ~ 2019년 기간에는 12월, 1월, 2월

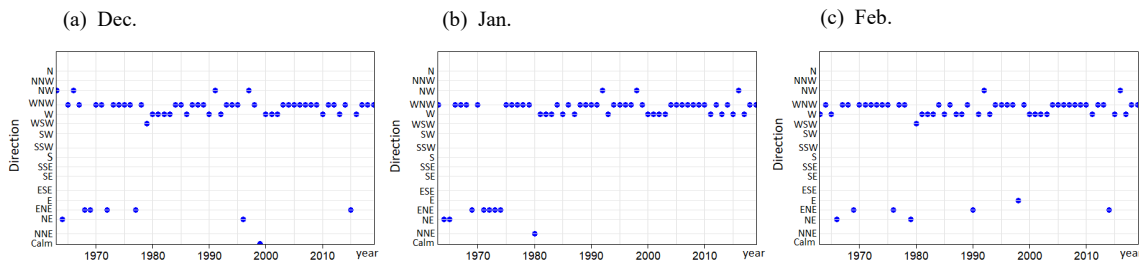


Fig. 3. Year-by-year direction of the prevailing wind for (a) Dec., (b) Jan., and (c) Feb. over 1963 ~ 2019

Table 2. The number of years and the percentage of (a) ENE and (b) W being the prevailing wind of the year by month over 1963 ~ 1979/1980 and 1979/1980 ~ 2019

| | (a) ENE | | | (b) W | | |
|------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | Dec. | Jan. | Feb. | Dec. | Jan. | Feb. |
| 1963 ~ 1979/1980 | 4(22.2%) | 5(27.8%) | 2(11.1%) | 0(0%) | 0(0%) | 2(11.1%) |
| 1979/1980 ~ 2019 | 1(2.4%) | 0(0%) | 2(4.9%) | 13(31.7%) | 14(34.1%) | 13(31.7%) |

The percentages shown in parentheses were calculated by dividing the number of years being the prevailing wind by the total years of the period.

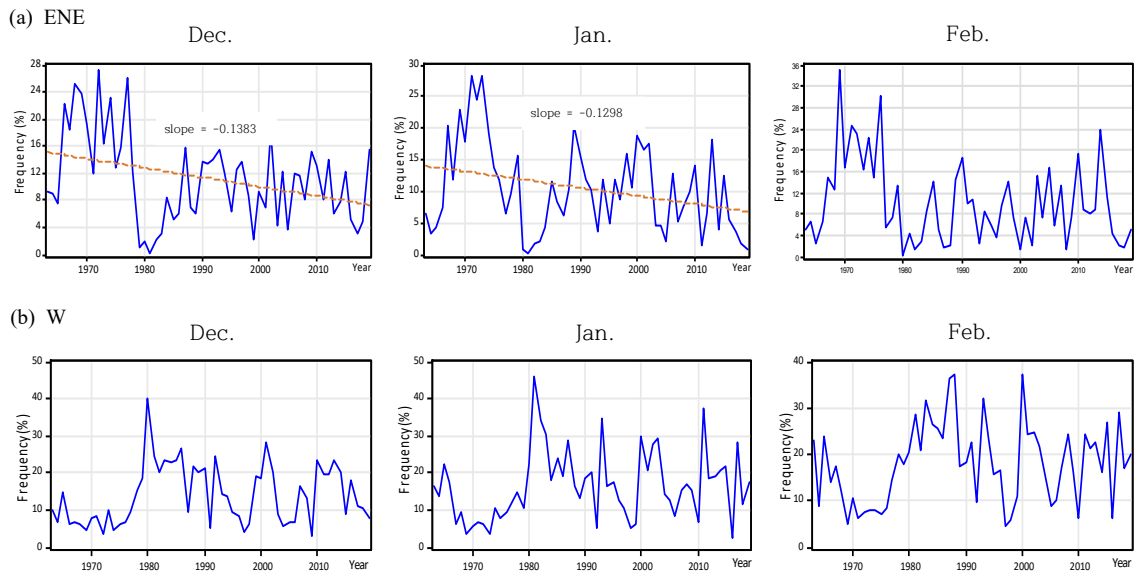


Fig. 4. Time series of wind frequency of (a) ENE and (b) W for Dec., Jan., and Feb. over 1963 ~ 2019. For Dec. and Jan. of ENE, the linear trend is drawn as a dotted line along with the slope in Table 1(b)

에 각각 1회, 0회, 2회이었고 1979~2019년의 41년 기준으로 볼 때 그 비율은 2.4%, 0%, 4.9%이었다. 동북동풍에서 이러한 특징이 나타나는 점은 이 풍향의 발생빈도가 강함(-)의 추세를 보이는 것과 관련 있다. Fig. 4(a)는 동북동풍의 발생빈도 시계열을 그리고 있다. 음(-)의 추세가 있는 12월과 1월에는 그 추세선이 함께 그려져 있다. 12월과 1월의 경우 1963년 이후 발생빈도가 꾸준히 감소하였고 그 결과 1979/1980년 이후에는 동북동풍이 탁월풍이 된 빈도가 낮아졌음이 유추된다. 2월의 경우에는 통계적으로 유의적인 음(-)의 추세는 없지만 1979/1980년 이후의 발생빈도가 그 이전보다 전반적으로 더 낮은 수준을 유지함이 나타나고 그 결과 탁월풍 빈도도 낮아졌음을 알 수 있다.

서풍에는 반대 현상이 보인다. 1963~1979/1980년 기간에 서풍이 탁월풍이었던 해는 12월, 1월, 2월 각각 0회, 0회, 2회였고 1963~1980년의 18년에 대한 비율로는 0%, 0%, 11.1%였다. 1979/1980~2019년 기간에는 12월과 2월에 13회, 1월에 14회 탁월풍의 지위를 차지하였고 1979~2019년의 41년 기준으로 볼 때 비율은 31.7%, 34.1%, 31.7%였다. Fig. 4(b)에는 서풍의 발생빈도 시계열이 그려져 있다. 유의적인 추세는 없으므로 추세선은 표시되어 있지 않다. 비록 발생빈도가 증가 추세를 보이지는 않지만, 1979/1980년 이후 발생빈도는 그 이전보다 전반적으로 더 높은 수준을 유지한다. 그 결과 서풍이 1979/1980년

이후 탁월풍이 된 비율은 그 이전에 비해 월등히 높다.

3.3 풍속 변화와 시베리아 고기압 강도 변화와의 관계

풍향별 풍속에 나타난 추세는 겨울 몬순의 변화와 관계되어 있다. 서울 지역 겨울철은 시베리아 기단의 영향을 크게 받으므로 여기서는 시베리아 고기압과의 관계를 확인한다. 물론 겨울 몬순의 변화를 시베리아 고기압만으로 설명하는데 분명히 한계가 있다. Fu et al.(2011)에 따라 POI (Pacific Oscillation Index)와의 관련성도 조사하였지만, 연관성이 발견되지 않아 그 결과는 보고하지 않는다. 시베리아 고기압은 시베리아 고기압 강도(Siberian High Index, 이하에서 SHI)로 측정하였다. 이 지수는 80°E-120°E, 40°N-65°N 지역의 sea-level의 평균 기압이다. Trenberth and Paolino (1980)에 기초한 5°×5° grid의 일별 자료를 평균하여 월별 자료를 구하였고 자료는 National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research (NCAR/UCAR)의 Research Data Archive에서 받았다. SHI는 풍속에 영향을 미치는 기압경도력과는 관련이 있지만, 풍향에 영향을 미치는 기압경도력의 방향을 측정하는 데는 한계가 있다. 따라서 풍속과 SHI의 관계에 대해서만 초점을 두었다.

우선, SHI에 추세가 있는지를 살펴보았다. 그런 다음

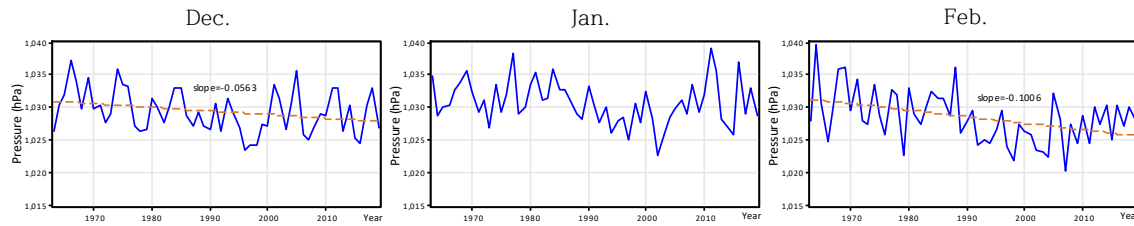


Fig. 5. Time series of the Siberian High index defined as mean sea level pressure averaged over 80°E–120°E, 40°N–65°N for Dec., Jan., and Feb. over 1963 ~ 2019. A downward trend (dotted line) is found for Dec. and Feb., not for Jan. The trend slope is given

SHI 추세의 방향이 풍속의 약화 추세와 부합하는지 그리고 풍속 추세와 SHI 추세의 크기 비교를 통해 SHI의 변화에 대응해 풍속은 얼마만큼 변하는지 확인하였다. 그리고 추세에서 벗어난 풍속과 추세에서 벗어난 SHI의 관계 즉 풍속과 SHI의 경년변동 사이의 관계를 조사하였다.

Fig. 5는 1963 ~ 2019년 기간 12월, 1월, 2월에 대한 SHI 시계열을 그 선형 추세와 함께 그리고 있다. 추세선은 점선으로 표시되어 있다.

12월과 2월의 SHI에는 5% 수준에서 유의한 추세가 발견되었고 추세의 부호는 모두 음(-)이었다. 시베리아 고기압의 강도가 장기적으로 하락 추세를 보이는 점은 풍속 하락 추세와 부합한다. 풍속 하락 추세가 서풍계열과 북풍계열 풍향에 나타나기 때문이다. 12월의 추세의 값은 -0.0563이어서 SHI가 매년 0.0563 hPa씩 약화하였음을 알 수 있다. 2월의 추세 값은 -0.1006으로 나타났다. 즉 2월의 SHI는 매년 0.1006 hPa씩 감소하였고 이는 12월에 비해 약 2배 정도 빠른 감소 속도이다. 12월, 2월과 달리 1월은 SHI에 선형 추세가 발견되지 않았다. 따라서 1월 풍속의 장기적인 감소 추세가 장기간에 걸친 SHI의 변화와 관계되어 있다고 볼 수 없다.

Table 3. Decrease in wind speed corresponding to 1hPa decrease in the Siberian High index (m·s⁻¹/hPa)

| Direction | Dec. | Feb. |
|-----------|--------|--------|
| NNE | 0.0924 | — |
| WSW | 0.2345 | — |
| W | 0.1758 | 0.1561 |
| WNW | 0.2274 | 0.1640 |
| N | 0.1350 | — |
| Overall | 0.0959 | 0.0775 |

Entries were calculated by dividing the wind speed trend slope given in Table 1(a) by the trend slope of the Siberian High index for Dec. and Feb. given in Fig. 5 “Overall” indicates wind of all 16 wind directions, including calm.

Table 3은 SHI 추세와 풍속 추세의 크기를 비교하여 SHI가 1 hPa 감소할 때 풍속이 감소하는 크기를 보여준다. SHI에 추세가 발견된 12월과 2월에 풍속 추세가 유의적인 풍향에 대해서만 계산되었다.

12월의 SHI가 추세선을 따라 1 hPa 하락할 때 풍속이 추세선을 따라 하락하는 크기는 서남서풍이 0.2345 m·s⁻¹, 서북서풍이 0.2274 m·s⁻¹, 서풍이 0.1758 m·s⁻¹, 북풍이 0.1350 m·s⁻¹, 북북동풍이 0.0924 m·s⁻¹이다. 풍향을 고려하지 않은 전체 바람의 풍속은 0.0959 m·s⁻¹만큼 느려졌다. 2월에는 SHI가 추세선을 따라 1 hPa 감소하면 서북서풍의 풍속은 0.1640 m·s⁻¹만큼, 서풍의 풍속은 0.1561 m·s⁻¹만큼 추세선을 따라 하락하였다. 풍향을 고려하지 않은 전체 바람의 풍속은 0.0775 m·s⁻¹만큼 줄었고 이는 1 hPa만큼의 시베리아 고기압 강도 하락에 대해 12월의 풍속 하락이 2월의 풍속 하락보다 더 큼을 가리킨다.

풍속과 SHI의 경년변동 사이의 관계를 확인하기 위해 추세에서 벗어난 풍속 자료와 추세에서 벗어난 SHI 자료를 구한 후 이들의 상관계수를 계산하여 Table 4에 제시하였다. 추세에서 벗어난 자료는 원래의 시계열 자료에서 추세의 값을 빼서 얻었다. 풍속에 추세가 있는 풍향만을 대상으로 하였고 1월의 SHI에는 추세가 없어 1월은 포함하지 않았다.

Table 4. Inter-annual variability correlation coefficients calculated between detrended wind speed and detrended SHI

| Direction | Dec. | Feb. |
|-----------|---------|--------|
| NNE | -0.2417 | — |
| WSW | -0.1415 | — |
| W | -0.0939 | 0.1802 |
| WNW | 0.04098 | 0.1424 |
| N | 0.0836 | — |
| Overall | 0.1552 | 0.2271 |

The detrended wind speed (SHI) was obtained from subtracting the linear trend from the original wind speed (SHI). “Overall” indicates wind of all 16 wind directions, including calm. No entries are statistically significant at the 5% level.

계산된 상관계수는 모두 5% 수준에서 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 추세를 벗어난 매년의 풍속은 추세를 벗어난 SHI와는 관계가 없다고 볼 수 있다. 즉 풍속의 경년변동은 SHI의 경년변동과 관계되어 있지 않다.

4. 결론

본 연구는 서울 지역 겨울철 풍향별 풍속과 풍향별 발생빈도가 장기적으로 추세를 따라 변화하였는지 분석하였다. 분석 기간은 1963~2019년이다. 겨울철은 12월, 1월, 2월로 규정하였고 16방위에 따라 16개 풍향이 고려되었다. 16개 풍향의 풍속과 발생빈도에 관한 57년간의 연도별 자료를 월별로 구축하였으며 개별 풍향의 풍속과 발생빈도에 대해 선형 추세 분석이 이루어졌다. 주된 결과는 다음과 같다. 첫째, 서풍계열과 북풍계열인 서남서풍, 서풍, 서북서풍, 북북서풍, 북풍, 북북동풍의 풍속이 꾸준히 감소하였다. 서풍과 서북서풍은 3개월 모두에서, 서남서풍은 12월과 1월에, 북풍과 북북동풍은 12월에 그리고 북북서풍은 1월에 그러하였다. 특히 겨울철 대표적인 풍향인 서북서풍과 서풍은 12월, 1월, 2월 추세의 평균이 각각 $0.0146 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{년}$ 과 $0.0127 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{년}$ 으로 매우 큰 풍속 감소를 나타냈다. 둘째, 풍향을 고려하지 않은 전반적인 풍속도 감소 추세를 보였는데 2월과 1월은 각각 $-0.0078 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{년}$ 과 $-0.0072 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{년}$ 이었고 12월은 훨씬 작은 $-0.0054 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{년}$ 이었다. 셋째, 북풍계열인 북풍, 북북동풍, 북북서풍의 발생빈도는 증가 추세를 보였고 동북동풍과 서남서풍은 감소 추세를 나타냈다. 북북동풍은 12월과 2월에, 북북서풍과 북풍은 1월에 증가 추세를 보였다. 동북동풍은 12월과 1월에 하락 추세가 있고 추세 평균은 $-0.1341\%/ \text{년}$ 으로 매우 컸다. 그 결과 동북동풍이 그 해의 탁월풍이었던 경우는 1979/1980년 이후에 확연히 감소하였다. 넷째, 12월과 2월의 시베리아 고기압의 강도에는 약화 추세가 발견되었다. 따라서 12월과 2월 풍속이 장기적으로 하락한 것은 시베리아 고기압의 강도가 장기적으로 약해진 것과 관련이 있다.

최근 들어 도시계획과 도시환경 측면에서 바람의 중요성이 점점 강조되고 있다. 서울시를 포함한 다수의 지방자치단체가 미세먼지 저감을 목적으로 한 바람길 조성 사업을 진행하고 있다. 또한 바람의 방향을 고려하여 대규모 개발단지를 설계하는 등의 도시계획 전략이 활용되고 있다. 이러한 노력이 성공하기 위해서는 대기의 변화 흐름 즉 바람의 특성을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 풍

향별 풍속과 풍향별 발생빈도가 장기 추세를 갖는다는 본 연구의 결과는 서울 지역 바람 특성에 관해 새롭게 밝혀진 결과이며, 이 결과는 바람의 특성을 더욱 정확히 이해할 수 있게 함으로써 서울을 더 환경친화적인 도시로 조성하는데 일조할 것으로 기대된다.

이와 같은 의의에도 불구하고 본 연구는 두 가지 한계를 분명히 가진다. 첫째, 시베리아 고기압 강도와 풍속 간의 관계만을 분석함으로써 기후변화로 인한 겨울철 몬순의 변화와의 관계를 제한적으로만 분석하였다. 시베리아 고기압 강도만으로는 겨울 몬순의 강도 변화를 표현하는데 한계가 있기 때문이다. 또한 풍향별 발생빈도의 변화와 겨울 몬순의 변화 사이의 관계를 규명하지 못하였다. 서울 지역 고유의 특성까지 고려하면서 겨울 몬순이 서울의 바람에 어떻게 영향을 미치는지를 더 엄밀하게 분석하는 것이 필요하며 이는 추후 과제로 남긴다. 둘째, 풍속계의 고도 변화에 따른 보정 풍속을 사용하지 않았다. 높은 고도에서 측정할수록 풍속은 빨라지는 성질이 있고 Choi et al. (2021)에 따르면 측정 고도 보정이 풍속의 장기 추세에 영향을 미칠 수 있다. 서울 지역 관측지점의 풍속계 고도는 1979년과 1999년에 낮아졌다. 이는 본 연구에서 얻은 풍속의 감소 추세가 과대 추정되었을 가능성이 있음을 가리킨다. 다양한 방법으로 보정된 풍속을 분석하는 추후 연구가 필요하다.

사사

이 논문은 2020학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

References

- An YJ, Won JJ, No JH, Kim JH, Kim MK. 2020. Regime shift of cold winter temperature in Korea. *Journal of Climate Research*. 15: 105-118 (in Korean with English abstract).
- Bae JH. 2019. Regime shift in the Siberian High. *Journal of Climate Research*. 14: 19-31 (in Korean with English abstract).
- Bierstedt S., Hünicke B., Zorita E. 2015. Variability of wind direction statistics of mean and extreme wind events over the Baltic Sea region. *Tellus A*. 67:

- 29073.
- Chae HJ. 2009. Effect on the PM10 concentration by wind velocity and wind direction, *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*. 24: 28-45 (in Korean with English abstract).
- Choi SH, Seo KS, Sung IK, Lee SH. 2010. Estimation of basic wind speeds reflecting recent wind speed data. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 10: 9-14 (in Korean with English abstract).
- Choi Y.-J., Park C.-H., Son S.-W., Lee J.-W. Hong D.-C. 2021. Long-term trend of surface wind speed in Korea: Anemometer height adjustment. *Atmosphere*. 31: 101-112 (in Korean with English abstract).
- Eichelberger S., Mccaa J., Nijssen B., Wood A. 2008. Climate change effects on wind speed. *North American Windpower*. July.
- Gong DY, Ho CH. 2002. The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia. *Theoretical and Applied Climatology*. 72: 1-9.
- Fu G., Yu J., Zhang Y., Hu S., Ouyang R., Liu W. 2011. Temporal variation of wind speed in China for 1961-2007. *Theoretical Applied Climatology*. 104: 313-324.
- Hasanean H.M., Almazroui M., Jones P.D., Alamoudi A.A. 2013. Siberian high variability and its teleconnections with tropical circulations and surface air temperature over Saudi Arabia. *Climate Dynamics*. 41: 2003-2018.
- Jaagus J., Kull A. 2011. Changes in surface wind direction in Estonia during 1966-2008 and their relationships with large-scale atmospheric circulation. *Estonian Journal of Earth Science*. 60: 220-231.
- Jeon BH, Kim HS, Oh SB, Kim HT. 2017. A study on improvement plan for selection of evacuation site through analysis of meteorological data-focus on Incheon, Siheung, Ansan. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*. 18: 16-22 (in Korean with English abstract).
- Keevallik S. 2008. Wind speed and velocity at three Estonian coastal stations 1969-1992. *Estonian Journal of Engineering*. 14: 209-219.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 1963 ~ 2019. Annual climatological report. Seoul: Korea Meteorological Administration (in Korean).
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2016. Guide to climatological observation. Seoul: Korea Weather Data Service (in Korean).
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2020. Automated synoptic observing system (ASOS) data [assessed 2020 Oct 29]. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltnList.do?pgmNo=36> (in Korean).
- Lee SH. 2012. A study on the change of wind speed in South Korea: in case of January and August. *Journal of the Korean Geographical Society*. 47: 347-358 (in Korean with English abstract).
- Lee SH, Jeong JH, Joh CH. 2012. A study on the change of wind direction on January and August in South Korea. *The Geographical Journal of Korea*. 46: 133-145 (in Korean with English abstract).
- Lee DS, Wang SY, Zhao L., Kim HC, Kim KC, Yoon JH. 2020. Long-term increase in atmospheric stagnant conditions over northeast Asia and the role of greenhouse gases-driven climate warming. *Atmospheric Environment*. 241: 117772.
- Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J. 2011. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea over for the period 1958 to 2009. *Climate Research*. 46: 185-196.
- Li Q., Zhang R., Wang Y. 2016. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon. *International Journal of Climatology*. 36: 346-354.
- Niu F., Li Z., Li C., Lee KH, Wang M. 2010. Increase of wintertime fog in China: potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *Journal of Geophysical Research*. 115: D00K20.
- Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D. 2005. Observed trends and

- teleconnections of the Siberian High: a recently declining center of action. *Journal of Climate*. 18: 1411-1422.
- Pieralli S., Ritter M., Odening M. 2015. Efficiency of wind power production and its determinants. *Energy*. 90: 429-438.
- SI (Seoul Institute). 2000. Thematic maps of Seoul. Seoul: Bopmunsa (in Korean).
- SI (Seoul Institute). 2007. Thematic maps of Seoul. Seoul: Bopmunsa (in Korean).
- SI (Seoul Institute). 2013. Thematic maps of Seoul. Seoul: Bopmunsa (in Korean).
- Sugimoto S., Hanawa K. 2009. Decadal and interdecadal variations of the Aleutian Low activity and their relation to upper oceanic variations over the North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 87: 601-614.
- Surrey A., King J. 2015. A new method for calculating ALPI: The Aleutian Low pressure index. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 3135.
- Trenberth K.E., Paolino D.A. 1980. The northern hemisphere sea-level pressure data set: trends, errors and discontinuities. *American Meteorological Society*. 108: 855-872.
- Yoon JO. 1992. On the prediction of the wind climate in Seoul based on probability distribution (Weibull distribution). *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*. 8: 145-152 (in Korean with English abstract).
- Yoon JO. 2003. The characteristics for wind in the 29 cities of Korea. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*. 19: 229-236 (in Korean with English abstract).