

영동지역 장기간(2000~2020년) 활강 강풍 특성

정지훈¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 채유진¹⁾ · 최영길¹⁾ · 김지윤¹⁾ · 임병환²⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립기상과학원 예보연구부 재해기상연구소

(접수일: 2022년 10월 11일, 수정일: 2022년 12월 4일, 게재확정일: 2022년 12월 27일)

Characteristics of Long-term (2000~2020) Downslope Windstorm in the Yeongdong Region

Ji-Hoon Jeong¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*}, Yu-jin Chae¹⁾, Young-Gil Choi¹⁾,
Ji-Yoon Kim¹⁾, and Byung-Hwan Lim²⁾

¹⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung - Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾High Impact Weather Research Laboratory, Forecast Research Department,
National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

(Manuscript received 11 October 2022; revised 4 December 2022; accepted 27 December 2022)

Abstract Characteristics of downslope windstorm (DW) has been examined mainly based on 1-min average wind and the other meteorological conditions in the Yeongdong region for 2000~2020. First, a classification procedure for the downslope windstorm is proposed using surface wind speed (greater than 99 percentile), 1-hour longevity of strong wind (SW), westerly wind direction, low humidity (less than 20 percentile), and leeside warming. The number of DW days satisfying the proposed criteria is 221 (2.9% of total days and 47.5% of SW days) while the number of SW days is 465 (6.1% of total days) for 2000~2020. The occurrences of both SW and DW shows distinctive annual variation with its peak in April. In addition, mean wind speed of DW days is 8.2 m s^{-1} with its duration of 2 hr 30 min and relative humidity of 28% at Gangneung. An episode (7 May 2021) was selected by applying the proposed criteria to SW days of 2021. The sounding shows that the layer of wind speed greater than 25 m s^{-1} was lowered down to 925 hPa at Gangneung (leeside) relative to 850 hPa at Hoengseong (Wonju), in the afternoon along with significant warming and drying. Froude numbers of Wonju and Gangneung for the DW events were increased 4 and 5 times greater than those of normal days, respectively. This kind of DW long-term statistics in the leeside of the mountains is thought to build a foundation of further understanding DW mechanism.

Key words: Downslope windstorm, Gangneung, rawinsonde, Froude number

1. 서 론

활강 강풍(downslope windstorm)은 풍상측에서 불어오는 바람이 산을 넘어 산사면을 따라 하강하면서

풍속이 급증하는 현상이다(AMS, 2012). 우리나라에서는 영동지역의 지형적 특징으로 인해 ‘양간지풍’ 또는 ‘양강지풍’으로 불리는 활강 강풍이 빈발하며, 이는 강풍 특보 기준에 도달하지 않더라도 풍하측 평지에 재난을 발생시킬 수 있다. 또한, 공기가 하강하면서 고온 건조한 바람을 유발하기 때문에 산불을 발생시키거나 확산시킬 수도 있다. 최근 2022년 3월 4일에도 영동지역에 강풍을 동반한 산불이 발생하여 역대 최장기간(9일간) 산불로 기록되며 막대한 피해를

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7, Jukhun-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2326, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

입힌 바 있다.

이러한 활강 강풍에 대한 연구는 미국 로키산맥 (Brinkmann, 1974), 알프스(Richner and Hächler, 2013), 일본(Kusaka and Fudeyasu, 2017), 러시아 극지방 (Shestakova et al., 2020) 등 세계 각 산악지역에서 진행된 바 있다. Brinkmann (1974)은 콜로라도 불더 지역에 발생한 강풍사례 자료와 기후학적 특징을 정리하였으며, Richner and Hächler (2013)는 알프스에서 발생하는 편외의 전반적인 특징, 역학과정 및 기후학적 특징을 조사하며 강풍을 동반하는 편외 사회 전반에 끼치는 영향을 제시하였다. 또한, Kusaka and Fudeyasu (2017)는 일본의 대표적인 극지 하강풍 세 가지를 비교하여 정리한 바 있다. 그리고 Shestakova et al. (2020)은 장기간 관측자료를 사용하여 러시아 극지방에서 발생하는 극지 하강풍을 분류하고 강풍 발생 시 기상 요소 특징에 대해 분석하였다.

한편, 국내에서는 태백산맥의 영향을 받는 강원 영동 지역에서 활강 강풍에 대한 연구가 주로 진행되었다. Lee (2003)는 종관적으로 기압 경도가 균일한 대기 조건에서 풍상측(원주)보다 풍하측(강릉)에서 바람이 강한 사례를 선정하여 분석하였으며, 실제 지형 조건을 적용한 수치모의 실험을 수행하여 태백산맥에 의한 강릉지역의 강풍 현상을 분석하였다. Kim and Chung (2006)은 영동 지역에서 2005년 4월 5일 발생한 활강 강풍 사례를 중심으로 Weather Research and Forecasting Model (WRF) 모의를 통해 풍하측의 파동 파괴(wave breaking) 현상과 산맥의 지형효과를 확인하였다. Jang and Chun (2008)은 과거 30년 기간(1976~2005년) 강풍 사례를 선정하고 이에 대한 수치모의를 통해 풍하측 강풍 발생 메커니즘을 물뿔(hydraulic jump)이론, 부분 반사(partial reflection), 임계층 반사(critical-level reflection) 등으로 분류하여 설명하였다. 또한, 역전층이 산악 주변 대기의 흐름에 미치는 영향에 대해 수치 실험을 통해 분석하였다. Lee et al. (2020)는 2012년 4월 8일 영동지역 강풍 사례 수치모의를 통해 지형적 특징에 따라 강풍 발생 메커니즘이 달라질 수 있음을 밝혔다. 또한, Shin et al. (2022)은 자기 조직화 지도(Self-Organizing Map; SOM) 기법을 사용하여 영동지역의 활강 강풍 시 종관 분포 유형을 분석하고 종관장에 따른 강풍 발생 유도 메커니즘을 분석한 바 있다.

이러한 다양한 선행연구에도 불구하고, 장기 관측 자료 분석을 통한 영동지역 활강 강풍의 기후 및 통계적 특성 이해는 여전히 부족하다. 영동지역의 장기적인 강풍 발생 특성을 이해하는 것은 강풍 및 산불로 인한 재해를 사전에 예방하기 위해 필요한 기초 연구이다. 따라서 본 연구에서는 2000년부터 2020년까지 지상 관측 자료를 활용하여 영동(강릉지역을 중

심으로)지역의 장기간 강풍 특성을 분석하였다. 일차적으로 활강 강풍을 판단할 수 있는 조건을 제시하여 활강 강풍 발생사례를 분류한 후, 활강 강풍의 월별 발생빈도와 경년변화를 분석하고 활강 강풍 발생 시의 기상 조건을 분석하였다. 마지막으로 활강 강풍 사례를 선정하고 지상 관측자료의 시간변화와 활강 강풍 발생 시 운동량과 안정도 조건 등도 함께 제시하였다.

2. 자료 및 연구 방법

2.1 자료

일차적으로 강풍을 중심으로 한 영동지역의 지난 20년간 바람 특성을 이해하기 위하여 태백산맥을 기점으로 풍상측(원주[WJ]), 산 정상(대관령[DG]), 풍하측(강릉[GN], 동해[DH], 속초[SC]) 지역으로 구분하고, 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System: ASOS) 1분 평균 기상관측자료(온도, 풍향, 풍속, 상대습도, 해면기압 등)를 활용하였다. 참고로 원주 지점과 대관령 지점은 약 77 km, 대관령 지점과 강릉 지점은 약 17 km 이격되어 있다. 분석에 사용한 관측소 위치와 기간은 Fig. 1과 Table 1에 각각 제시하였다. 또한, 활강 강풍 사례의 상세 분석을 위하여 강릉원주대학교, 강원지방기상청, 횡성에서 동시에 수행된 레윈존데 관측 자료를 추가로 분석하였다.

최근 연구결과에 의하면 ASOS 관측 자료는 다양한 비기후학적 요인에 의해 오차가 존재하는 데, 바람 관측고도의 변화는 장기간 풍속 통계에 영향을 미칠 수 있다(Klink, 1999; Wan et al., 2010; Choi et al., 2021a; Choi et al., 2021b). 따라서 본 연구에서는 장기간 ASOS 자료의 지점별 풍속계 고도 차이에 따른 비균질성을 해결하기 위해 분석 기간 중 각 지점의 풍속관측고도 변화를 고려하여 아래 식(1)과 같이 보

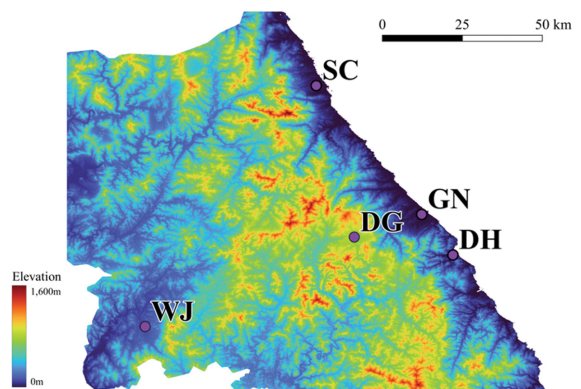


Fig. 1. Topographic overview of the analysis domain with the observation sites (WJ: Wonju, DG: Daegwallyeong, GN: Gangneung, SC: Sokcho, and DH: Donghae).

Table 1. Locations, altitude and analysis period of observation stations of Wonju (WJ), Gangneung (GN), Sokcho (SC), Donghae (DH), Daegwallyeong (DG).

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)	Period
WJ	37.34	127.95	150	2000. 1. 1.~2020. 12. 31.
GN	37.75	128.89	27	
SC	38.25	128.56	18	
DH	37.51	129.12	40	
DG	37.68	128.72	772	2000. 10. 29.~2020. 12. 31.

Table 2. Detailed information of Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) used for this study.

Method	LDAPS (Local Data Assimilation and Prediction System, UM (Unified Model) 1.5 km L70)
Basic Model	United Kingdom Met Office (UK MET)
Horizontal grid	602 (E-W) × 781 (N-S) Lambert - Conformal projection
Horizontal resolution	1.5 km
Vertical level	1000 to 50 hPa isobaric surface (24 layer)
Time	00 to 21 UTC (3 hourly)
Prediction time	h000
Period of use	2010. 10. 1. 00 UTC~2020. 12. 31. 21 UTC

정하였다(Peterson and Hennessey, 1978; Pryor et al., 2005).

$$V_{10} = V_{H_a} \left(\frac{10}{H_a} \right)^\alpha \quad (1)$$

여기서 α 는 거칠기에 따른 안정도 지수를 의미하며, 일반적으로 α 는 1/7로 설정한다(Peterson and Hennessey, 1978; Klink, 1999). H_a 는 풍속계 지상높이, V_{H_a} 는 H_a 에서 관측된 풍속, 그리고 V_{10} 은 식을 통해 보정한 10 m의 풍속을 의미한다.

그리고 활강 강풍 발생 시 풍상측 - 산 정상 - 풍하측의 운동량과 부력의 상대적인 비를 분석하기 위하여 프루드수(Froude number: Fr)를 계산하였다. 분석 자료는 2010년 10월부터 2020년 12월까지의 LDAPS h000 자료를 사용하였다. LDAPS 자료에 대한 자세한 설명은 Table 2에 제시하였다. 여기서 프루드수는 운동량과 부력의 비를 나타내는 무차원수으로써, 프루드수가 1보다 작은 경우 공기가 산에 막히는 흐름(subcritical), 1보다 큰 경우에는 공기가 산을 넘는 흐름(supercritical)이 발생함을 의미한다(Durrán, 1990). 본 연구에서 사용한 프루드수 및 연직 안정도(Brunt - Väisälä frequency: N) 계산 방법은 식(2)와 (3) (Durrán and Klemp, 1982; Durrán, 1986)에 제시하였다.

$$Fr = \frac{U_{925}}{N_{850}H} \quad (2)$$

$$N_{850} = \sqrt{\frac{g\Delta\theta}{\bar{\theta}\Delta z}} \quad (3)$$

여기서 U_{925} 는 925 hPa고도의 태백산맥에 직교하는 방향의 바람 세기, N_{850} 은 브런트 바이살라 진동수(Brunt - Väisälä frequency), H 는 산맥의 높이, g 는 중력가속도, $\bar{\theta}$ 는 1000-850 평균온위, $\Delta\theta$ 는 1000-850 hPa 온도차, Δz 는 1000-850 hPa 고도차이다. N_{850} 은 대기안정도 지수로써, Jang and Chun (2008)에서 제시한 방법을 참고하여 1000-850 hPa 사이 층의 안정도를 계산하였다.

2.2 활강 강풍 분류 방법

강풍 사례를 분류하기 위해 강원지역 5개 지점에 대해 장기간 풍속 특성을 사용하였다. 강풍의 장기간 1분 평균 풍속 통계의 99백분위수(percentile) 이상(7.0 m s^{-1})인 풍속을 첫 번째 분류 조건으로 설정하였다. 두 번째 조건은 순간적인 돌풍(gust)을 제거하기 위하여 하루에 60분 이상 강풍이 지속되는 것이다. 이에 따라 본 연구의 강풍(Strong Wind: SW)은 ‘장기간 통계의 99백분위수 이상의 풍속이 60분 이상 발생하는 경우’로 정의하였다. 참고로 Shestakova et al. (2020)은 10분 평균 풍속을 사용하여 한 사례 당 8 m s^{-1} 이상의 풍속이 6시간 이상 발생하는 경우를 활강 강풍 조건으로 제시한 바 있다. 또한 Kim and Chung (2006)

은 일 최대풍속 또는 순간 최대풍속을 사용하여 강풍을 정의하였고, Jang and Chun (2008)은 일 순간 최대풍속이 전체 시계열의 평균과 표준편차 또는 두 배의 표준편차의 합 이상인 경우를 강풍사례로 분류하였다. 이와 같이 선행연구에서는 주로 10분 평균 풍속 또는 일 최대풍속, 순간 최대풍속을 사용하여 강풍을 정의하였다. 활강 강풍을 판단하는 데 있어 적절한 시간 해상도를 확인하기 위해 기상청(Korea Meteorological Administration)에서 제공되는 종관기상 관측자료의 분자료(1분 평균 자료)와 시간자료(정시 이전 10분 평균자료)간 비교 검토한 결과, 분자료와 시간자료간 통계치(평균, 중간값, 99백분위수)에서 유의미한 차이가 없었기 때문에 본 연구에서는 자료의 시간 연속성을 확보하고 1일 강풍 지속시간을 파악하기 위하여 분자료를 사용하여 강풍을 분류하였다. 이상의 강풍 분류조건에 추가로 활강 강풍 사례를 선정하기 위하여 장기간 지상 ASOS 관측자료 바람장미 분석을 실시하여 강풍 발생 시 풍하측 지역의 풍향을 분석하였고, 산맥 배열 방향을 고려하여 강풍 풍향이 180~300°인 경우를 세 번째 활강 강풍 조건으로 제시하였다. 풍향 조건의 경우 선행 연구(Hwang et al.,

2020; Shestakova et al., 2020; Temme et al., 2020)를 참고하고 태백산맥에 평행하는 바람을 제거하고자 30° 가량 여유를 고려하여 풍향 조건(180~300°)을 선정하였다. 네 번째는 활강 강풍에 따른 산사면 풍하측 평지의 건조화 과정을 고려하기 위하여 강풍 상대습도가 20백분위수 이하인 조건으로 정하였다. 선행연구(Shestakova et al., 2020; Temme et al., 2020)에 의하면 지역적인 특성을 고려하여 임의의 기준 값을 사용한 바 있는 데 본 연구에서도 여러 기준 값들(10, 20, 30백분위수 등)을 적용한 결과, 전반적인 활강강풍 특성 결과에 큰 차이가 없었고, 단지 선택된 사례 개수의 차이만 확인할 수 있었기 때문에 이러한 활강강풍 특성과 통계 분석의 수월성을 위하여 20백분위수를 적정 임계치로 설정하였다.

다섯 번째로는 강풍의 온위가 대관령보다 높은 조건을 사용하여 풍하측 경사면에서의 하강풍에 의한 온도상승을 고려하였다. 마지막으로 이상의 조건(풍향, 상대습도, 온위)을 하루에 한시간 이상 만족하는 경우를 활강 강풍(Downslope Windstorm: DW)으로 분류하였다. 이상의 분류 과정을 간략하게 요약하면 아래와 같다(Fig. 2).

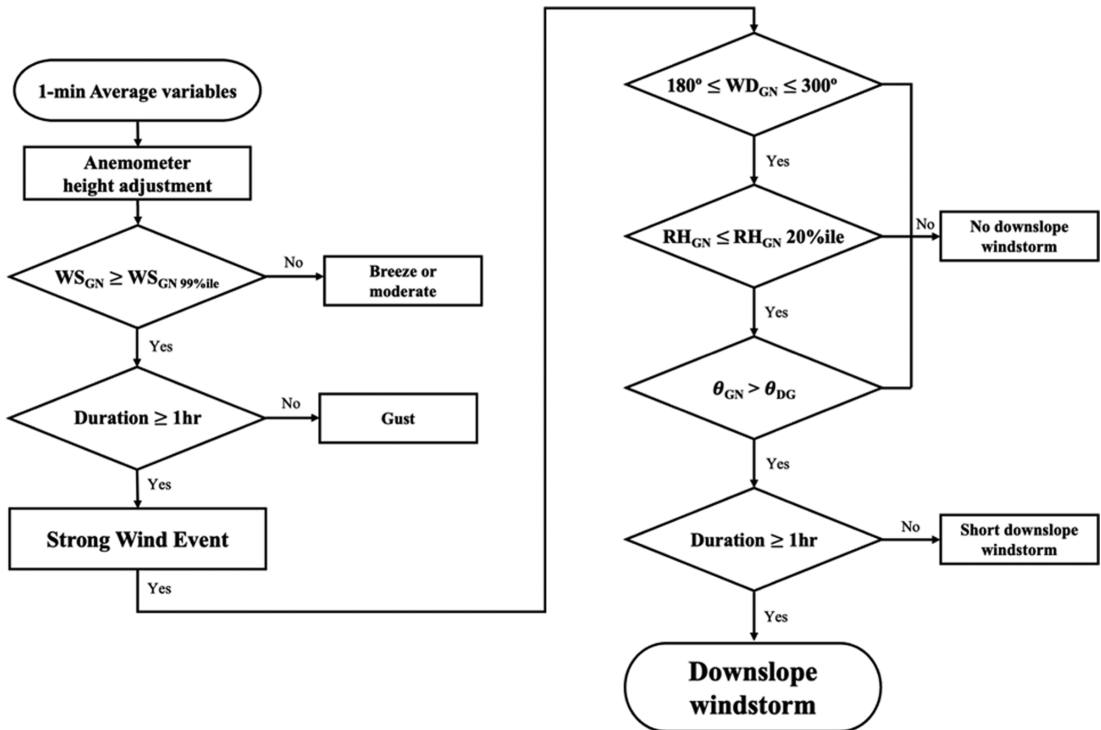


Fig. 2. Flow chart to select downslope windstorm days in the Gangneung region. Meteorological variables used for classification are wind speed (WS), wind direction (WD), Relative humidity (RH) and Potential temperature (θ). The subscripts of variables, GN and DG, stand for Gangneung and Daegwallyoung, respectively.

- 1) 장기간 1분 평균 풍속 통계 자료의 99백분위수(7.0 m s^{-1}) 이상인 풍속
- 2) 1)의 조건이 하루에 60분 이상 지속되는 경우
- 3) 풍향이 $180\sim 300^\circ$ 이내인 경우
- 4) 장기간 상대습도 통계 자료의 20백분위수(34.1%) 이하인 상대습도
- 5) 대관령보다 강릉(풍하측 평지) 온위가 더 높은 사례
- 6) 3)~5)의 조건을 만족하는 시간이 하루에 60분 이상일 때

3. 연구 결과

3.1 장기간 바람 특성

활강 강풍 사례를 분류하기 전에 전반적인 바람 특성을 이해하기 위하여 2000년부터 2020년까지 원주, 대관령, 강릉, 동해, 속초 등 5개 지점의 풍속을 통계 분석하였다. 자세한 풍속 통계 분석 결과와 각 지점의 계절별 풍속 평균과 표준편차를 Table 3에, 풍속의 확률밀도분포를 Fig. 3에 제시하였다. 원주는 봄철에 계절 평균 풍속이 가장 크지만 풍하측 지역(강릉, 동해, 속초)의 여름철보다 풍속이 약했다. 이러한 원주의 기후학적 특징은 99백분위수에 해당하는 풍속(본 연구에서 강풍 기준)도 4.2 m s^{-1} 로 가장 낮게 나타났다. 하지만 풍하측(영동) 지역은 겨울과 봄에 풍속이 강하게 나타났으며, 99백분위수에 해당하는 수치도 7.0 m s^{-1} 이상이었다. 산정상 부근인 대관령은 계절에 상관없이 풍속이 가장 강했으며, 99백분위수 값도 11.5 m s^{-1} 이었다.

풍속의 빈도 분포를 보면(Fig. 3), 풍상측(원주)은 약 1 m s^{-1} , 산 정상(대관령)은 약 4 m s^{-1} , 풍하측(강릉, 동해, 속초)은 약 $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ 으로, 산 정상 - 풍하측(영동) - 풍상측(영서) 순으로 나타났고, Table 3에서 제시된 바와 같이 풍상측인 원주에서는 풍속도 약하고

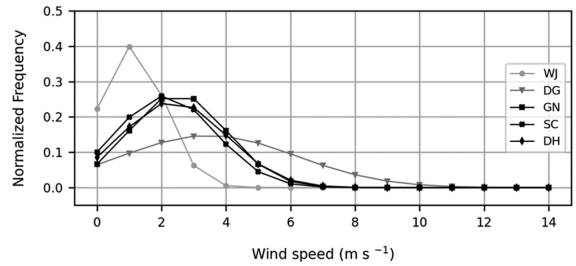


Fig. 3. Frequency distribution of 1-min average wind speed of Wonju (WJ), Daegwallyeong (DG), Gangneung (GN), Sokcho (SC), and Donghae (DH) for 2000~2020.

빈도 분포 폭도 좁게 나타난 반면에, 산 정상 부근에서는 풍속 빈도 분포 폭이 가장 넓게 분포하고 있다. 그리고 풍하측 영동지역 세 관측지점의 풍속의 빈도 분포는 유사한 경향을 보이고 있다.

Figure 4는 6개 관측지점의 풍속과 풍향 빈도 분포를 바람장미로 나타낸 것이다. 원주는 북풍과 서남서풍의 빈도가 높았지만, 대관령은 바람이 약하거나 강한 경우 모두 주로 서풍이었고, 다음으로 서남서풍이었다. 풍하측 지점에서는 서 - 남서 계열 바람의 빈도가 높았으며, 각 지점(속초, 강릉, 동해)은 태백산맥의 배열에 따라 조금씩 상이했으나, 강풍이 발생할 때로서 - 서남서풍이 주 풍향으로 나타났다. 특히 강릉에서는 남서 - 서남서풍의 비율이 35% 이상으로 동해와 속초에 비해 산맥에 직교하는 방향의 바람이 자주 발생하였다.

3.2 강릉지역 활강 강풍 특성분석

2.2절에서 제시한 조건을 만족하는 강풍(SW) 발생일은 21년간 총 478일(전체 기간 중 6.2%)이었고, 이 중에서 활강강풍(DW) 발생일은 162일(1시간 미만의

Table 3. Statistics of long-term (2000~2020) 1-min average wind speed (m s^{-1}) of WJ, DG, GN, DG, and SC. DJF (December, January, February), MAM (March, April, May), JJA (June, July, August), SON (September, October, November).

Statistics	Wonju (WJ)	Daegwallyeong (DG)	Gangneung (GN)	Donghae (DH)	Sokcho (SC)
DJF mean	0.96 ± 0.95	4.24 ± 2.97	3.01 ± 1.65	2.66 ± 1.63	2.30 ± 1.55
MAM mean	1.34 ± 1.13	3.95 ± 2.87	2.69 ± 1.64	2.64 ± 1.80	2.40 ± 1.68
JJA mean	1.06 ± 0.88	2.78 ± 2.05	1.89 ± 1.19	1.85 ± 1.39	1.75 ± 1.32
SON mean	0.85 ± 0.85	2.92 ± 2.50	2.40 ± 1.36	2.35 ± 1.56	1.98 ± 1.44
Mean*	1.1 ± 1.0	3.5 ± 2.7	2.5 ± 1.5	2.4 ± 1.6	2.1 ± 1.5
Median	0.8	3	2.2	2	1.8
99th percentile	4.2	11.5	7.0	7.5	7.0
Number of Data	10,957,223	10,559,213	10,948,651	10,953,116	10,981,736

* Mean \pm standard deviation

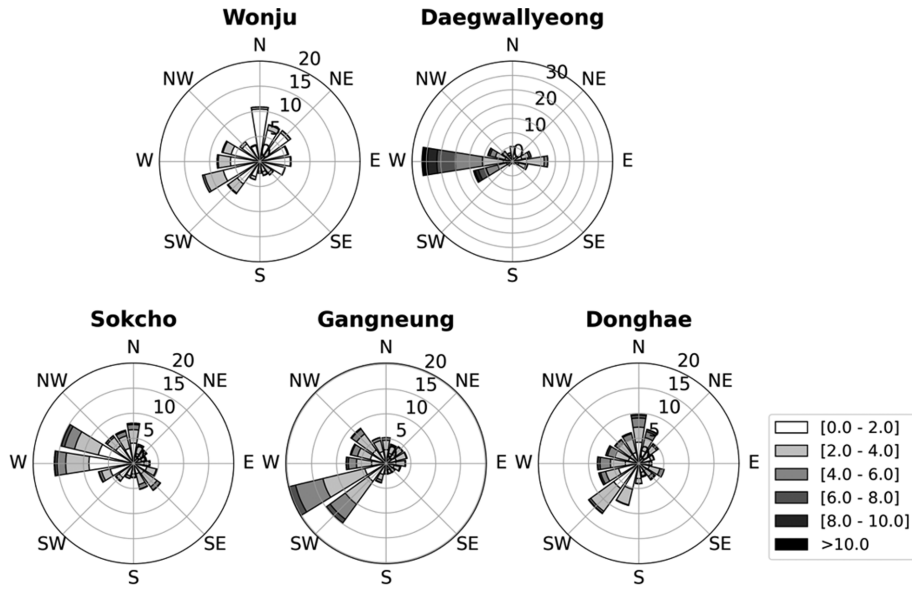


Fig. 4. Windroses of long-term (2000~2020) wind field in the Yeongdong region. Color is proportional to wind speed ($m s^{-1}$) as legend.

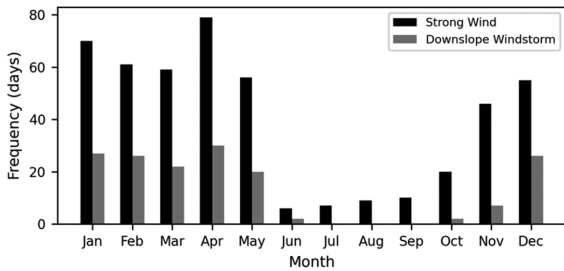


Fig. 5. Monthly occurrence frequency of strong wind (black) and downslope windstorm (grey) at Gangneung for 2000~2020.

활강 강풍은 159일이었다. 이는 전체 분석일 중 2.1%, 강풍 발생일 중 33.9%에 해당한다. SW와 DW 발생일의 계절변화를 확인하기 위해 월별 발생빈도를 Fig. 5에 제시하였다. 1년 중 SW가 가장 자주 발생하는 달은 4월(79일)이었으며, 그 다음은 1월(70일)과 3월(59일)이었다. 주로 봄(194일)과 겨울(186일)에 SW가 집중적으로 발생하였으며, 6월부터 9월까지는 매월 10일 이하로 발생하였다. DW는 21년간 봄철(3월 22일, 4월 30일, 5월 20일)에 72일, 겨울(1월 27일, 2월 26일, 12월 26일)에 79일 발생하였으며, 가을과 여름에는 각각 9일과 2일씩 발생하였다.

다음은 SW 및 DW 발생일의 2000년부터 2020년까지 경년변화를 Fig. 6에 제시하였다. SW와 DW 모두 2004년에 각각 50일, 20일로 최다 빈도를 보였으며,

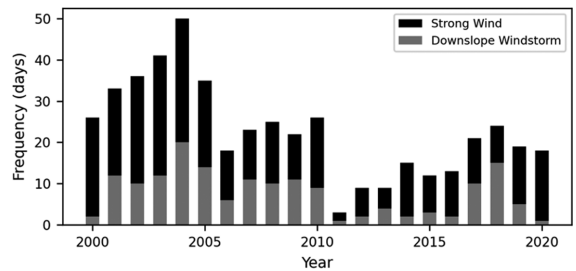


Fig. 6. Long-term variation of strong wind and downslope windstorm occurrence days at Gangneung for 2000~2020.

SW는 2010년 이전까지는 많게는 50회(2004년), 적게는 18회(2006년) 발생하였으나, 2011년에는 3회로 최소 빈도를 보인 후 다시 약간 증가하다가 전반적인 감소 추세를 보였다. DW 역시 초기에 SW와 유사한 경년변화를 보였으나, 2011년에 1회로 최소 빈도 발생한 후 빈도수가 적다가 2017~2018년에 10회 이상으로 증가하였으며, 이후 다시 감소하는 등 변동폭이 크게 나타났다. SW 발생일의 전반적인 감소는 전세계 지상 풍속이 전반적으로 감소하는 것(Wu et al., 2018)과 우리나라 해안지역의 강풍 및 돌풍의 발생 빈도가 감소된다는 것(Kim et al., 2020)과 일치하는 결과로 판단된다. 이러한 SW의 감소는 대기 대순환(Azorin-Molina et al., 2018), 경계층 특성, 그리고 토지이용도 변화(Wu et al., 2018) 등에 기인한 것으로 추정되고 있지만, 아직 정확한 원인은 확실하지 않다.

Table 4. Meteorological characteristics of Wonju (WJ), Daegwallyeong (DG) and Gangneung (GN) sites for the downslope windstorm events (162 days).

	Wind speed ($m s^{-1}$)	Duration (min)	Wind direction (deg)	Relative humidity (%)	Potential temperature (K)
WJ	1.9	N/A	variable	45.4	278.7
DG	9.1	N/A	≈ 265	47.1	279.6
GN	8.2	153	≈ 245	28.0	280.2

※ N/A: Not Available

반면에 DW 경년변화는 SW와 달리 뚜렷한 경향성을 확인할 수 없었는데, 이는 DW 발생 메커니즘이 SW 메커니즘과는 다른 영동지역의 고유한 지형 특성이 반영된 결과라고 추정된다.

Table 4는 DW 발생 시 강릉, 대관령, 원주의 기상 요소 특성을 정리한 것이다. DW 시 평균 풍속은 강릉, 대관령, 원주가 각각 $8.2 m s^{-1}$ (장기간 통계의 99.7 백분위수), $9.1 m s^{-1}$ (96백분위수), $1.9 m s^{-1}$ (82백분위수)이었다. DW 시 강릉 풍속은 장기간 통계의 99백분위수를 초과하여 강하게 나타났으나, 대관령과 원주는 99백분위수에 미치지 못하여 풍하측 풍속 강화가 더욱 뚜렷하게 나타났다. DW 발생 시 풍향은 관측자료 바람장미 분석에서 살펴본 바와 유사하게 원주는 뚜렷한 풍향의 경향성이 나타나지 않았고, 대관령에서는 서 - 서남서풍으로 서풍 계열, 강릉은 서남서 - 남서풍으로 대관령보다 남쪽으로 치우쳐 나타나는 경향이 있었다. DW 평균 지속시간은 $153 min day^{-1}$ (최대 $717 min day^{-1}$ [2006. 2. 13.])이었다. DW 시 평균 상대습도는 강릉, 대관령, 원주가 각각 28.0%(12백분위수), 47.1%(15백분위수), 45.4%(21백분위수)이었다. 온위는 강릉 280.2 K, 대관령 279.6 K, 원주 278.7 K으로 강릉이 원주에 비해 1.5 K 증가하여 DW 시 풍상측에 비해 풍하측에서 뚜렷한 온위 상승을 확인할 수 있었다. 강릉과 대관령의 DW 발생 시 기상 통계치를 비교했을 때 대관령보다 강릉에서 풍속이 높게 나타나고, 원주에 비해 강릉의 상대습도는 약 20% 가량 크게 감소하는 반면에, 온위가 1.5 K가량 증가한 점 등은 DW의 전형적인 특징을 잘 보여주는 것이다.

3.3 활강 강풍 사례 분석(2021. 5. 7)

2021년 5월 7일에는 2.2절에서 제시한 DW 조건을 만족하는 강풍 에피소드(Downslope Windstorm Episode, DWEP)가 발생하였는데, 이 기간 동안 강릉에서는 ‘강원영동 공동 입체기상관측’ 캠페인의 일환으로 횡성과 강릉에서 레원준데 집중관측도 수행되었다(Kim et al., 2021). 먼저 해당 DWEP 중 지상 풍속이 가장 강하게 관측된 1636 LST ($12.5 m s^{-1}$)와 근접한 시간대인 1500 LST의 지상 및 850 hPa 종관일기도를 Fig. 7

에 제시하였다. 종관장은 한반도 북쪽으로 저기압이 통과하면서 DW의 전형적인 남고북저 기압배치가 나타났다.

흥미로운 점은 5월 7일 1200 LST 경에 스콜선(squall line)이 통과하면서 단기간(1시간 이내) 강수가 있었고, 이후 1500~1800 LST에 강릉 풍속이 크게 증가한 점이다(Fig. 8). 스콜선 통과 이후 강수로 인해 강릉과 대관령 온위가 크게 감소했다가 1500~1800 LST 경 원주에 비해 강릉의 온위 평균이 약 3 K 높게(원주 290.7 K, 대관령 293.1 K, 강릉 293.7 K) 나타나며 풍하측 단열승온 현상을 보였다. 강릉 풍속은 1500~1800 LST에 $8.4 m s^{-1}$ 까지 증가하였고, 동시간대 대관령 풍속 $9.4 m s^{-1}$ 에 근접하는 수치이었다. DWEP는 사례 초기 스콜선이 통과한 1200 LST 직후 강릉 풍속이 SW 기준을 충족하지 못하지만, 이후 1500~1800 LST 경 대관령과 유사한 수준으로 강릉 풍속이 크게 증가하여 SW 기준을 만족하는 특징을 가졌다. 또한, 1500 LST 이후 풍하측 해면기압이 큰 폭으로 낮아져 1700 LST에 강릉 - 대관령간 최대 5.5 hPa의 강한 수평 기압경도(강릉 995.8 hPa, 대관령 1001.3 hPa)를 가졌다. 이후(1900 LST) DW가 약화되면서 대관령과 비슷한 수준으로 회복되었다. 이와 같이 DWEP 사례 시 풍하측 해면기압이 일시적으로 감소하는 특징을 보였다. 상대습도는 스콜선 통과 이후 23~28% 수준을 유지하였다. 1500~1800 LST 경 상대습도 평균은 강릉 27.8%, 대관령 37.6%, 원주 37.7%로 풍상측 지역에 비해 강릉이 약 10% 감소했다. 이상의 시계열 분석 결과는 전형적으로 알려진 풍하측 지역의 단열 압축으로 인한 승온 및 건조효과, 풍속 강화와 더불어 기압 하강이 동반되는 특징을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 결과는 단지 하나의 사례 분석이기 때문에 향후 추가 DW 사례 분석이 이루어져야 할 것이다.

‘강원영동 공동 입체기상관측’ 캠페인에서 관측한 횡성과 강릉의 레원준데 관측 결과를 단열선도(온도, 이슬점 온도, 풍향, 풍속)상에 제시하였다(Fig. 9a). 먼저 5월 7일 1500 LST의 횡성(검은색)과 강릉(파란색) 관측 결과를 비교하면, 900 hPa 이하 고도의 이슬점 온도는 거의 유사하지만(수증기량은 유사함) 강릉의

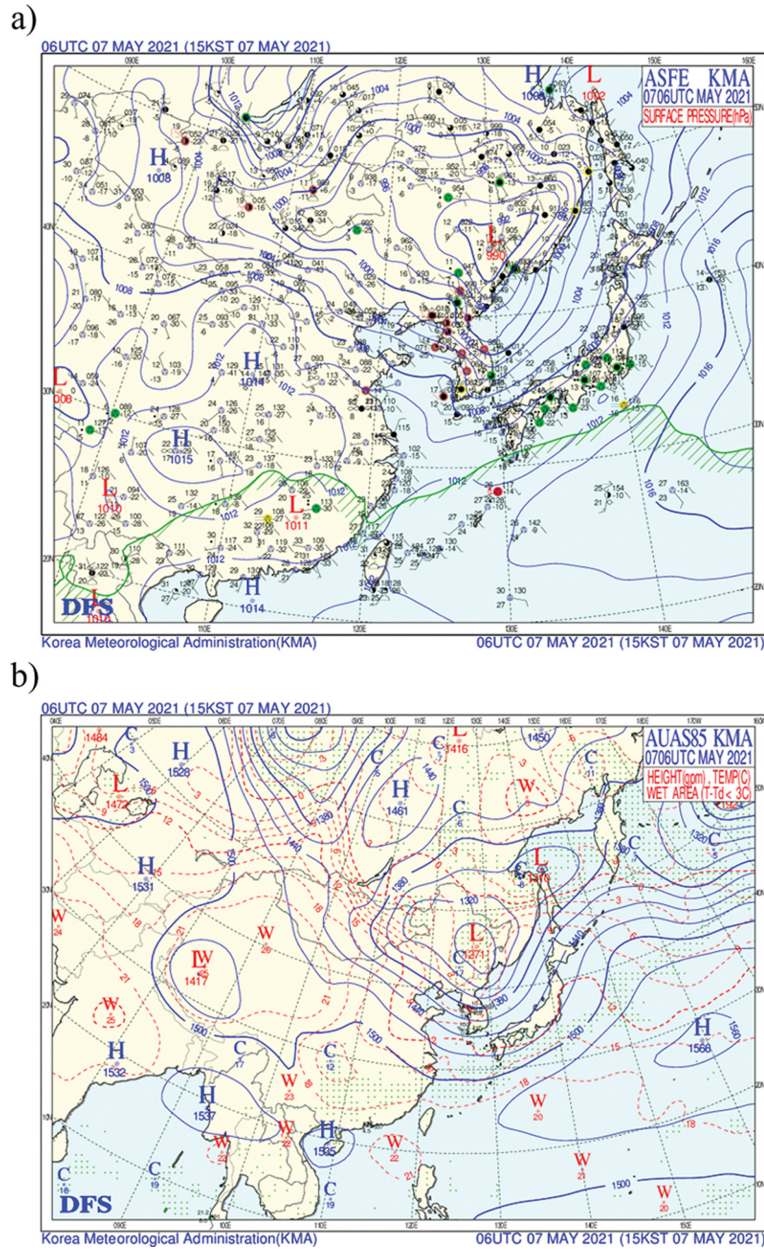


Fig. 7. Surface (a) and 850 hPa (b) synoptic maps for the downslope windstorm event (2021. 5. 7.).

온도가 3°C 높아 강릉이 횡성보다 더 건조해진 것을 알 수 있다. 또한, 횡성에서는 25 m s⁻¹ 이상의 풍속이 약 850 hPa 고도에서, 강릉은 약 920 hPa 고도까지 하강하여 관측되었고, 3시간 후 1800 LST에는 강풍층(25 m s⁻¹ 이상)이 1500 LST보다 더 낮은 고도(약 975 hPa)까지 하강하였음을 알 수 있다. 그리고 동시간대 강릉의 온도 연직구조(빨간색)를 보면 900~700 hPa 고

도 사이에서 1500 LST에 비해 하강풍으로 인한 온도 상승이 발생하였다. 특히 750-700 hPa 고도에서는 기온선이 고도가 증가함에 따라 일시적으로 하강하는 것이 나타나는 데 이는 활강풍으로 인해 풍선이 하강한 것을 보여주는 증거이다. 동일 시각(1800 LST) 레윈존데 위치와 상승속도를 Fig. 9b에 3차원 그래픽으로 제시하였다. 레윈존데의 위치와 상승속도를 보면,

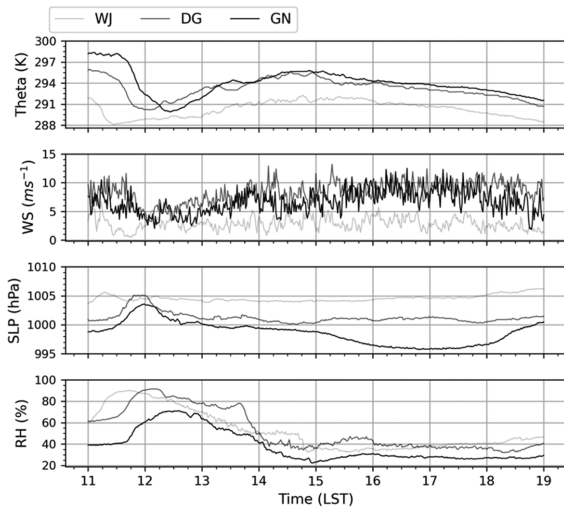


Fig. 8. Temporal variations of potential temperature (Theta), wind speed (WS), sea level pressure (SLP), relative humidity (RH) at DG, GN and WJ on 7 May 2021.

전체적으로 상승속도는 대부분 양의 값을 보이면서 변동성은 컸지만 약 2500~3000 m 고도 부근에서 음의 값(파란색 계열)으로 나타나는 데 이는 레윈존데 풍선의 고도가 하강하는 것을 뒷받침하는 것이다.

Figure 10은 DWEP의 1500 LST와 1800 LST의 LDAPS 온위와 바람의 서-동 방향 연직 단면도를 나타낸 것인 데, 해당 시간대에 태백산맥 동쪽 사면을 따라 대관령에서 강릉으로 활강 강풍이 발생한 것을 잘 보여주고 있다. 특히 1500 LST와 1800 LST 모두 태백산맥의 동쪽 산사면 풍하측에서 등온위선(isentropic)의 급격한 하강과 점프를 통해 물뿔 현상

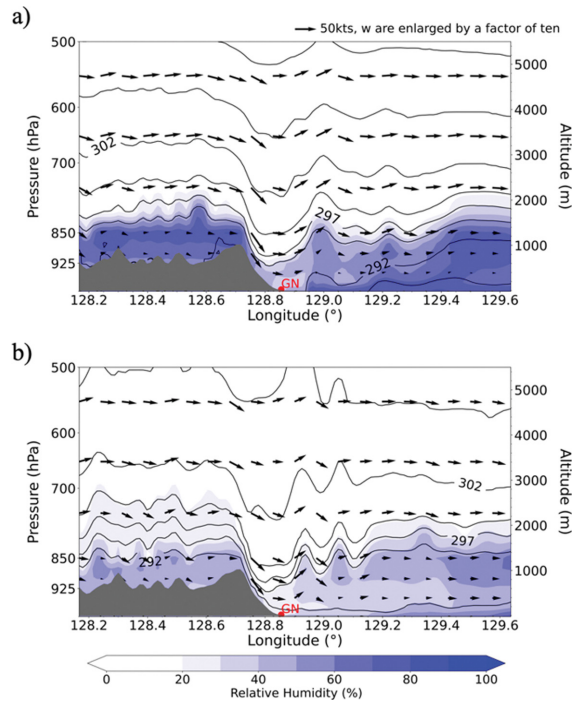


Fig. 10. Vertical cross-section of isentropic line (solid) and wind fields (u-w) with relative humidity (blue shading) at 1500 LST (a), and 1800 LST (b) on 7 May 2021. Red dot denotes Gangneung (GN).

(hydraulic jump)이 발생하였음을 확인할 수 있다. 이러한 DW 진행으로 인하여 1500 LST보다 1800 LST에 강릉 상공의 상대습도가 약 10% 가량 감소하고, 온위는 약 2.5 K 가량 상승하였다.

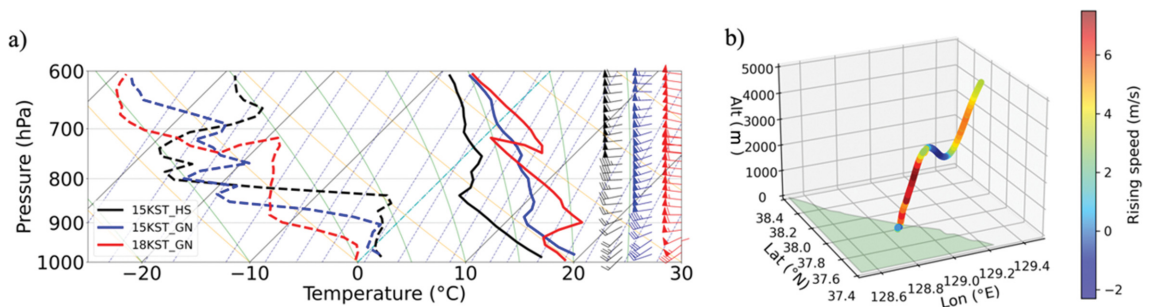


Fig. 9. a) Vertical profiles of temperature (thick solid line), dew point temperature (thick dashed line), and wind speed and direction (wind barb) at Hoengseong (HS), Gangneung (GN) on 7 May 2021. The soundings are plotted on the skew T – log P diagram. Thin black line (Temperature), thin orange line (dry adiabats), thin green line (moist adiabats) and thin navy line (mixing ratio) are comprising the skew T – log P diagram. Different colors denote different time and sites as legend. b) Track of rawinsonde balloon launched at 1800 LST on 7 May 2021. Color bar is proportional to the rising speed ($m s^{-1}$). Background shading (green) denotes land surface and blue circle indicates the balloon launch site (GWNU).

Table 5. $U_{92.5}$, N_{850} and Fr of long-term period (2012~2020), downslope windstorm and an episode (2021.5.7) using LDAPS data. The description of each variable is explained in Eqs. (2) and (3).

	Site	$U_{92.5}$ ($m s^{-1}$)	N_{850} (s^{-1})	Fr
Long term (2012. 10. 01 00 UTC~2020. 12. 31 21 UTC)	WJ	2.3	0.012	0.19
	DG	2.9	0.012	0.21
	GN	2.1	0.012	0.21
Downslope Windstorm	WJ	9.3	0.012	0.77
	DG	13.6	0.014	0.90
	GN	11.4	0.011	1.10
Episode (2021. 5. 7 03 UTC~2021. 5. 7 15 UTC)	WJ	8.9	0.012	0.71
	DG	17.8	0.016	1.04
	GN	15.3	0.014	0.99

추가로 운동량과 부력의 시·공간 변화를 정량적으로 분석하기 위해 LDAPS 자료를 사용하여 2010년 10월부터 2020년 12월까지 전체 기간(2010~2020), DW 사례, 그리고 DWEP의 $U_{92.5}$, N_{850} 과 프루드수를 계산하였다. 분석에 사용한 지점은 원주, 대관령 그리고 강릉이며 분석결과를 정리하여 Table 5에 제시하였다. 세 지점에서 $U_{92.5}$ 는 전체 기간 원주, 대관령, 강릉이 각각 $2.3 m s^{-1}$, $2.0 m s^{-1}$, $2.1 m s^{-1}$ 이었으나, DW 사례 $U_{92.5}$ 평균은 전체기간에 비해 원주는 4.0배($9.3 m s^{-1}$), 대관령은 4.7배($13.6 m s^{-1}$), 강릉은 5.4배($11.4 m s^{-1}$) 증가하여, 풍하측 풍속 강화가 뚜렷하였다. N_{850} 은 전체 기간, DW, DWEP간 차이가 뚜렷하지 않았지만, 대관령은 장기간, DW, DWEP 순으로 N_{850} 이 약간 증가하는 경향을 보였다. 이는 DW 발생 시 산 정상지역의 안정도 상승과 연관되어 있는 결과로 판단된다(Brinkmann, 1974; Klemp and Lilly, 1975; Lilly and Klemp, 1979; Hoinka, 1985; Durran, 1986). 전체 기간 평균 프루드수는 세 지점 모두 약 0.2로 낮았으나, DW 시에는 풍상측(원주)의 프루드수가 약 0.8로 3.7배 증가하였고, 산 정상(대관령)과 풍하측(강릉)은 약 5배 가량(각각 0.9, 1.1) 증가하였다(DW 사례는 LDAPS 사용기간에 포함된 날(28일)에 대해서만 계산). DWEP의 프루드수는 대관령과 강릉이 1.0에 근접한 수치를 보여 DW와 유사하였다. 이러한 결과는 분석 기간별 안정도 변화보다 운동량의 증가가 크게 작용하여 프루드수를 증가시켰기 때문으로 보인다.

이상의 프루드수 분석은 풍상측의 프루드수 분석을 통한 산맥을 넘는 흐름의 여부 판단 뿐만 아니라, DW 발생 시 산 정상과 풍하측의 바람 강도 및 대기 열역학적 특성의 현황을 파악하는 것에 중점을 두었기 때문에 산악과 파괴나 물뿜 현상과 같은 활강 강풍 유발 메커니즘 분석은 향후 추가 정밀 분석이 요구된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 영동지역의 강풍 장기 특성을 이해하기 위하여 21년간(2000~2020년) 원주, 대관령, 강릉, 동해, 속초지역 지상 ASOS 자료를 통해 바람 특성을 분석하였고, 특히 태백산맥 풍하측 지역인 강릉에서 SW(강풍) 및 DW(활강 강풍) 분류 방법을 제시하고 이를 적용하여 SW 및 DW 발생 시 기상특성을 분석하였다. 또한 2021년 5월 7일 활강강풍 사례(DWEP)에 대하여 LDAPS h000 자료를 사용하여 연직 온위 단면도와 프루드수를 분석함으로써 평상시, SW 시, DW 시의 운동량과 열역학적 안정도를 비교하였다.

일차적으로 강릉에 발생하는 DW 특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 분류 조건을 제시하였다. 1) 장기간 분석 결과 99백분위수(강릉 기준 $7.0 m s^{-1}$)에 해당하는 풍속이 발생하고, 2) 이러한 강풍조건이 60분 이상 지속되면 SW로 분류하였다. 3) SW 중 DW를 선정하기 위해 태백산맥의 배열 방향을 고려하여 강릉 풍향이 $180\sim 300^\circ$ 인 조건을 선정하였다. 4) 활강 강풍으로 풍하측 평지가 건조해지는 현상을 고려하기 위하여 강릉 상대습도 전체 통계값 중에서 20백분위수($RH = 34.1\%$) 이하인 조건을 선정하였다. 5) 활강풍에 따른 단열 승온 효과를 고려하기 위해 강릉 온위가 대관령보다 높은 조건을 고려하였고, 6) 마지막으로 3)~5)를 만족하는 조건이 하루에 60분 이상 지속되면 최종적으로 DW로 정의하였다. 단, 풍속 분류 이전에 지상 풍속 관측자료의 고도에 따른 비균질성을 개선하기 위해 고도 보정을 수행하였다.

장기간 풍속 분석 결과 영서지역인 원주 풍속이 전반적으로 가장 약한 반면에, 산정상 부근의 대관령이 가장 강하고 풍속의 변동폭도 큰 것으로 나타났다. 전체 값 중에서 강풍 기준에 해당하는 99백분위수 풍속은 풍상측(원주)에서 가장 낮은 $4.2 m s^{-1}$, 산 정상(대

관령)에서 가장 높은 11.5 m s^{-1} , 그리고 풍하측 영동 지역(강릉, 동해, 속초)은 $7.0\sim 7.5 \text{ m s}^{-1}$ 이었다. 각 지점의 장기간 바람장미 분석 결과, 원주는 북풍과 서남서풍이 가장 빈발하였으며, 대관령은 약한 풍속이나 강한 풍속구역에서 대부분 서풍이 지배적으로 나타났다. 강릉을 비롯한 풍하측 평지 지점에서는 태백산맥 배열에 따라 대부분 남서풍일 때 강풍이 주로 발생하는 특성을 보였다. 본 연구에서 제시한 조건을 만족하는 SW 사례일은 478일(전체 기간의 6.2%)이었고, DW 사례일은 162일(전체 기간의 2.1%), 이는 SW 사례 중 33.9%에 해당한다. SW와 DW 모두 4월의 발생빈도(각각 79일, 30일)가 가장 높게 나타났다. 그리고 SW 경년변화는 전반적으로 감소 추세인 반면에 DW 경년변화는 초기에는 감소 추세이었지만 변동폭이 커지면서 뚜렷한 추세를 파악하기는 어려웠다. 이는 DW 발생메커니즘은 영동지역 고유의 지형 특성이 반영된 결과일 것으로 추정된다.

DW 발생 시 강릉 평균 풍속은 8.2 m s^{-1} 로, 이는 장기간 통계(21년간)의 99.7백분위수에 해당하는 값이다. 강릉의 DW 일 지속시간은 평균 153분, 최대 717분(2006년 2월 13일)으로 나타났고, 풍향은 강릉과 대관령 모두 서-남서풍 계열로 나타났으나 강릉에서 조금 남쪽으로 치우쳐 나타났다. 상대습도는 원주(45.4%)와 대관령(47.1%)이 유사했고 강릉이 가장 건조(28.0%)했으며, 온위는 원주(278.7 K)가 가장 낮았고, 대관령(279.6 K)과 강릉(280.2 K)이 유사했으나 강릉이 원주보다 1.5 K 높게 나타났다.

본 연구가 제시한 DW 조건을 만족하는 사례(DWEP: 2021. 5. 7)를 선정하여 원주, 대관령, 강릉의 지상 ASOS 기상자료와 프루드수를 분석하였다. DWEP 중 강릉 풍속이 가장 강했던 1500~1800 LST에는 대관령 풍속에 근접하였으며, 강릉의 상대습도는 원주보다 약 10% 더 낮았고, 온위는 3 K 더 높았다. 또한, DWEP의 강릉과 대관령지점 모두 프루드수가 $0.9\sim 1.0$ 으로, 2010년부터 2021년까지 12년간의 동일 지점의 프루드수 평균($0.19\sim 0.21$)보다 약 5배 가량 증가한 수치이다. 이와 같은 활강강풍 발생 시에 풍하측 지역 프루드수 증가는 안정도 변화보다는 활강강풍에 의한 운동량 증가에 의해 비롯된 것으로 파악된다.

영동지역은 복잡한 지형으로 인하여 강풍 및 산불 등의 재해가 빈발하고 있음에도 불구하고 강풍에 대한 장기적인 통계 분석이 부족하였다. 그러므로 기존에 알려진 활강 강풍 특성에 근거하여 정량적인 분류 방법을 제시하였으며, 제시된 분류방법을 만족하는 강릉의 활강 강풍 특성을 요약 정리하였다. 이와 같은 장기간 강풍 특성 분석은 향후 강풍 발생 메커니즘 이해를 위한 수치모델링 연구나 강풍 집중 관측 연구에도 기초적인 자료로 활용 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원의 연구개발사업인 “강원 영동 동풍·강풍의 특화된 관측·예보기술 개발” 사업의 지원과 한국 연구재단의 부분적인 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2022R1F1A1063196).

REFERENCES

- American Meteorological Society, 2022: ‘downslope windstorm’, Glossary of Meteorology, http://glossary.amet-soc.org/wiki/Downslope_windstorm.
- Azarin-Molina, C., S. Rehman, J. A. Guijarro, T. R. McVicar, L. Minola, D. Chen, and S. M. Vicente-Serrano, 2018: Recent trends in wind speed across Saudi Arabia, 1978-2013: a break in the stilling. *Int. J. Climatol.*, **38**, e966-e984, doi:10.1002/joc.5423.
- Brinkmann, W. A. R., 1974: Strong downslope winds at Boulder, Colorado. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 592-602, doi:10.1175/1520-0493(1974)102<0592:SDWABC>2.0.CO;2.
- Cho, Y. J., T. Y. Kwon, and B.-C. Choi, 2015: Characteristics of meteorological variables in the leeward side associated with the downslope windstorm over the Yeongdong region. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **36**, 315-329, doi:10.5467/JKESS.2015.36.4.315.
- Choi, Y. J., C. H. Park, S. W. Son, J. W. Lee, and D. C. Hong, 2021a: Long-term trend of surface wind speed in Korea: Anemometer height adjustment. *Atmosphere*, **31**, 101-112, doi:10.14191/Atmos.2021.31.1.101.
- _____, C. H. Park, S. W. Son, and H. J. Kim, 2021b: Long-term trend of surface wind speed in Korea: Physical and statistical homogenizations. *Atmosphere*, **31**, 553-562, doi:10.14191/Atmos.2021.31.5.553.
- Durran, D. R., and J. Klemp, 1982: On the effects of moisture on the Brunt-Väisälä frequency. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2152-2158, doi:10.1175/1520-0469(1982)039<2152:OTEOMO>2.0.CO;2.
- _____, 1986: Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep, continuously stratified fluid. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2527-2543, doi:10.1175/1520-0469(1986)043<2527:ALADWP>2.0.CO;2.
- _____, 1990: Mountain waves and downslope winds. *Atmospheric Processes over Complex Terrain, METEOR*, **(23)**, 59-81, doi:10.1007/978-1-935704-25-6_4.
- Hwang, H., S. H. Eun, B. G. Kim, S. J. Park, and G. M. Park, 2020: Occurrence characteristics of sea breeze in the Gangneung Region for 2009~2018. *Atmosphere*, **30**, 221-236, doi:10.14191/Atmos.2020.30.3.

- 221.
- Hoinka, K. P., 1985: Observation of the airflow over the Alps during a foehn event. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **111**, 199-224, doi:10.1002/qj.49711146709.
- Jang, W., and H.-Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, **18**, 207-224.
- Kim, H. U., B. J. Kim, H. G. Nam, J. H. Jung, and J. K. Shim, 2020: Climatological spatio-temporal variation of strong wind in Korea. *Atmosphere*, **30**, 47-57, doi:10.14191/Atmos.2020.30.1.047.
- Kim, J.-H., and I.-U. Chung, 2006: Study on mechanisms and orographic effect for the springtime downslope windstorm over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **16**, 67-83.
- Kim, M.-G., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-J. Chae, J.-H. Jeong, Y.-G. Choi, and G.-M. Park, 2021: Analysis of the relationship of cold air damming with snowfall in the Yeongdong Region. *Atmosphere*, **31**, 421-431, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.421.
- Klemp, J. B., and D. R. Lilly, 1975: The dynamics of wave-induced downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 320-339, doi:10.1175/1520-0469(1975)032<0320:TADOWID>2.0.CO;2.
- Klink, K., 1999: Climatological mean and interannual variance of United States surface wind speed, direction and velocity. *Int. J. Climatol.*, **19**, 471-488, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199904)19:5<471::AID-JOC367>3.0.CO;2-X.
- Kusaka, H., and H. Fudeyasu, 2017: Review of downslope windstorms in Japan. *Wind and Structure.*, **24**, 637-656, doi:10.12989/was.2017.24.6.637.
- Lee, J., 2003: A numerical study of the orographic effect of the Taebak mountains on the increase of the downslope wind speed near Gangnung area. *J. Environ. Sci.*, **12**, 1245-1254, doi:10.5322/JES.2003.12.12.1245.
- Lee, J., J. M. Seo, J.-J. Baik, S.-B. Park, and B.-S. Han, 2020: A numerical study of windstorms in the lee of the taebaek mountains, South Korea: Characteristics and generation mechanisms. *Atmosphere*, **11**, 431, doi:10.3390/atmos11040431.
- Lilly, D. K., and J. B. Klemp., 1979: The effects of terrain shape on nonlinear hydrostatic mountain waves. *J. Fluid. Mech.*, **95**, Cambridge University Press: 241-261, doi:10.1017/S0022112079001452.
- Lin, Y.-L., and T.-A. Wang, 1996: Flow regimes and transient dynamics of two-dimensional stratified flow over an isolated mountain ridge. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 139-158, doi:10.1175/1520-0469(1996)053<0139:FRATDO>2.0.CO;2.
- Park, Y.-J., and Y.-D. Han, 2021: Analysis on the Yeongdong downslope windstorms generation condition verified by observation cases. *Atmosphere*, **31**, 405-420, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.405.
- Peterson, E. W., and J. P. Hennessy Jr., 1978: On the use of power laws for estimates of wind power potential. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **17**, 390-394, doi:10.1175/1520-0450(1978)017<0390:OTUOPL>2.0.CO;2.
- Pryor, S. C., J. T. Schoof, and R. J. Barthelmie, 2005: Empirical downscaling of wind speed probability distributions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **110**, D19109, doi:10.1029/2005JD005899.
- Richner, H., and P. Hächler, 2013: Understanding and forecasting Alpine foehn. In Mountain weather research and forecasting. *Springer.*, 219-260, doi:10.1007/978-94-007-4098-3_4.
- Shestakova, A. A., P. A. Toropov, and T. A. Matveeva, 2020: Climatology of extreme downslope windstorms in the Russian Arctic. *Weather Clim. Extrem.*, **28**, 100256, doi:10.1016/j.wace.2020.100256.
- Shin, Y., J.-H. Kim, H.-Y. Chun, W. Jang, and S.-W. Son, 2022: Classification of synoptic patterns with meso-scale mechanisms for downslope windstorms in Korea using a self-organizing map. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD035867, doi:10.1029/2021JD035867.
- Smith, R. B., 1985: On severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2597-2603. doi:10.1175/1520-0469(1985)042<2597:OSDW>2.0.CO;2.
- _____, 2019: 100 years of progress on mountain meteorology research. *Meteor. Monogr.*, **59**, 20.1-20.73, doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0022.1.
- Temme, F., J. V. Turton, T. Mölg, and T. Sauter, 2020: Flow regimes and föhn types characterize the local climate of Southern Patagonia. *Atmosphere*, **11**, 899, doi:10.3390/atmos11090899.
- Tsai, C.-L., K. Kim, Y.-C. Liou, J.-H. Kim, Y. Lee, and G. Lee, 2021: Observational study for strong downslope wind event under fine weather condition during ICE-POP 2018. *Atmos. Chem. Phys.*, doi:10.5194/acp-2021-100.
- Wan, H., X. L. Wang, and V. R. Swail, 2010: Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds. *J. Climate*, **23**, 1209-1255, doi:10.1175/2009JCLI3200.1.
- Wu, J., J. Zha, D. Zhao, and Q. Yang, 2018: Changes in terrestrial near-surface wind speed and their possible causes: an overview. *Climate Dyn.*, **51**, 2039-2078, doi:10.1007/s00382-017-3997-y.