

강릉공항 활강 강풍 사례의 수치 모의 및 역학적 메커니즘 분석

성재훈^{1),2)} · 김형규¹⁾ · 김주완^{1)*}

¹⁾국립공주대학교 대기과학과, ²⁾공군기상단

(접수일: 2025년 9월 11일, 수정일: 2025년 10월 10일, 게재확정일: 2025년 10월 25일)

Numerical Simulation and Mechanism Analysis of a Downslope Windstorm Case at Gangneung Airport

Jaehun Seong^{1),2)}, Hyeong-Gyu Kim¹⁾, and Joowan Kim^{1)*}

¹⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

²⁾Weather Group of R.O.K Air Force, Gyeryong, Korea

(Manuscript received 11 September 2025; revised 10 October 2025; accepted 25 October 2025)

Abstract This study investigates the physical mechanisms of a downslope windstorm that occurred in the Gangneung region on April 11, 2023, using numerical simulation and the shallow water theory. In shallow water theory, the mechanism of a downslope windstorm involves the flow transition from subcritical to supercritical due to changes in the fluid thickness and velocity, which is identified by the Froude number ($Fr = U/\sqrt{gH}$). While previous studies calculated the Fr using a fixed characteristic depth, this study applied the spatially varying flow thickness for the Fr calculation, assuming that the lower tropospheric inversion layer with the maximum Brunt-Väisälä frequency could be considered as the free surface in shallow water theory. Numerical simulation conducted using the Weather Research and Forecasting (WRF) model revealed that the new Fr calculated with the varying flow thickness aligns better with shallow water theory and effectively explains the physical mechanisms of the downslope windstorm. On the upwind side, the westerly flow is well identified as subcritical until it reaches the crest, several kilometers west of Daegwallyeong, where its Fr transitions to supercritical by decreased flow thickness and increased wind speed. The flow further accelerated while descending the lee side under supercritical conditions. The subcritical-to-supercritical transition made the westerly flow keep accelerating, causing the downslope windstorm at Gangneung Airport. The new spatially varying Fr revealed clear distinctions between the downslope windstorm and turbulent regions closely matching observations at Gangneung Airport.

Key words: Froude number, Downslope windstorm, WRF model

1. 서 론

활강 강풍(downslope windstorm)은 가파른 산 사면을 가진 지형에 의해 지상풍속이 강화되는 중규모 대

기 현상으로(Durrant, 2003a), 한반도에서는 봄철마다 태백산맥을 넘어오는 서풍이 강화되어 영동지역에서 자주 발생한다(Jeong et al., 2023). 산불이 발생할 때 활강 강풍은 산불에 의한 피해를 키울 뿐만 아니라(Ho et al., 2023) 산불 진화에 필요한 항공기 운영에도 영향을 미쳐 막대한 재산 손실을 일으킬 수 있다. 이 외에도 활강 강풍은 항공기 이착륙에도 큰 영향을 미쳐 항공 여객 및 공군 활동에도 큰 지장을 초래한다. 활강 강풍의 주요 메커니즘은 크게 두 가지 방식으

*Corresponding Author: Joowan Kim, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaeak-ro, Gongju 32588, Korea.
Phone: +82-41-850-8528, Fax: +82-41-856-8527
E-mail: joowan@kongju.ac.kr

로 설명된다. 첫 번째는 지형에 의해 발생된 중력과 가 대류권의 안정층 또는 임계고도에서 반사되어 강풍을 유발하는 메커니즘으로 반사된 파동의 에너지가 대기 하층에 갇혀서 국지적 강풍을 유발하는 것으로 활강 강풍을 설명한다(Klemp and Lilly, 1975). 특히, 이러한 파동의 반사는 비선형효과에 의해서 선형이론의 임계점 (Richardson number < 0.25) 이하에서도 발생할 수 있으며, 반사된 파동은 공명 성장 및 쇄파(wave breaking)에 의해서 지상에 강풍을 형성할 수 있다(Clark and Peltier, 1984). 두 번째는 수력학에 기반한 이해로 배경류와 중력과 위상 속도 비율로 정의되는 프루드수(Froude number; Fr)가 임계 이하(subcritical flow, $Fr < 1$)에서 임계 초과 흐름(supercritical flow, $Fr > 1$)으로 전환될 때 풍속이 지속적으로 강화되는 현상을 통해서 활강 강풍을 설명한다(Durran, 1986; Durran and Klemp, 1987; Holton, 2004). 이 메커니즘은 활강 강풍의 구조와 발달 그리고 임계 초과 흐름이 다시 끝나는 지점에서 관찰되는 물뿔(hydraulic jump) 현상을 실제와 가깝게 설명하나, 정확한 프루드수 해석을 위해 고해상도 자료가 요구된다.

국내에서는 주로 영동지역의 활강 강풍 연구가 이루어졌다. Jang and Chun (2008)은 2차원 실험으로 과거 30년(1976~2005) 봄철 동안 강릉지역에 발생했던 주요 강풍 사례들을 물뿔, 부분 반사, 임계층 반사 메커니즘으로 분류하였다. 또한 Jeong et al. (2023)은 과거 21년(2000~2020) 동안 속초, 강릉, 동해 지역의 활강 강풍 특성을 통계적으로 분석하여, 활강 강풍 발생은 주로 봄과 겨울철에 집중되며, 전체 강풍 사례 중 약 34%가 활강 강풍에 해당함을 확인하였다. Lee (2003)와 Kim and Chung (2006)은 강릉 지역에서 발생한 활강 강풍 사례를 수치적으로 분석하고, 프루드수 해석을 통해 물뿔 메커니즘이 강풍 형성에 중요한 역할을 함을 확인하였다.

프루드수는 산 또는 산맥을 넘는 대기가 어떤 특성을 가지는지 분석하기 위해 활용되고 있다. 국내 연구에서는 프루드수 계산 시 고정된 한 지점의 대기 변수만을 이용하거나 활강 강풍 발생 시점에서 각 지점의 프루드수 상태를 분석하였다. 그러나 풍상측 풍속과 대기 안정도를 일정하게 설정하거나(Han et al., 2007; Lee and Kang, 2022), 하층 대기에 대한 평균값(또는 특정 대기값)을 적용한 (Jang and Chun, 2008; Jeong et al., 2023) 분석은 프루드수의 공간변동을 설명할 수 없어 활강 강풍의 예보에 적용하는 데 한계가 있다. 또한 3차원 수치 실험을 통해 특정 지점의 프루드수를 분석한 선행 연구들(Lee, 2003; Kim and Chung, 2006)에서도 풍상측, 정상, 풍하측, 해상 등 몇 개 지점의 프루드수를 기반으로 강풍 및 물뿔 메커니즘을 설명하였으나, 풍하측 강풍과 난류 구역을 체계

적으로 구분하는 데 한계가 있었다.

영동 지역 활강 강풍에 관한 기존 연구의 또 다른 한계점으로 프루드수 계산에 사용되는 대류권 하층 두께 문제를 들 수 있다. 대류권 하층의 두께는 객관적인 산출이 어려워 기존 연구들은 프루드수 계산 시 평균적인 산악의 높이를 활용하나 실제 유체의 두께 변화를 반영하지 않는 문제가 있다. 이 경우 대류권 하부에 안정한 층이 존재할 때 지표 근처의 성층화된 대기의 두께를 활용하여 프루드수를 계산하는 대안이 있으며, 국외에서 활강 강풍 연구에 성공적으로 적용된 사례가 있다(Flamant et al., 2002; Gohm and Mayr, 2004; Tollinger and Jonassen, 2019). 특히, Gohm and Mayr (2004)는 알프스산맥의 브레너 고개(Brenner pass) 지역을 대상으로 유효 대기 두께를 활용한 프루드수의 공간 분포를 자세히 분석하여, 임계 이하 흐름에서 임계 초과 흐름으로 전환될 때 나타나는 풍속의 증가와, 다시 임계 이하 흐름으로 전환될 때 발생하는 물뿔 발생 메커니즘을 성공적으로 설명하였다.

본 연구에서는 남고북저형 기압배치의 영향으로 임계 전환흐름에 의한 활강 강풍과 풍하측 물뿔이 동반된 대표적 사례를 분석 대상으로 선정하였다. 이는 강릉공항에서 최대 풍속 32.4 m s^{-1} 가 기록된 2023년 4월 11일 사례이다. 물뿔 메커니즘을 설명하기 위해 종관 기상 관측 데이터를 활용하여 활강 강풍과 난류적 흐름이 강릉공항의 풍향과 풍속에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 중규모 모델을 사용하여 강풍 사례를 수치 모의한 후, 천수 이론에 기반한 프루드수의 공간 변동을 분석하여 활강 강풍의 발달과 물뿔의 영향을 자세히 분석하였다. 특히, 3차원 수치 모델과 대류권 하층의 두께를 환산하여 새롭게 산출한 프루드수를 활용하여 다음과 같은 문제점을 극복하고자 하였다.

1. 이상화된 2차원 실험 결과를 실제 기상 예보에 적용하는데 발생하는 한계
2. 기존 연구들이 사용한 프루드수 계산이 수력학 이론과 일치하지 않는 점
3. 현실적인 활강 강풍 사례에서 천수 이론 기반 프루드수 분석의 유효성 파악

본 연구 논문의 2절에서는 연구에 사용된 자료와 방법론을 설명하고, 3절에서는 현상 관측과 수치 모의 결과에 대한 프루드수 분석을 다루며, 마지막으로 4절에서는 연구 결과를 요약하고 결론을 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 자료

지상 바람 분석을 위해 1분 시간해상도의 공군 원

주공항 및 강릉공항의 자동기상관측시스템(Automated Meteorological Observation System; AMOS)과 기상청 대관령 지점의 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System; ASOS) 자료를 사용하였고 상층 바람 분석을 위해 10분 시간해상도의 북강릉 지점 연직 바람 관측장비(wind profiler)를 활용하였다. 강릉공항 활주로(runway)에는 AMOS가 서쪽(257°)과 동쪽(77°)에 2 km 거리를 두고 설치되어 있다.

2.2 사례 개요 및 기상 배경

Table 1은 과거 30년(1994~2023) 동안의 15 m s^{-1} 이상 월 누적 강풍 발생일 통계이다. 강릉공항은 주로 봄철에 남고북저형 기압배치의 영향을 자주 받으며, 기압경도력이 강해질 경우 15 m s^{-1} 이상의 강풍

이 월 평균 약 5일로 빈번하게 관측된다. 대관령 북쪽에 황병산과 대궁산, 동쪽의 제왕산과 칠성산 사이에는 서풍계열의 바람길이 형성되며, 활강 강풍 영향 시 강릉공항에서 풍향은 $250\sim 260^\circ$ 이다. 특히 4월은 이상($> 20 \text{ m s}^{-1}$) 강풍 발생일이 가장 많으며 역대 최대 풍속 46 m s^{-1} 를 기록하는 등 강풍 영향이 가장 높은 시기로 확인된다. 관측 통계와 유사한 특징을 보인 본 연구의 2023년 4월 11일 사례는 강풍으로 인해 수목이 전도되어 전신주에 화재가 발생하여 산불로 확산되었다. 진화 헬기 운항 제한으로 축구장 면적 530배에 달하는 산림이 소실되고, 문화재 1곳을 포함해 100여 채의 건물에 피해가 발생하였다. 당시 기압배치와 지형 조건이 전형적인 활강 강풍 발생 양상을 충족한 사례이다. 2023년 4월 10일 1200 UTC에 한반도 기

Table 1. Total number of days per month with wind events exceeding 15 m s^{-1} observed at Gangneung airport, accumulated over the 30-year period from 1994 to 2023.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
$15\sim 20 \text{ m s}^{-1}$	126	102	138	126	94	25	35	19	22	61	114	164
$> 20 \text{ m s}^{-1}$ ~ (days)	17	19	33	36	24	1	2	3	7	9	26	22
Avg. Wind Dir. ($^\circ$)	253	255	259	259	261	257	250	200	182	238	255	260
Avg. Wind Spd. (m s^{-1})	18	18	19	19	19	17	17	19	20	18	19	17
Max Wind Spd. (m s^{-1})	28	28	31	46	29	32	23	31	31	31	31	30

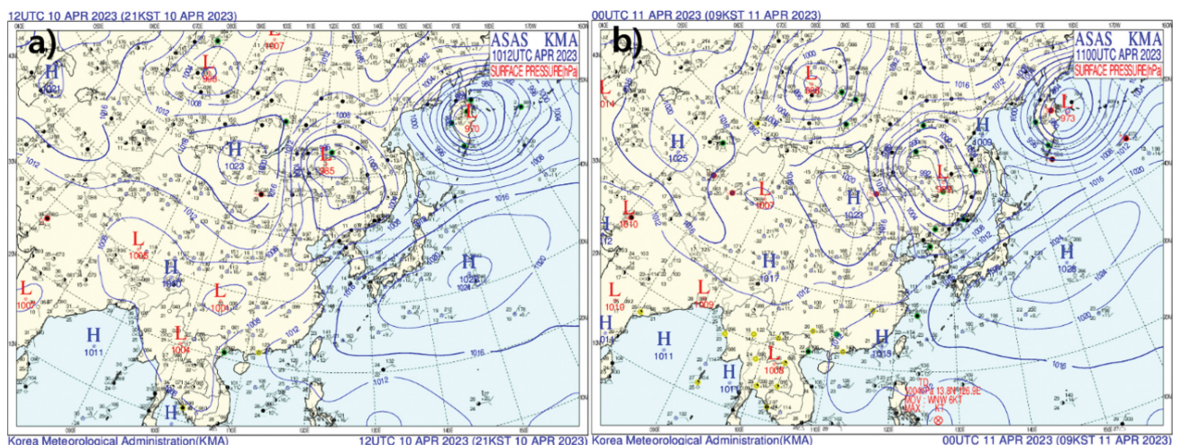


Fig. 1. Surface synoptic charts at (a) 1200 UTC, 10 April 2023 and (b) 0000 UTC, 11 April 2023. These charts are adopted from KMA (<https://data.kma.go.kr>).

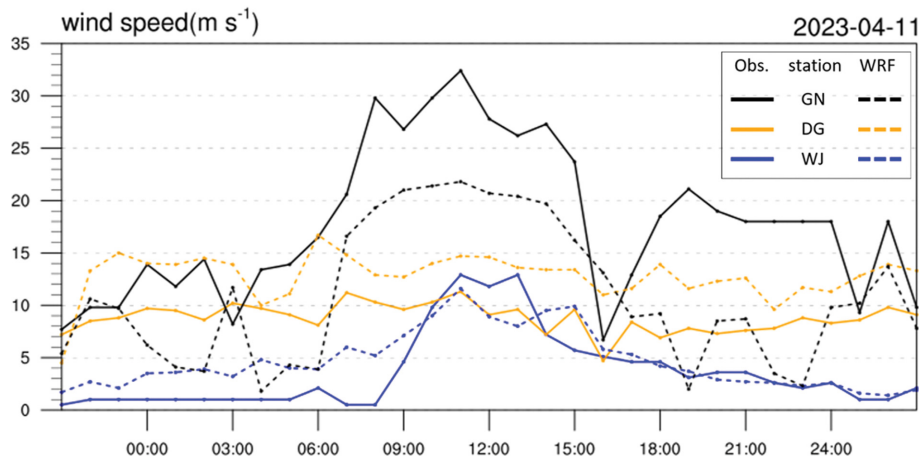


Fig. 2. Hourly observed (solid lines) and WRF-simulated (dotted lines) 10 m wind speeds (m s^{-1}) at Gangneung airport (GN), Daegwallyeong (DG), and Wonju airport (WJ). The maximum observed wind speed was 32.4 m s^{-1} at 1100 KST, while the simulated maximum was 21.8 m s^{-1} at the same time.

준으로 남동쪽에 위치한 고기압과 만주 지역에 있는 저기압 사이에서 등압선이 동서 방향으로 형성된 전형적인 남고북저형 기압배치가 나타난다(Fig. 1). 동시에 저기압의 남서쪽에 위치한 한랭전선이 한반도로 접근하고 있다. 4월 11일 0000 UTC의 일기도를 보면, 한랭전선이 한반도 북쪽을 통과하는 반면 북서태평양에 위치한 고기압에 의해 $1,016 \text{ hPa}$ 등압선의 변화는 없는 것으로 확인된다. 이는 중부지방 기압경도력을 강화시켜, 영동지역의 강풍이 발생한 원인으로 판단된다. AMOS 관측 결과에 따르면, 4월 11일 0200 UTC에 강릉공항에서 최대풍속 32.4 m s^{-1} 가 관측되었으며, 저기압 중심이 동해안을 통과하는 0600 UTC에 풍속이 급격히 감소하였다(Fig. 2).

2.3 프루드수(Froude Number)

활강 강풍의 메커니즘을 분석하기 위해 본 연구에서는 천수 이론에 기반한 프루드수를 사용하였다. 프루드수는 임계 이하 흐름에서 임계 초과 흐름으로 전환될 때 풍속이 급격히 강화되고, 다시 임계 이하로 전환될 때 물뿔이 발생하는 물리적 구조를 설명하는데 유용하다. 기존 선형 이론(Klemp and Lilly, 1975)에서는 중력파의 성분과 단순한 층화 구조를 통해 활강 강풍을 설명하고자 하였으나, Decker and Robinson (2011)는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 이용한 활강 강풍 분석에서 이러한 선형 이론만으로는 실제 강풍을 충분히 설명할 수 없으며, 비선형 효과에 의한 역할이 중요하다고 제시하였다. 산악을 지나는 안정한 공기 흐름과 연관된 활강 강풍은 비선형적인 에너지 전달, 기압 경도, 지형 상호작용을 동반한다는 점에서 본질적으로 비선형 과정으로 설명

될 수 있는 것으로 알려져 있다(Holton, 2004). 이러한 비선형성은 특히 프루드수가 1을 기준으로 급격한 흐름 전환이 발생하는 상황에서 더 뚜렷하게 나타난다.

서로 다른 밀도를 가진 두 개의 균질 비압축성 층(homogeneous incompressible layers)으로 구성된 유체 시스템에서 작은 진폭의 지형 h_M 을 지나는 정상류(steady flow)일 때 천수방정식의 유체 깊이(h) 및 속력(u)의 섭동해는 다음과 같다.

$$h' = -\frac{h_M(\bar{u}^2/c^2)}{1 - \bar{u}^2/c^2}, u' = \frac{h_M}{H} \left(\frac{\bar{u}}{1 - \bar{u}^2/c^2} \right) \quad (1)$$

여기서 $\bar{u}$ 는 동서 방향 배경류, H 는 유체 평균 깊이, $c^2 \equiv (gH\delta\rho/\rho_1)$ 는 천수 중력파의 속력이다. 섭동해 h' 와 u' 은 배경류 프루드수($Fr^2 = \bar{u}^2/c^2$)의 크기에 의존한다. $Fr < 1$ 일 때의 흐름은 임계 이하 흐름, $Fr > 1$ 일 때의 흐름은 임계 초과 흐름이라 한다.

$$(1 - Fr^2) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{ug}{c^2} \frac{\partial h_M}{\partial x} \quad (2)$$

식(2)는 천수방정식으로부터 도출된 관계식이다(Holton, 2004). 프루드수와 지형 경사의 변화가 유속의 공간적 변화율과 어떻게 연계되는지를 보여주며, 이 식의 해석을 통해 활강 강풍 발생 조건을 확인할 수 있다. 우변의 유속(u)과 중력가속도(g)가 곱해진 항은 지형 경사($\partial h_M/\partial x$)에 따른 유속 변화($\partial u/\partial x$)가 배경 흐름의 크기와 중력 효과에 의해 조절됨을 나타낸다. 여기서 중력파 위상속도 $c^2 \equiv g(h - h_M)$ 와 프루드수는 유체의 국지적 두께를 이용하여 정의한다. 일반적으로 임계 이하($Fr < 1$) 흐름이 오르막($\partial h_M/\partial x > 0$)을 올라갈 때, 대기 두께 감소로 인해 중력과 위상 속도

(c)는 감소하며, 식(1)에서 섭동해 u' 가 양수이므로 유속(u)이 증가하여 프루드수(Fr)는 증가하게 된다. 정상 부근에서 프루드수가 1을 초과하면 흐름은 임계 초과 상태로 전환되고, 해당 상태에서 풍하측 내리막($\partial h_M / \partial x < 0$)을 지나면 유속은 지속적으로 증가하게 된다($\partial u / \partial x > 0$). 즉, 풍상측 임계 이하 흐름은 풍하측에서 임계 초과 흐름으로 전환될 수 있는데, 이 과정에서 나타나는 지속적인 풍속의 증가는 산사면 활강 강풍의 발달을 잘 설명한다. 이후 풍속의 감소로 프루드수가 다시 1에 도달하는 지점에서는 임계 이하 흐름으로 전환이 일어나며 난류적 물뿔(turbulent hydraulic jump)이 발생한다.

천수 이론에서 프루드수는 배경류(U)와 중력파($c = \sqrt{gH}$) 위상 속도의 비율로 정의되며[식(3) 참고], 관성류와 파동의 상대적인 중요성을 나타내는 무차원수로 볼 수 있다. 이러한 물리적 특성과 관련하여, Vallis (2017)는 프루드수가 층화 대기에서 관성과 안정도 간 상대적 영향을 설명하는 물리적 지표임을 서술하였다. 이러한 관점에서 활강 강풍과 관련된 기존 연구들에서는 프루드수를 배경류의 강도와 안정도의 상대적인 비율로 활용하는 경향이 있다(Jang and Chun, 2008).

$d\theta = \theta'$, $dz = H$ 라고 하면 천수 이론에서 프루드수를 연속대기에서 프루드수로 유도할 수 있으며,

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g'H}} = \frac{U}{NH}, g' = g \frac{\theta'}{\theta}, N^2 = g \left(\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dz} \right) \quad (3)$$

와 같이 정의된다. 본 연구에서는 프루드수 계산 시, 기존 연구들에서 사용된 고정된 산 높이 대신 지표부터 역전층 하부까지의 유효 대기 두께를 H 로 적용하였다[식(4) 참조]. 이는 천수이론에서 프루드수의 정

의상 H 가 유체 두께임을 반영한 것으로, 각 지점의 대기 구조를 보다 정확히 고려할 수 있는 물리적으로 타당한 접근이다.

$$Fr = \frac{U_i}{N_i(h_i - h_{Mi})}, N \equiv \sqrt{\frac{g d\theta}{\theta dz}} \quad (4)$$

여기서 N 은 Brunt-Väisälä 진동수이고, i 는 모델 모의 영역에서 대관령을 포함하는 단면의 가로축 격자점이다. h_i 는 대관령 상공의 최대 N 고도를 지나는 등온위선의 각 i 지점에서 높이(m)이며, h_{Mi} 는 지형 높이(m)로 1 km (D2) 해상도 각 격자점 지형고도를 사용하였다. $(h_i - h_{Mi})$ 는 각 지점에서의 역전층 하부 대기 두께이다. U_i 와 N_i 는 각각 h_i 이하 대기의 연직 평균된 동서 바람 풍속과 부력진동수이다.

2.4 모델 구성

본 연구에서 수치 재현에 사용한 중규모 모델은 WRF model version 4.3 (Skamarock et al., 2021)이며, 모델 영역은 1 km 고해상도 모의를 위해 5 km 해상도의 어미 격자(D1)로 한반도 영역을 모의한 후 1 km (D2) 해상도의 등지 격자로 강원도 영역을 모의하였다(Fig. 3). 분석의 편의를 위해 태백산맥을 가로지르는 원주공항, 대관령, 강릉공항을 연결하는 축이 모의 영역의 X 방향이 되도록 등지 격자를 설정하였다(Fig. 3b). 모든 모델 영역의 연직 층은 90개의 하이브리드 좌표계(hybrid sigma-pressure coordinate)로 이루어져 있으며, 모델의 최상단 기압은 30 hPa으로 설정하였다(Table 2). 주요 현상이 분석된 700 hPa 이하에는 21개 연직층으로 구성되어 있다. 모델의 초기 및 경계 입력 자료는 유럽중기예보센터(European Centre for

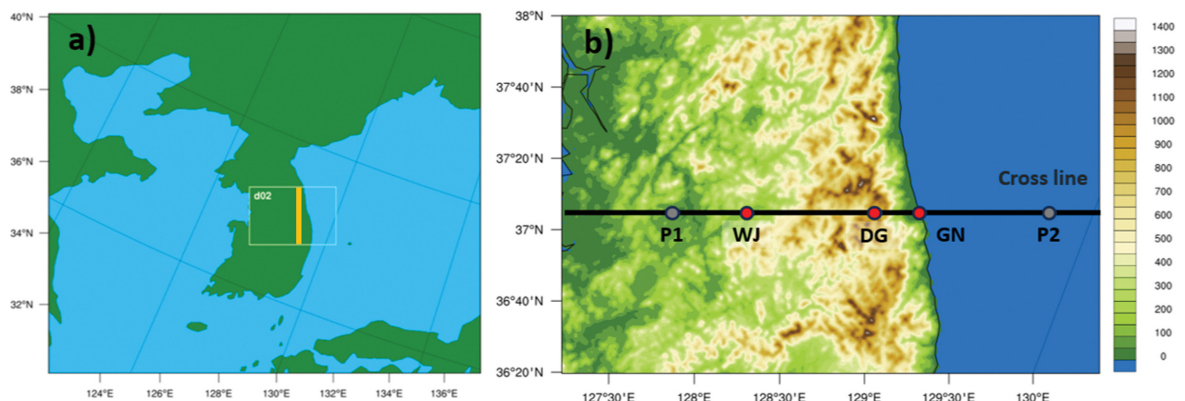


Fig. 3. (a) Nested model domains with horizontal resolutions of 5 km (D1), 1 km (D2). The yellow line represents the Taebaek Mountains. (b) Topography (shading, m) of D2, including the locations of Wonju airport (WJ), Daegwallyeong (DG), and Gangneung airport (GN), and the cross line (black line, $j = 89$). P1 indicates the starting point of the mountainous terrain, and P2 represents a point located offshore.

Table 2. Summary of the WRF model configuration.

Model	WRF v4.3	
Domain	Domain 1	Domain 2
Horizontal grid spacing (km)	300 × 250 (5 km)	301 × 201 (1 km)
Time step (s)	15	3
Vertical layers / Model top	90 Hybrid sigma-pressure / 30 hPa	
Grid nesting	One-way nesting	
Initial / Boundary condition	ERA-5 (1-hourly)	Domain 1
Case (Integrated time)	1200 UTC 10 April 2023~1800 UTC 11 April 2023 (30 hours)	
Microphysics	WSM6	
Cumulus	MSKF	
Planetary Boundary Layer	Shin and Hong	
Longwave / Shortwave Radiation	RRTMG	
Surface layer	Revised MM5 surface layer	
Land Surface Model	Unified noah land Surface Model	

Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)의 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5, 수평해상도 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 연직 층 L37) 자료를 1시간 간격으로 적용하였으며, 지형 자료는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 30 arc-second 해상도(약 1 km)를 이용하였다. 태백산맥을 중심으로 풍상측과 풍하측에서 기류 특성을 알아보기 위해 1 km 격자 모델 결과로 연구를 진행하였다.

3. 결 과

3.1 난류 구역과 활강 강풍 영향 관측 분석

2023년 4월 11일 강릉공항 활강 강풍 사례에 대한 분석은 지상 및 연직 관측 자료, 위성 영상 자료를 통해 난류 구역과 활강 강풍의 영향을 구분하고, 메커니즘의 정성적 분석을 하였다.

Figure 4는 강릉공항의 AMOS의 10 m 풍향 및 풍속 관측 결과이다. 0000 KST 부터 0640 KST까지는 풍향과 풍속의 변화가 많은 난류 구역의 영향이 두드러졌고, 0640 KST 이후부터 1525 KST까지는 풍향이 일정(약 250°)하고 풍속이 15 m s^{-1} 이상으로 관측되어 활강 강풍의 영향으로 확인되었다. 난류 구역의 영향 하에서는 활주로 서단(257°)에 서풍 계열(270°)로 $10\sim 15 \text{ m s}^{-1}$, 동단(77°)에 남풍(180°) 또는 동풍(90°) 계열로 $2.5\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ 의 바람이 혼합되어 있다. 이는 활주로 양측 모두 바람이 항공기 뒤에서 앞으로 불어와 이착륙에 불리하게 만드는 배풍 상태로, 활주로 사용 방향 결정에 어려움을 초래하는 조건이다. 반면 활강

강풍 영향 시기에는 활주로 서단과 동단 모두 풍향이 일정(250°)하고, 풍속은 15 m s^{-1} 이상으로 증가하여 활강 강풍의 전형적인 특성이 나타났다. 1120 KST에는 평균 풍속 21 m s^{-1} , 순간 최대 풍속 32.4 m s^{-1} 가 기록되었고, 1525 KST 부터 1705 KST 사이에는 만주 지역에 위치한 저기압의 영향으로 강우가 발생하며 풍속이 15 m s^{-1} 이하로 급감하였다.

기상청 북강릉 지점의 윈드프로파일러 관측(Fig. 5)에서도 유사한 특징이 나타났다. 0640 KST 이전에 0.5~1.5 km 고도에서 풍향은 가변적이고 풍속도 $2.5\sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 의 큰 범위로 관측되어 난류의 특징을 보였으며, 첫번째 물뿔이 통과한 0640 KST 이후부터는 활강 강풍 영향으로 풍향은 250° 로 일정해지고 풍속이 약 $30\sim 42 \text{ m s}^{-1}$ 로 급증하였다.

이러한 지상 및 연직 관측 분석과 더불어 위성 영상 자료에서도 강풍 메커니즘의 구조적 특성이 확인되었다. 0200~0500 KST 위성 영상(Figs. 6a-d)에서 태백산맥 풍하측에 나타나는 흰색 구름은 강릉공항 관측 기준으로 운저고도가 22,000 ft(약 6.5 km, 400 hPa)인 고고도 구름이다. 갇힌 풍하파(trapped lee waves)에서 형성된 구름은 산 능선에 평행하고 나란하게 형성되는데(Durran, 2003b), 위성 영상에서 고고도 구름이 산맥과 평행하게 형성되어 동해상까지 분포하는 모습을 볼 수 있다. 시간이 지남에 따라 풍하측 상승 운동 구역(물뿔)이 동진하면서, 고고도 구름 형성의 시작 구역도 동해상 밖으로 멀어지는 것을 확인할 수 있다.

1100~1400 KST 위성 영상(Figs. 6e-h)에서 강릉공

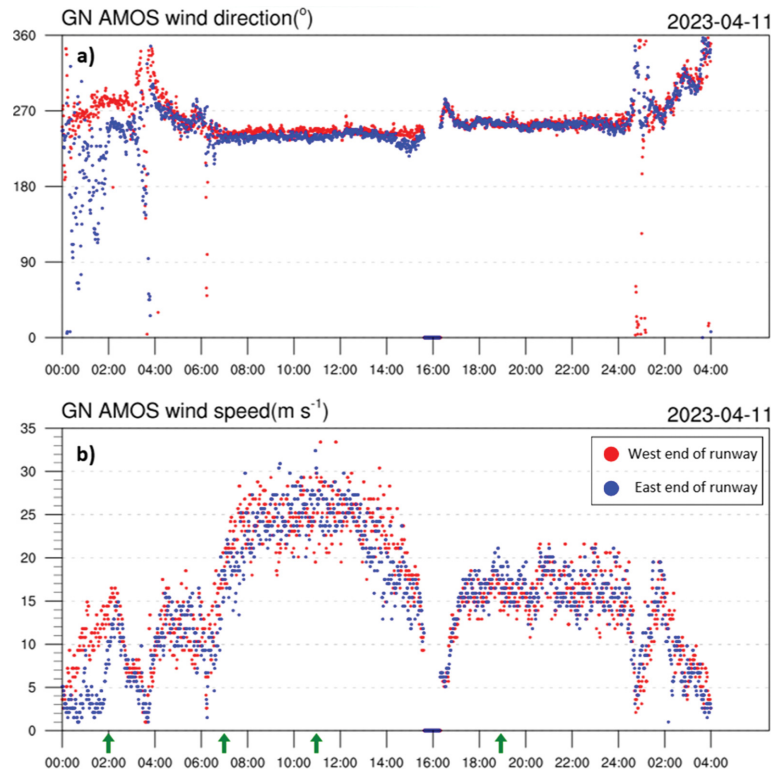


Fig. 4. (a) Wind direction ($^{\circ}$). (b) Gust wind speed (m s^{-1}) observed at 1-minute intervals by AMOS from 0000 KST 11 April 2023 to 0400 KST on 12 April 2023. The red dots represent the west end of the runway, while the blue dots represent the east end. The green arrows indicate analysis times of the numerical simulation results.

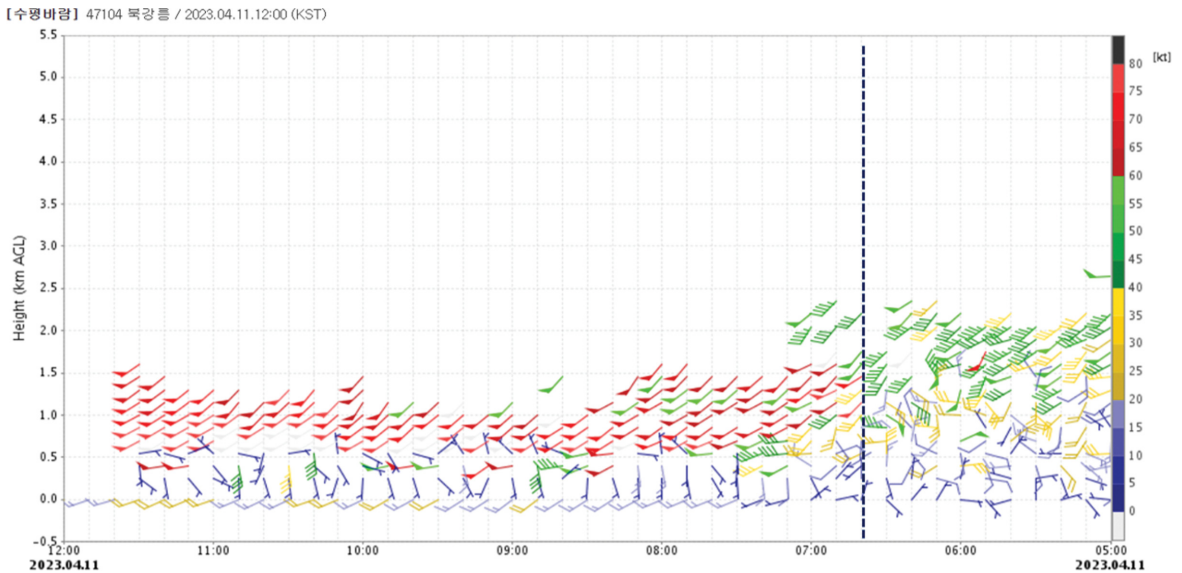


Fig. 5. Horizontal wind (kt) observations from the wind profiler at the Bukgangneung station. The vertical axis represents altitude (km), and the horizontal axis represents time. The dashed line indicates 0640 KST, representing the onset of downslope windstorm following the passage of the hydraulic jump.

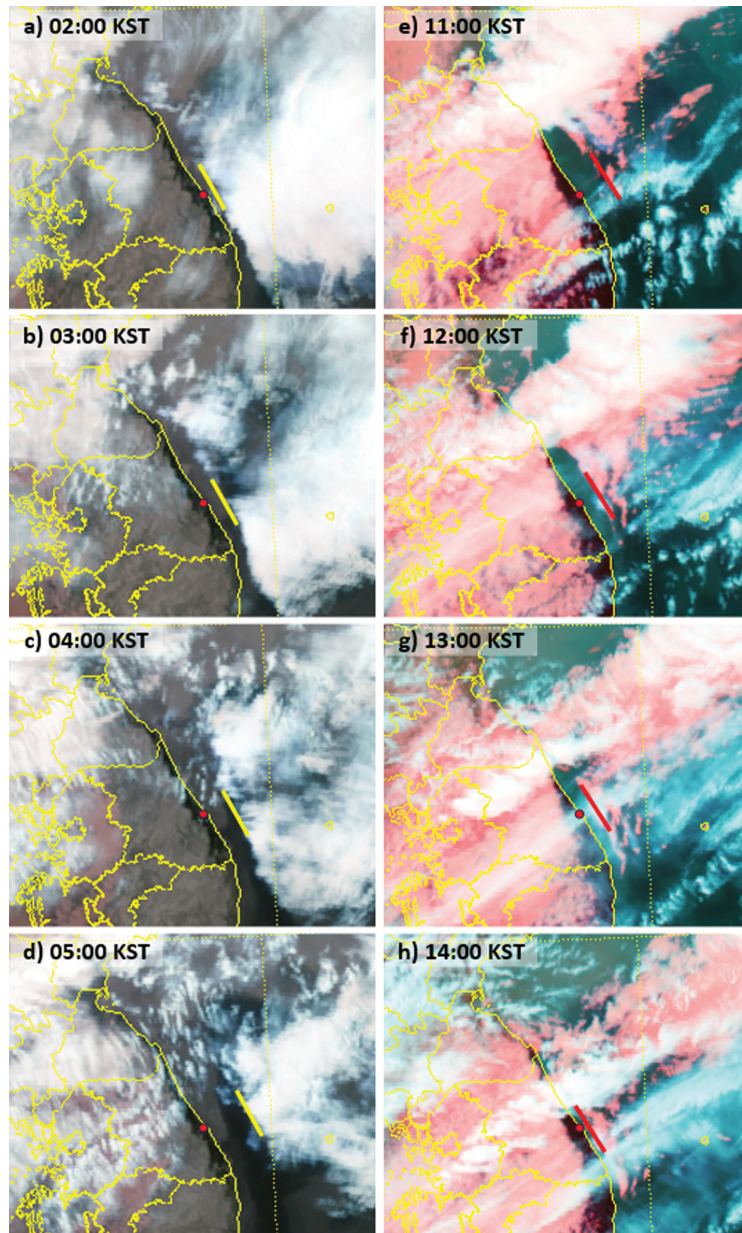


Fig. 6. Satellite imagery at (a-d) 0200, 0300, 0400, and 0500 KST. The red dot represents Gangneung airport (GN). The yellow line indicates the initial formation region of gravity-wave-induced upper-level clouds at 500 hPa. Satellite imagery at (e-h) 1100, 1200, 1300, and 1400 KST shows reddish clouds over the sea east of GN, identified as roll clouds at 925 hPa.

항 앞 바다에 붉은색 계열은 925 hPa 고도 부근에서 형성된 저고도 구름을 나타낸다. 긴 능선에 의해 유발된 산악파는 능선과 평행한 수평축을 가진 저고도 와도를 동반한다(Doyle and Durran, 2002). 이 수평 와도는 로터(rotor; 회전기류)로 알려져 있으며, 항공 안전에 심각한 위험 요소가 될 수 있고, 여러 상업용

및 군용 항공기 사고에 기여한 사례가 있다(NTSB, 1992). 활강 강풍의 끝자락에서 로터에 의해 형성된 회전 구름(roll cloud)은 활강 강풍 영향 구역을 추적하는 데 중요한 참고 자료가 될 수 있다. 활강 강풍의 최성기였던 1100 KST 이후부터 물뿔 메커니즘이 점차 약해짐에 따라 회전 구름의 형성 시작 지점이

점차 해상에서 해안선 방향으로 이동하는 양상이 확인되었다.

앞서 언급한 관측 특성을 바탕으로 본 연구에서는 난류 구역과 활강 강풍의 경계가 형성되는 첫 번째 물뿔의 위치에 주목하였다. 메커니즘 발달 초기인 02 시, 첫 번째 물뿔이 강릉공항을 통과한 0700 KST, 최대 풍속이 기록된 1100 KST, 그리고 메커니즘이 소

멸되며 물뿔이 다시 강릉공항을 통과한 1900 KST를 중심으로, 활강 강풍 메커니즘의 발달 및 소멸 과정과 그에 따른 기상 배경을 분석하였다(Fig. 4).

3.2 강릉공항 활강 강풍 사례의 수치 모의 분석

2023년 4월 11일 사례의 수치 모의 결과에서 강릉공항의 풍속은 1100 KST 기준 21.8 m s^{-1} 로, 실제 관

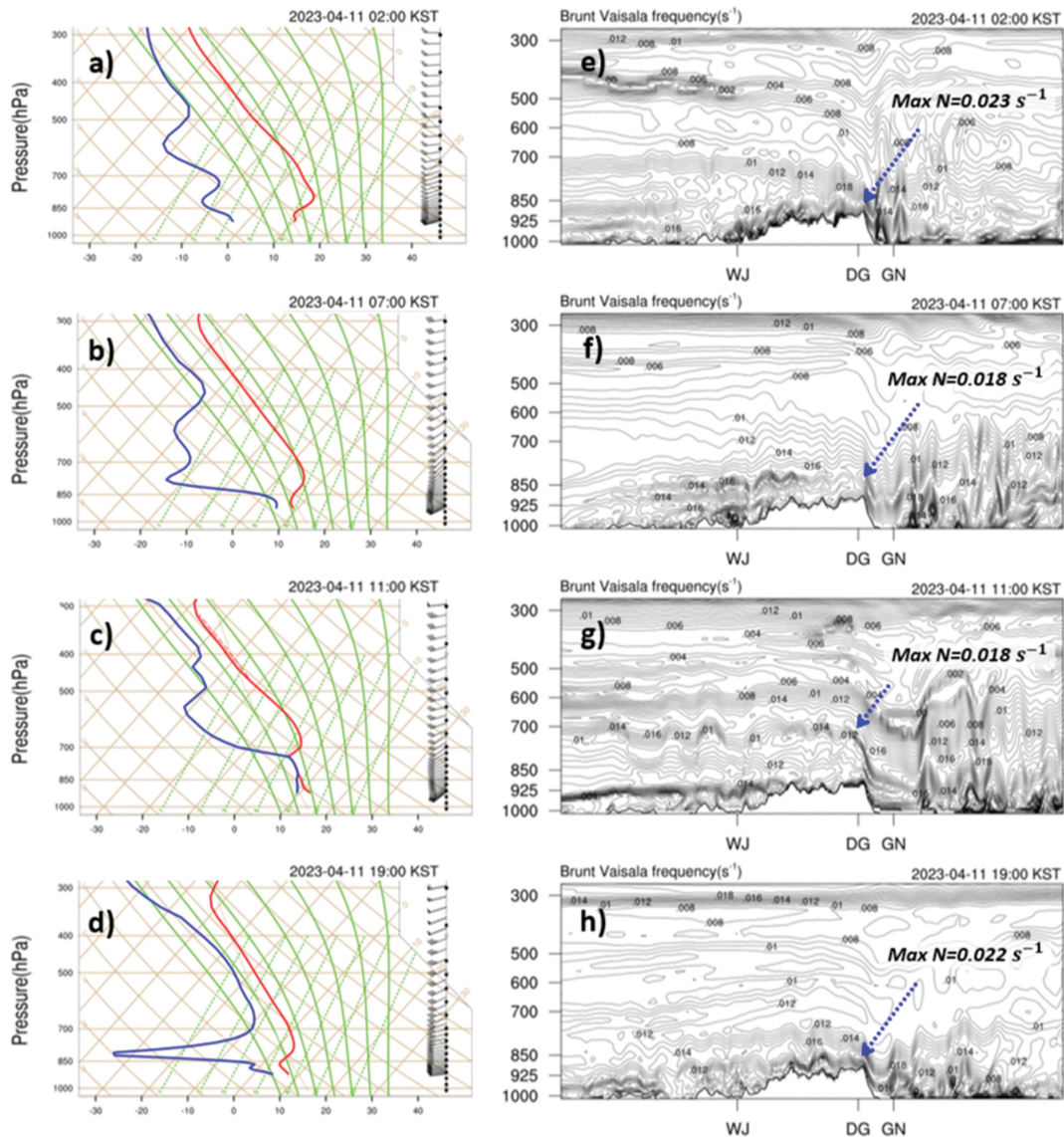


Fig. 7. Vertical temperature profiles at Daegwallyeong at (a-d) 0200, 0700, 1100, and 1900 KST. The red line represents temperature, and the blue line represents dew point temperature ($^{\circ}\text{C}$). Cross-section of the Brunt-Väisälä frequency (s^{-1}) in the x-z plane at (a-d) 0200, 0700, 1100, and 1900 KST. The altitude with the highest Brunt-Väisälä frequency marks the base of the inversion layer and acts as the free surface. The altitude of the maximum buoyancy frequency is connected across the regions of Wonju airport (WJ), Daegwallyeong (DG), and Gangneung airport (GN).

측된 순간 최대풍 32.4 m s^{-1} 보다 과소 모의되었다(Fig. 2). 대관령에서는 풍속이 $10\sim 15 \text{ m s}^{-1}$ 로 모의되었는데, 실제 관측값인 10 m s^{-1} 내외보다 과대 모의되었으며, 원주공항에서는 유사하게 모의되었다. 강릉공항의 풍속 모의는 전체적으로 과소 모의되었지만, 0700 KST부터 1500 KST까지 활강 강풍 영향으로 15 m s^{-1} 이상의 강풍이 모의되면서 실제 관측된 풍속의 경향과 일치하였다.

11일 0200 KST는 활강 강풍의 발달 초기 단계이다. 산악 지역에 높은 기압경도력의 영향으로 대관령에서 14 m s^{-1} 로 모의되었으며, 원주공항과 강릉공항의 풍속은 5 m s^{-1} 미만이다. 0700 KST는 강릉공항이 활강 강풍의 영향을 받기 시작하는 시점으로, 원주공항과 대관령의 풍속은 큰 변동이 없었으나 강릉공항에서는 15 m s^{-1} 이상으로 급증하였다. 1100 KST는 활강 강풍의 최성기로 강릉공항 풍속은 22 m s^{-1} 으로 모의되었고, 1900 KST는 난류적 물뿔 구역 영향으로 풍속이 5 m s^{-1} 이하로 감소하며 활강 강풍 영역의 영향이 종료되었다.

활강 강풍 메커니즘에서 산 정상 부근에 있는 역전층은 풍하측 산사면에서 강풍을 일으키기에 좋은 배

경을 제공하며(Hoinka, 1985; Durran, 1986; Saito and Ikawa, 1991), 2차원 수치 실험을 통해 강한 역전층이 중력파의 반사를 강화하거나 갇힌 풍하파, 회전기류, 물뿔, 쇄파를 유발할 수 있는 것으로 확인되었다(Vosper, 2004). 대기 연직구조 분석 결과, 활강 강풍 발생 초기부터 최성기, 소멸기에 이르기까지 모든 시간대에서 대관령 상공에 역전층이 존재하였다. 또한, 부력진동수(Brunt-Väisälä frequency)를 이용해 대기의 안정도가 가장 높은 고도를 비교 분석한 결과, 최대 부력진동수가 나타나는 고도는 대관령 연직 온도 프로파일에서 역전층이 시작되는 고도와 일치하였다(Fig. 7). 역전층 시작 고도는 0200, 0700, 1100, 1900 KST에 각각 870, 830, 740, 840 hPa에 위치하며(Figs. 7a-d), 이때의 최대 부력진동수는 각각 0.023, 0.018, 0.018, 0.022 s^{-1} 이다(Figs. 7e-h). 이는 대류권에서 평균값인 0.012 s^{-1} (Holton, 2004) 및 봄철 강릉지역에서 발생한 활강 강풍 사례들의 부력진동수 범위인 0.012~0.016 s^{-1} (Jang and Chun, 2008)보다 높은 수치로, 본 사례에서는 보다 강한 안정층이 형성되어 있었음을 시사한다.

대관령의 역전층 시작 고도이자 부력진동수가 가장 큰 고도를 지나는 등온위선이 자유표면 역할을 한다.

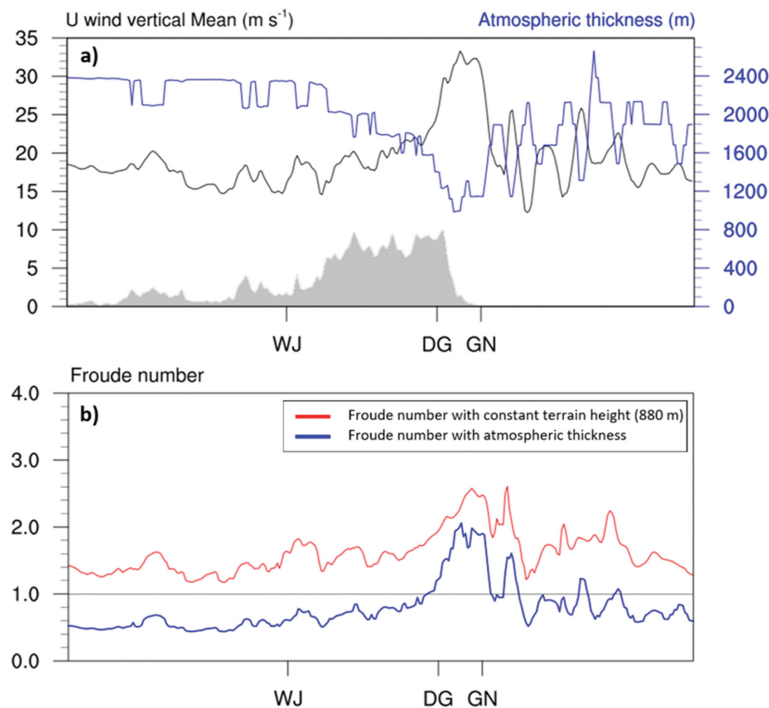


Fig. 8. The x-axis represents the cross-line in domain 2. (a) Vertically averaged zonal wind speed (black line, m s^{-1}), atmospheric thickness at each grid point (blue line, m), and terrain elevation (gray shading, m). (b) Froude number calculated using variable atmospheric thickness (blue line) and a constant terrain height of 880 m (red line), from the 0700 KST model output on 11 April 2023.

많은 선행 연구자들은 활강 강풍 분석에서 총화된 하부 흐름과 덜 총화된 상부 흐름을 구분하기 위해 등엔트로피선 개념을 사용해 왔다(Smith, 1985; Durran and Klemp, 1987; Flamant et al., 2002). 특히 Flamant et al. (2002)은 고해상도 라이다, NOAA P-3 항공기 관측 데이터, 고해상도 수치모델을 이용해 1999년 10월 30일 오스트리아 Wipp Valley에서 강풍을 분석하며, 하층 대기의 자유표면 고도가 특정 등온위선 높이와 매우 잘 일치한다는 것을 확인하였다. 대관령 역전층 시작 고도를 지나는 등온위선(각각 303, 301, 300, 297 K)을 하층 대기 경계로 가정하고, 지표와 경계 고도 사이의 대기 두께와 연직 평균된 풍속 및 부력진동수로 프루드수를 산출하였다[식(4)].

Figure 8a의 연직 평균된 풍속 및 대기두께 그래프에서 원주(WJ)에서 대관령(DG)까지의 지형 상승 구간에서 풍속은 증가하고 대기 두께는 감소한다. 식(1)

에서 섭동해 u' 은 양의 값임을 의미하며, 이때 대기 두께가 적용된 새로운 프루드수는 1보다 작게 나타나 아직 임계 이하의 흐름을 유지하는 것을 잘 보여준다(Fig. 8b). Figure 8b 프루드수 그래프에서 산 높이(880 m)를 적용한 프루드수는 모든 격자점에서 1보다 큰 값으로 산출되어 산 높이 기반의 프루드수로는 임계 전환 구조를 재현하기 어려울 수 있음을 알 수 있다. 반면, 역전층 고도를 활용하여 변화하는 대기 두께가 적용된 프루드수는 지형 상승 구간에서는 1 이하(임계 이하), 대관령 기준 풍하측(강릉공항 방향)에서는 1 이상(임계 초과)을 나타내어 선형이론 기반의 활강 강풍 메커니즘이 실제 사례에서도 잘 적용될 수 있음을 보인다. 따라서, 섭동해의 물리적 특성과 물뿔 메커니즘을 설명하는 데 있어 프루드수는 산 높이보다 대기 두께를 적용하는 것이 보다 더 적절한 해석을 가능하게 한다.

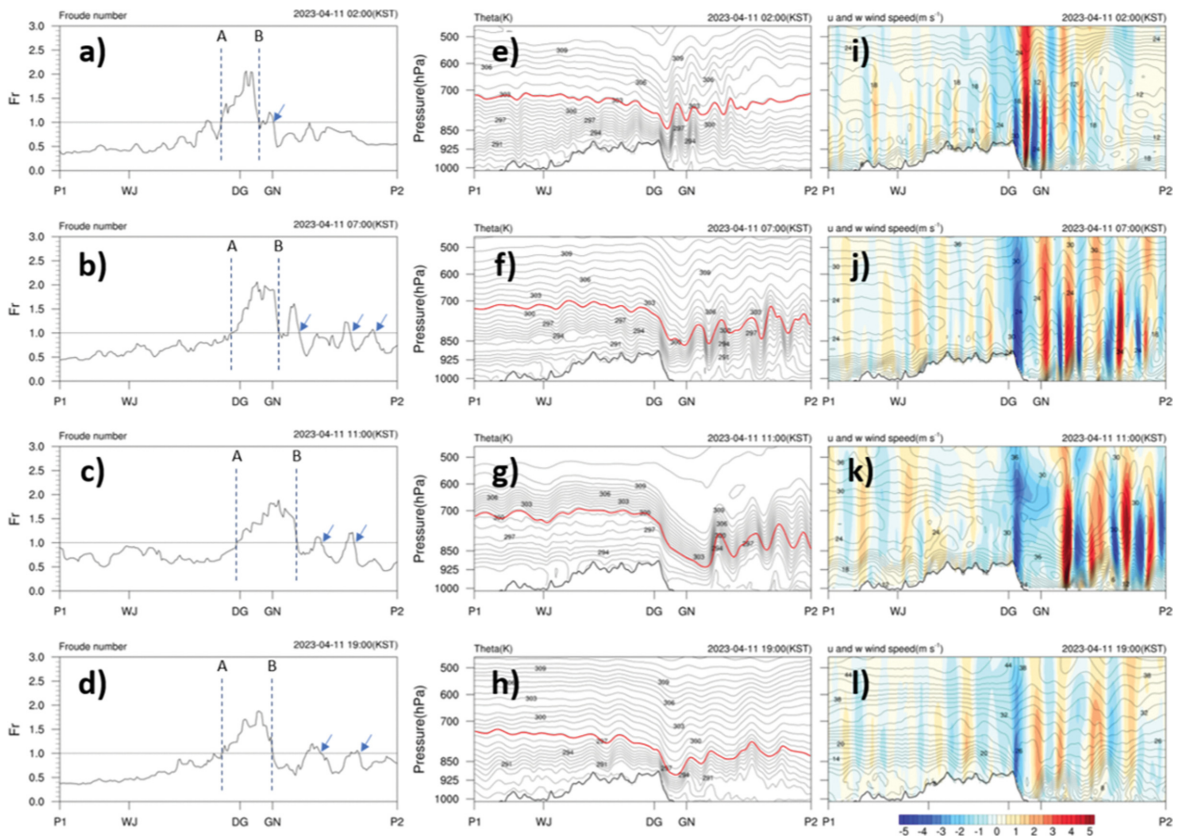


Fig. 9. Froude number zonal distribution at (a-d) 0200, 0700, 1100, and 1900 KST on 11 April 2023. The dashed line A ($Fr = 1$) indicates the transition from subcritical to supercritical flow, and the dashed line B ($Fr = 1$) indicates the transition from supercritical to subcritical flow and first hydraulic jump. Cross-sectional view of potential temperature at (e-h) 0200, 0700, 1100, and 1900 KST. The solid lines represent isentropes (interval: 1 K). The zonal wind (solid lines, interval: 2 m s⁻¹) and vertical wind (shaded, m s⁻¹), at (i-l) 0200, 0700, 1100, and 1900 KST.

Table 3. Froude number (Fr) and 10m wind speed (m s^{-1}) at Wonju airport (WJ), Daegwallyeong (DG), and Gangneung airport (GN), and the maximum/minimum vertical velocity (m s^{-1}), and maximum zonal wind speed (m s^{-1}) on the lee side at four key times.

		0200 KST	0700 KST	1100 KST	1900 KST
WJ	Fr	0.4	0.6	0.9	0.5
	10 m wind	2.9	5.4	11.8	3.8
DG	Fr	1.6	1.2	1.1	1.4
	10 m wind	13.8	14.8	14.6	11.8
GN	Fr	1.1	1.9	1.8	1.0
	10 m wind	9.0	16.0	22.0	11.8
Lee side	min w	-4.9	-5.6	-4.9	-3.8
	max u	31.1	36.2	42.7	28.7
	max w	6.9	4.3	10.4	2.3

Figures 9a-d는 물뿔의 발달 초기/최성기/소멸 시점에 대해 0200, 0700, 1100, 1900 KST 기준으로 계산된 프루드수의 동서 공간분포이다. 점선 A는 풍상측 임계 이하 흐름이 임계 초과로 전환되는 지점을, 점선 B는 풍하측에서 프루드수가 급감하며 임계 초과에서 임계 이하 흐름으로 전환되며 첫 번째 물뿔이 발생하는 지점을 나타낸다. A와 B 사이는 임계 초과 흐름에서 하강 가속이 발생하는 활강 강풍 영역이며, B의 오른쪽 구역은 첫 번째 물뿔 이후 임계 이하로 적응하는 난류 구역이다.

물뿔 메커니즘 발달 초기 단계(Fig. 9a)에서 지점 A는 대관령 서쪽 12 km, 지점 B는 강릉공항 서쪽 8 km (대관령 동쪽 13 km)이다. 주목할 만한 점은 강릉공항의 프루드수가 1.1로 임계 초과 상태에 있지만 (Table 3), 강풍이 발생하지 않는다는 것이다(Fig. 4). 이는 하강 가속 후 물뿔이 강릉 서쪽 8 km에서 발생한 후, 임계 이하 흐름으로 적응하는 구간에서 일시적으로 임계 초과 상태였기 때문이다. 이러한 사례는 단순한 한 지점에서의 프루드수 값만으로 활강 강풍 여부를 판단하기보다는, 물뿔 위치와 프루드수의 공간적 분포를 함께 고려하여 해석하는 것이 타당함을 시사한다. 첫 번째 물뿔이 강릉공항을 지나 해상으로 진출하는 시점(Fig. 9b)에 지점 A는 대관령 서쪽 5 km, 지점 B는 강릉공항 동쪽 5 km에 위치한다. 강릉공항은 활강 강풍 영역에서 프루드수는 1.9이다. 활강 강풍 발달 최성기(Fig. 9c)에 지점 A는 대관령 서쪽 2 km, 지점 B는 강릉공항 동쪽 16 km 해상에 위치한다. 물뿔 메커니즘 발생 기간 동안 첫 번째 물뿔이 가장 먼 해상에 위치하며, 가속 구간은 39 km로 가장 긴 상태이다. 물뿔 메커니즘 소멸 단계(Fig. 9d)에 지점 A는 대관령 서쪽 11 km, 지점 B는 강릉공항에 위치한다.

Lin and Wang (1996)에 따르면, 등온위선이 장애물

을 지나 경사면을 따라 하강한 후 풍하측에서 수직으로 형성되며 풍상측의 고도와 같아지는 것을 물뿔 현상으로 정의한다. 본 사례의 등온위선 x-z 단면도 결과(Figs. 9e-h)에서 등온위선의 고도는 일정하다가, 대관령에 접근하기 전(지점 A)부터 완만한 경사를 가지며 고도가 낮아진다. 산맥 경사가 가파른 구간인 대관령-강릉 구간에서는 등온위선의 밀도가 높게 나타나며, 하강 각도가 커진다. 풍하측 하강 이후 첫 번째로 등온위선이 수직으로 형성되는 구역은 Figs. 9a-d에서 프루드수가 급감하며 다시 1이 되는 지점과 일치한다. 또한, 첫 번째 물뿔 이후 동해상에서 상승과 하강을 반복하는데, Figs. 9a-d에서 임계 초과에서 이하로 전환되는 지점(파란색 화살표)과 상승 지점이 일치하며, 등온위선의 진폭은 활강 강풍 발달과 최성기였던 시간대에서 더 크게 나타난다. 또한, 활강 강풍 발달 최성기인 1100 KST (Fig. 9g)에는 강릉공항 700 hPa 상공에서 유선 분할로 나타나는 쇄파 현상이 관찰되었으나, 다른 시간대에는 이러한 구조가 나타나지 않았다. 쇄파는 활강 강풍의 필수 조건은 아닌 것으로 수치실험을 통해 밝혀진 바 있다(Durran, 1986; Smith and Skillingstad, 2011). 실제로 이번 사례에서도 강릉공항 서쪽까지만 활강 강풍이 영향을 미쳤던 시간대(Figs. 9a-b)에는 쇄파가 발생하지 않았다.

동서 바람 등풍속선과 연직 속도 x-z 단면도(Figs. 9i-l) 분석 결과, 강한 하강 속도는 풍하측 경사면에서, 강한 상승 속도는 첫 번째 물뿔 구역에서 나타난다. 최대 하강 속도는 1100 KST보다 0700 KST에 더 크게 모의되었으며, 최대 상승 속도는 0700 KST보다 0200 KST에 더 강하게 나타났다. 이는 경사면에서의 하강 속도나, 가속 구간 말단에 해당하는 물뿔 위치에서의 상승 속도가 반드시 활강 강풍 구역 내에서의 최대 풍속과 경향이 일치하지 않음을 시사한다. 반면, 대관령에서 첫 번째 물뿔까지의 거리와 최대풍속의

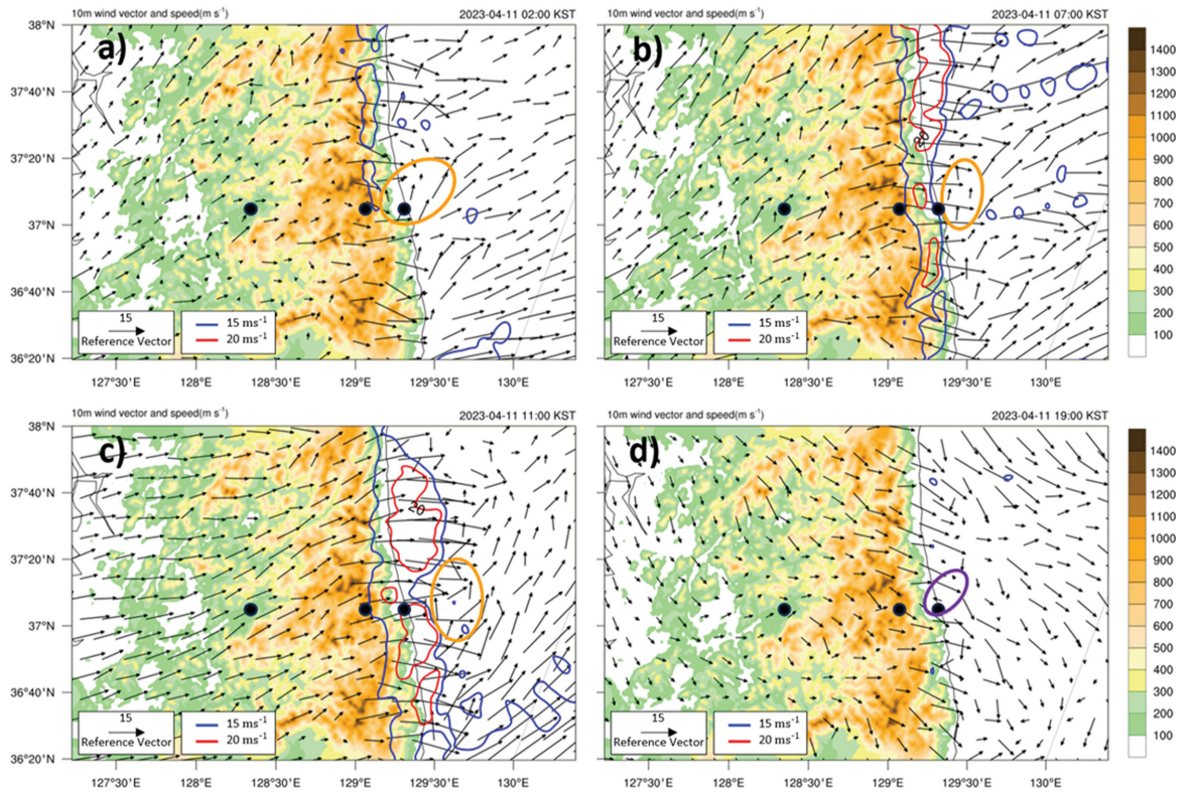


Fig. 10. Vectors indicate wind direction with grids at the vector tails at (a-d) 0200, 0700, 1100, and 1900 KST. Blue (red) solid lines represent 15 m s^{-1} (20 m s^{-1}). Yellow (purple) ellipses indicate southerly (easterly) winds.

경향은 유사하게 나타난다. 각 시각별로 대관령과 첫 번째 물뿔까지 떨어진 거리는 0200, 0700, 1100, 1900 KST에 각각 13, 26, 37, 21 km이며, 이에 대응하여 925 hPa 고도 부근에서의 최대 풍속은 각각 31.1, 36.2, 42.7, 28.7 m s^{-1} 로 모의되었다. 또한, 활강 강풍 구역 내에서 나타나는 최대 풍속 위치는 첫 번째 물뿔과 가까운 곳에 나타난다. Holton (2004)은 임계 초과 흐름이 임계 이하 조건에 적응할 때까지 계속 가속된다고 설명하였다. 다시 말해, 프루드수가 급감하여 임계 이하로 변하는 지점에서 물뿔이 발생하며, 물뿔 직전까지 가속된다는 의미인데, 최대풍속 모의 위치가 Holton (2004)의 설명과 일치함을 확인하였다.

Figure 10은 풍향 및 등풍속 수평 분포이다. 물뿔 메커니즘 발달 초기인 0200 KST (Fig. 10a)에는 강릉 공항을 포함한 풍하측 평지와 동해상에서 남풍계열의 바람(노란색 원)이, 북쪽 해안에서는 동풍계열의 바람이 나타난다. 풍속은 산 정상 부근에만 15 m s^{-1} 등풍속선이 위치한다. 물뿔이 강릉공항을 통과한 0700 KST (Fig. 10b)에는 남풍계열 구역이 해상으로 멀어졌으며, 15 m s^{-1} 등풍속선은 강릉공항까지 확장되고,

경사면에는 20 m s^{-1} 등풍속선이 나타난다. 활강 강풍 최성기인 1100 KST (Fig. 10c)에는 남풍 구역이 해상 15 km 밖으로 이동하며, 20 m s^{-1} 등풍속선은 해안선과 동해상까지 확장되어 물뿔 메커니즘 발생 시간대 중 가장 넓은 범위를 나타낸다. 물뿔이 다시 강릉공항 서쪽을 통과한 1900 KST (Fig. 10d)에는 강릉 해안 및 동해상 근해에 동풍계열의 바람이 모의된다(보라색 원). 1500 KST 이후부터는 모델 모의결과가 실제 관측 결과와 차이를 보이는데, 이는 모델 시간 경과에 따른 예측 차이로 추정된다. 실제로 물뿔 메커니즘 발생 후 악화 단계에서 해상에 위치한 물뿔이 서진하며 이동해 올 때, 강릉공항에는 동풍계열의 바람이 관측된다(생략). 물뿔 우측 난류 구역에서 동풍계열로 모의된 모델 결과는 발생 시간에는 차이가 있지만, 풍향 구조를 이해하는 데 큰 문제가 없다고 판단되며, 향후 연구가 필요하다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2023년 4월 11일 강릉공항에서 발생

한 활강 강풍 사례를 수치 모의하고, 천수 이론을 바탕으로 강풍 메커니즘을 분석하였다. 강릉공항 활강로 서단과 동단에 설치된 바람 관측 결과를 이용하여 물뿔 위치에 따른 난류 구역 영향과 활강 강풍을 분석하였으며, 활강 강풍 메커니즘의 이해를 돕기 위해 WRF 모델로 수치 재현을 하고 프루드수를 분석에 활용하였다.

본 연구에서는 프루드수 산출 시 기존 연구들에서 사용하던 평균 산 높이 대신, 역전층 이하 대기 두께를 적용하였다. 부력진동수가 최대가 되는 고도를 하층 대기의 경계로 간주하고, 해당 고도 이하의 연직 평균 풍속 및 부력진동수, 대기 두께를 이용해 산출한 프루드수는 산 높이를 적용한 프루드수보다 이론적으로 더 적합한 것으로 확인했다. 이 방식은 활강 강풍과 관련된 물뿔 메커니즘 분석에도 유효한 것으로 확인되었다.

프루드수의 공간 분포와 등온위선 분석 결과, 풍상측 지형 상승 구간에서는 임계 이하($Fr < 1$) 상태로 대기 두께가 감소하고 평균류가 증가하는 경향을 보였다. 산 정상 부근에서 임계 초과($Fr > 1$) 흐름으로 전환되며 하강이 시작되고, 풍하측 경사면을 따라 가속되다가 프루드수가 다시 1에 도달하는 지점에서 첫 번째 물뿔이 발생하였다. 이 지점은 활강 강풍의 종료와 임계 이하 흐름 적용이 시작되는 구간에 해당한다. 시간에 따른 프루드수 변화 분석 결과, 강풍 최성기에는 산 정상의 $Fr = 1$ 전환 지점이 대관령에 근접하고, 하강 가속 구간이 가장 길게 나타났으며, 최대 풍속은 첫 번째 물뿔 발생 직전에 나타났다. 이는 임계 이하 상태로 적용하기 전까지 가속이 지속된다는 천수 이론 내용과 일치하였다.

관측된 풍향과 풍속의 변화는 수치 모의에서도 잘 재현되었으며, 위성 영상에서도 갇힌 풍하파와 회전구름 등의 특성이 포착되어 강풍 메커니즘 진단의 정성적 보완 수단이 될 수 있음을 확인하였다. 특히, 위성 영상에서 구름 형성 시작 위치의 시공간적 이동은 활강 강풍 및 물뿔 발생 구역을 실시간으로 추적하는데 효과적인 수단이 될 수 있다.

유효 대기 두께를 적용한 프루드수는 임계 전환 구조를 명확히 나타내어 활강 강풍의 시작 지점과 종료 지점을 예측하는데 적합하며, 이는 예보 정확도 향상에 기여할 수 있다. 따라서 본 연구는 천수 이론 기반의 프루드수 분석을 통해 활강 강풍의 발달과정과 물뿔 위치를 정량적으로 진단하고, 실제 관측 결과와의 일치성을 확인함으로써 예측 가능성을 제시한다. 향후 연구에서는 활강 강풍과 물뿔이 강릉공항 풍향과 풍속에 미치는 영향을 보다 정밀하게 규명하고, 위성 영상과 수치모의 기반 기법의 통합적 예보 활용 방안을 구체화할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업과 「위험기상 선제대응 기술개발사업」(RS-2023-00240346)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Clark, T. L., and W. R. Peltier, 1984: Critical level reflection and the resonant growth of nonlinear mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3122-3134.
- Decker, S. G., and D. A. Robinson, 2011: Unexpected high winds in northern New Jersey: A downslope wind-storm in modest topography. *Weather Forecast.*, **26**, 902-921, doi:10.1175/WAF-D-10-05052.1.
- Doyle, J. D., and D. R. Durran, 2002: The dynamics of mountain-wave-induced rotors. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 186-201, doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0186: TDOMWI>2.0.CO;2.
- Durran, D. R., 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.
- , 2003a: Downslope winds. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 644-650, doi:10.1016/B0-12-227090-8/00288-8.
- , 2003b: Lee waves and mountain waves. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 1161-1169, doi:10.1016/B0-12-227090-8/00202-5.
- , and J. B. Klemp, 1987: Another look at downslope winds. Part II: Nonlinear amplification beneath wave-overtaking layers. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 3402-3412, doi:10.1175/1520-0469(1987)044<3402: ALADWP>2.0.CO;2.
- Flamant, C., P. Drobinski, L. Nance, R. Banta, L. Darby, J. Dusek, M. Hardesty, J. Pelon, and E. Richard, 2002: Gap flow in an Alpine valley during a shallow south föhn event: Observations, numerical simulations and hydraulic analogue. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 1173-1210, doi:10.1256/003590002320373256.
- Gohm, A., and G. J. Mayr, 2004: Hydraulic aspects of föhn winds in an Alpine valley. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **130**, 449-480, doi:10.1256/qj.03.28.
- Han, J. Y., J. J. Kim, and J. J. Baik, 2007: Flow regimes of continuously stratified flow over a double mountain.

- Atmosphere*, **17**, 231-240 [in Korean with English abstract].
- Ho, C. H., and Coauthors, 2023: Review of the weather hazard research: Focused on typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, and strong gust. *Atmosphere*, **33**, 223-246, doi:10.14191/Atmos.2023.33.2.223 [in Korean with English abstract].
- Hoinka, K. P., 1985: Observation of the airflow over the Alps during a foehn event. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 199-224, doi:10.1002/qj.49711146709.
- Holton, J. R., 2004: Mesoscale circulations. *An introduction to Dynamic Meteorology*, 4th Ed., Elsevier Academic Press, 269-311.
- Jang, W., and H. Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, **18**, 207-224 [in Korean with English abstract].
- Jeong, J. H., B. G. Kim, Y. J. Chae, Y. G. Choi, J. Y. Kim, and B. H. Lim, 2023: Characteristics of long-term (2000~2020) downslope windstorm in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **33**, 21-32, doi:10.14191/Atmos.2023.33.1.021 [in Korean with English abstract].
- 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, doi:10.14191/Atmos.2006.16.2.067 [in Korean with English abstract].
- 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:TDOWID>2.0.CO;2.
- Lee, J., 2003: A numerical study of the orographic effect of the Taebaek mountains on the increase of the downslope wind speed near Gangneung area. *J. Environ. Sci.*, **12**, 1245-1254 [in Korean with English abstract].
- Lee, J. H., and S. L. Kang, 2022: A Numerical Experiment on the Occurrence of Atmospheric Hydraulic Jump at the Taebaek Mountains Downwind. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **22**, 331-342, doi:10.9798/KOSHAM.2022.22.6.331 [in Korean with English abstract].
- 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.
- NTSB, 1992: United airlines flight 585, Boeing 737-291, N99UA, uncontrolled collision with terrain for uncontrolled reasons, 4 miles south of Colorado Springs, Colorado, March 3, 1991. *AAR-92-06, PB92-910407*, 160 pp.
- Saito, K., and M. Ikawa, 1991: A numerical study of the local downslope wind "Yamaji-kaze" in Japan. *J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II*, **69**, 31-56, doi:10.2151/jmsj1965.69.1_31.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2021: A description of the advanced research WRF model version 4.3. *NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR*, 145 pp, doi:10.5065/1dfh-6p97.
- Smith, C. M., and E. D. Skillingstad, 2011: Effects of inversion height and surface heat flux on downslope windstorms. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3750-3764, doi:10.1175/2011MWR3619.1.
- 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.
- Tollinger, M., A. Gohm, and M. O. Jonassen, 2019: Unravelling the March 1972 northwest greenland windstorm with high-resolution numerical simulations. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **145**, 3409-3431, doi:10.1002/qj.3627.
- Vallis, G. K., 2017: Effects of rotation and stratification. *Atmospheric and oceanic fluid dynamics: Fundamentals and large-scale circulation*, 2nd Ed., Cambridge University Press, 55-101, doi:10.1017/9781107588417.
- Vosper, S. B., 2004: Inversion effects on mountain lee waves. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **130**, 1723-1748, doi:10.1256/qj.03.63.