

## 용평 알파인 경기장에서 겨울철 바람의 일변화 및 난류 특성분석

전혜림<sup>1)</sup> · 김병곤<sup>1)\*</sup> · 은승희<sup>1)</sup> · 이영희<sup>2)</sup> · 최병철<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과, <sup>2)</sup>경북대학교 천문대기과학과,

<sup>3)</sup>국립기상과학원 관측예보연구과 재해기상연구센터

(접수일: 2016년 4월 12일, 수정일: 2016년 6월 12일, 게재확정일: 2016년 6월 27일)

### An Analysis of the Wintertime Diurnal Wind Variation and Turbulent Characteristics over Yongpyong Alpine Slope

Hye-Rim Jeon<sup>1)</sup>, Byung-Gon Kim<sup>1)\*</sup>, Seung-Hee Eun<sup>1)</sup>, Young-Hee Lee<sup>2)</sup>, and Byoung-Cheol Choi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

<sup>2)</sup>Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>3)</sup>High-impact Weather Research Center, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Studies, Gangneung, Korea

(Manuscript received 12 April 2016; revised 12 June 2016; accepted 27 June 2016)

**Abstract** A 3D sonic anemometer has been installed at Yongpyong alpine slope since Oct. 23th 2014 to observe the slope winds and to analyze turbulent characteristics with the change in surface cover (grass and snow) and the synoptic wind strength. Eddy covariance method has been applied to calculate the turbulent quantity after coordinate transformation of a planar-fit rotation. We have carefully selected 3 good episodes in the winter season (23 October 2014 to 28 February 2015) for each category (9 days in total), such as grass and snow covers in case of weak synoptic wind condition, and grass cover of strong synoptic wind. The diurnal variations of the slope winds were well developed like the upslope wind in the daytime and downslope wind in the nighttime for both surface covers (grass and snow) in the weak synoptic forcing, when accordingly both heat and momentum fluxes significantly increased in the daytime and decreased in the nighttime. Meanwhile, diurnal variation of heat flux was not present on the snow cover probably in associated with significant fraction of sunlight reflection due to high albedo especially during the daytime in comparison to those on the grass cover. In the strong synoptic regime, the most dominant feature at Yongpyong, only the southeasterly downslope winds were steadily generated irrespective of day and night with significant increases in momentum flux and turbulent kinetic energy as well, which could suggest that local circulations are suppressed by the synoptic scale forcing. In spite of only one season analysis applied to the limited domain, this kind of an observation-based study will provide the basis for understanding of the local wind circulation in the complex mountain domain such as Gangwon in Korea.

**Key words:** Yongpyong alpine slope, slope wind, flux, turbulent kinetic energy

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

## 1. 서 론

산 경사면에서의 바람은 주간에는 활승 경사풍(upslope flow), 야간에는 활강 경사풍(downslope flow)이 발달하는 일변화를 가지고 있다. 주간에는 태양복사에 의한 지표면 가열에 의해 경사면 부근의 공기가 수평적으로 같은 높이에 존재하는 공기보다 더 높은 온도를 갖게 되기 때문에 양의 부력에 의해 공기가 상승하게 되고, 경사면 아래에서 산 정상에 향해 부는 활승 경사풍이 발달하게 된다. 반면에 야간에는 태양복사가 없기 때문에 지표면 냉각에 의해 경사면 부근의 공기가 수평적으로 같은 높이에 존재하는 공기보다 더 낮은 온도를 갖게 되어(음의 부력), 산 정상에서 경사면 아래를 향해 부는 활강 경사풍이 발생하게 된다(Whiteman, 2000). 따라서 경사풍의 풍향 전환은 일출, 일몰에 따라 하루 두 번 나타나며 이러한 일변화는 주로 열순환에 의해 발생하기 때문에 열적으로 유발된 바람(thermally driven winds)이라고도 불린다. 산악지역에서 경사풍은 종관장의 영향이 약하고 구름 없는 맑은 날 잘 발달하여 대기경계층에서 열과 운동량의 연직 혼합과 온도 균형에 중요한 역할을 하는 난류에너지를 생성하게 된다(Cuxart et al., 2011).

한반도의 70%는 산지로 이루어져 다양한 기상현상과 재해기상이 빈번히 발생하는데 특히 산악지역의 바람은 역동적인 기상 변화와 온도 분포(Lindkvist and Lindqvist, 1997; Gustavsson et al., 1998; Lindkvist et al., 2000; Mahrt, 2006), 대기 오염의 수송과 확산, 안개와 하층운의 형성과 소멸(Cuxart and Jiménez, 2011) 등에 영향을 미칠 뿐만 아니라 최근 여가생활의 수요 증가로 등산, 패러글라이딩, 스키 등과 같은 산악스포츠와 겨울스포츠를 즐기는 사람들의 안전을 위한 기상정보 서비스 제공에 필수 요소이다. 또한 본 연구의 관측지점인 용평 알파인 경기장은 2018 평창 동계 올림픽 경기 중 알파인 경기가 열리는 곳으로 올림픽 경기의 원활한 진행과 선수들의 안전을 위하여 경기장의 기상 특성 파악이 필수적으로 요구되는 곳이다.

국외에서는 19세기 이후부터 산악지역의 바람에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 관측연구 또한 활발히 이루어지고 있다(Horst and Doran, 1986; Papadopoulos et al., 1997; Monti et al., 2002; Haiden and Whiteman, 2005; Whiteman and Zhong, 2008). Horst and Doran (1986)와 Papadopoulos et al. (1997)는 관측을 통해 야간에 발생하는 경사류의 난류 구조에 대해 분석한 바 있으며, Monti et al. (2002)은 관측을 통해 경사풍의 일변화와 야간 경사풍에 의해 발생하는 난류를 자세히 분석한 바 있다. 반면 국내의 선행연구로는 Han and Lee (2007)가 산 경사면의 기

울기 변화에 따른 바람장의 민감도에 관한 수치모의 연구를 통해 산악지역에서 발생하는 활강 강풍에 대하여 분석한 바 있으나 관측적인 이해는 이루어지지 않았다. Kim et al. (2014)은 용평 스키장에 대한 고해상도 모델에 의해 산출된 바람장과 실제 관측자료의 비교를 통해 모델이 산 정상 부근의 관측바람은 잘 모의하나 경사면에 대한 활승 경사풍과 활강 경사풍은 잘 모의하지 못한다고 보고한 바 있으나, 산악지역의 바람과 난류에 대한 관측연구는 국외와 달리 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 관측을 통한 산악지역 바람장을 이해하기 위하여 2014년 10월 23일 용평 알파인 경기장 도착지점에 3차원 초음파 풍향·풍속계(CSAT3, Campbell Sci., USA)를 설치하였으며 2014년 10월 23일~2015년 2월 28일 기간에 대한 관측자료를 이용하여 지표면 성질(초상, 설상)과 종관풍의 세기에 따라 산 경사면에서 발생하는 바람의 일변화와 에디 공분산 방법을 이용하여 난류 특성을 분석하였다.

## 2. 분석 자료 및 방법

2014년 10월 23일 용평 알파인 경기장의 도착지점에 3차원 초음파 풍향·풍속계를 설치하여 1분, 10분, 10 Hz 단위의  $u$ ,  $v$ ,  $w$  바람벡터와 온도( $T$ )를 관측하였으며 관측 고도는 2 m이다. 본 연구에서는 바람의 일변화를 살펴보기 위하여 1분 관측 자료를 이용하였으며 난류계산에는 10 Hz 관측 자료를 이용하였다. 관측지점인 용평 알파인 경기장은 강원도 평창군 용평 리조트에 위치하고 있으며, 2018 평창 동계 올림픽 경기 중 알파인 스키 경기가 열리는 곳이다(Fig. 1). 알파인 경기장의 길이는 1,191 m이고 정상지점의 고도는 1,493 m, 도착지점의 고도는 976 m로 463 m의 표고차를 갖고 있으며, 남동방향에 정상을 두고 북서 방향을 따라 경기장이 위치하고 있다. 기울기는 최대 31.8°, 최소 8.4°, 평균 19.5°로 다소 가파른 기울기를 가진다. 알파인 경기장의 지표면은 스키시즌을 제외하고 잔디, 나무 등과 같은 식물로 덮여 있으며 주로 1월 초에 개장한다.

지표면 성질과 종관풍 세기에 따라 바람의 일변화와 난류특성을 분석하기 위하여 분석기간인 2014년 10월 23일~2015년 2월 28일 중 지표면 성질에 따른 분석은 종관풍이 약한 조건에서 지표면이 초상인 날과 설상인 날을 선별하여 비교 분석하였고 종관풍 세기에 따른 분석은 지표면이 초상인 조건에서 종관풍 세기가 약한 날과 강한 날을 선별하여 비교 분석하였다. 즉 종관풍이 약한 초상인 날과 설상인 날, 종관풍이 강한 초상인 날을 각각 3사례씩, 총 9사례를 선별하였다. 종관풍은 Eun et al. (2011)이 제시한 방법을 통해 RDAPS



**Fig. 1.** The image of alpine slope at the Yongpyong resort. Blue arrow indicates the start position and red arrow indicates the finish position. A 3-D Sonic Anemometer was installed at the finish position.

(Regional Data Assimilation and Prediction System) 자료를 이용하여 계산하였다. 사례 선정 방법으로는 3차원 초음파 풍향 · 풍속계의 경우 강수가 착빙될 시 자료 값이 부정확해질 수 있으므로 강수가 나타난 날을 분석에서 제외하였다. 그리고 경사풍과 난류에너지는 열적 강제력의 직접적인 영향을 받기 때문에 이에 따른 난류 차이를 최소화하기 위하여 용평 리조트에서 직선거리 약 15 km 떨어진 대관령 기상대의 AWS 자료를 이용하여 일조시간이 8시간 이상인 날을 선별하였다. 종관풍의 세기와와의 비교를 위해 주변 지형이 단조롭고 방해물이 없는 언덕에 위치한 대관령기상대의 지상풍속도 함께 조사하였다. 종관풍이 약한 사례의 경우 일평균 종관 풍속이  $10 \text{ m s}^{-1}$  이하인 조건에서 지표면이 초상인 날과 설상인 날을 선별하였고 종관풍이 강한 사례의 경우 종관풍속이  $10 \text{ m s}^{-1}$  이상이며 지표면이 초상인 날로 선별하였다. 선별된 사례와 각 사례에 대한 일조시간, 일평균 종관풍속 및 관

령의 지상풍속을 Table 1에 제시하였다.

에디 공분산 방법으로 난류분석을 수행하기 전, 관측기기 센서 자체에 문제가 있거나, 전기의 무작위 잡음 또는 센서에 응결이 발생할 때, 적정 전력보다 낮은 전력이 공급되는 경우 이상치가 나타날 수 있기 때문에(Lee et al., 2004) 난류분석에 적절하지 않은 자료를 포함할 수 있다. 따라서 관측된 자료에 대한 품질검사가 필요하다. 본 연구에서는 자료의 품질관리를 위하여 원시자료에 대한 최대값, 최소값 검사와 이상치를 제거하고 좌표변환을 수행하였다. 좌표변환의 경우 용평 알파인 경기장은 복잡한 산악지역에 위치하므로 복잡한 지형에서 주로 이용되는 좌표변환 방법인 플래너 피트 회전(planar-fit rotation)을 이용하여 수행하였다. 플래너 피트 회전 방법은 10 Hz 단위의 장기간 관측 자료를 이용하여 주풍향을 계산하고 주풍향에 대한 수평 평면을 구성하여 해당 수평평면이 xy 평면이 되도록 좌표축을 회전하는 방법이다(Wilczak et al., 2001). 따라서 좌표변환 자료로 2014년 10월 23일 관측이 시작된 시점부터 2015년 8월 31일까지의 기간에 대한 10 Hz 단위의 관측 자료를 이용하였다.

에디 공분산 방법은 10 Hz 이상의 고해상도 시간 분해능의 시계열 자료를 이용하여 난류 플럭스를 직접 측정하는 방법으로 본 연구에서는 현열속(sensible heat flux,  $Q_h$ )과 운동량속(momentum flux,  $\tau$ ) 그리고 난류운동에너지(turbulent kinetic energy; TKE)를 30분 단위로 아래와 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$Q_h = \rho c_p \overline{wT'} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (1)$$

$$\tau = \rho u_*^2 \quad [\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}] \quad (2)$$

$$\text{TKE} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-2}] \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 공기의 밀도이고  $c_p$ 는 공기에 대한 정압 비열이다.  $u_*$ 는 마찰속도(Friction velocity)로 다음 식에 의해 계산된다.

**Table 1.** Summary of duration of sunshine (DS), and daily mean synoptic and surface wind speeds (WS) of the selected events.

Synoptic condition	Surface properties	Date	DS (hr)	Synoptic WS ( $\text{m s}^{-1}$ )	Surface WS ( $\text{m s}^{-1}$ )
Weak	Grass field	2014.10.28	10.4	5.4	1.3
		2014.10.30	9.5	2.1	0.9
		2014.11.10	9.9	3.0	1.1
	Snow-covered field	2015.02.02	9.4	1.6	1.1
		2015.02.03	8.3	1.4	1.0
		2015.02.20	9.8	4.1	0.9
Strong	Grass field	2014.12.02	9.2	18.1	10.2
		2014.12.17	8.4	14.6	10.2
		2014.12.30	8.6	13.5	8.1

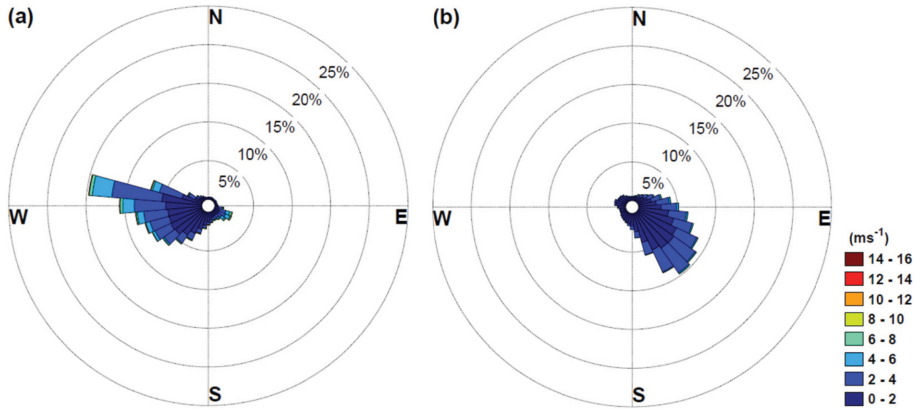


Fig. 2. The windroses of KMA AWS (a) at the start position (blue arrow in Fig. 1) and 3-D Sonic Anemometer (b) at the finish point (red arrow in Fig. 1) of Fig. 1 from Nov. 6, 2014 to Feb. 28, 2015.

$$u_* = [(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2]^{0.25} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

### 3. 결 과

#### 3.1 전반적인 바람장 특성

3차원 초음파 풍향·풍속계가 설치된 경기장 도착지점에는 기상청 AWS (automatic weather system)가 함께 설치되어 있고 시작지점에는 기상청 AWS만이 설치되어 있다. 우선 3차원 초음파 풍향·풍속계로 관측된 자료를 검증하고 전반적인 바람장 특성을 파악을 위해 2014년 11월 06일~2015년 2월 28일 기간에 대하여 도착지점에서 기상청 AWS와 3차원 초음파 풍향·풍속계를 비교 분석하였다. 기상청 AWS의 바람장미는 남남동풍 20%, 남동풍 19%, 동남동풍 15%로 남동풍 계열의 바람이 우세하게 나타났으며, 이와 유사하게 3차원 초음파 풍향·풍속계의 바람장미는 남동풍 21%, 동남동풍 17%, 남남동풍 15%로 남동풍 계열의 바람이 지배적으로 나타났다. 일차적인 비교분석 결과, 두 관측기를 통한 바람장이 유사하게 남동풍 계열의 바람이 우세한 것으로 나타났다. Figure 2는 알파인 경기장 시작지점 기상청 AWS와 도착지점 3차원 초음파 풍향·풍속계의 바람장미를 각각 나타낸 것이다. 알파인 경기장 시작지점은 서풍내지 북서풍 계열의 바람이, 도착지점은 남동풍 계열의 바람이 주풍향인 것을 알 수 있다. 도착지점의 남동풍 계열 바람은 경기장 경사면이 남동 방향에 정상을 두고 북서 방향을 향해 경사가 이루어져 있어 활강 경사풍에 해당한다. 유의할 점은 시작 지점의 고도가 1490 m로 거의 850 hPa 고도에 해당되고, 관측지점인 도착지점은 평지가 아니고 경사면의 중간지점에 위치하고 있다는 점이다. 결국 겨울철 종관풍이 전반적으로 북서풍임에도 불구하고 알파인 경기장의 경사면에서는 50~

60% 빈도의 남동풍 계열의 활강 경사풍이 주풍으로 나타나고 있다는 점은 흥미롭다. 이는 종관풍이 강한 북서풍조건에서도 남동쪽에서 북서 방향으로 경사면에 관측지점이 위치하고 있고 관측지점 바로 북쪽방향에 높은 언덕에 의한 저지효과로 인해 남동풍 계열의 활강 경사풍이 주로 나타나는 것으로 판단된다. 일부 종관풍 풍향과 계곡의 방향(alignment)에 따른 계곡풍의 영향도 있었을 것으로 생각되지만(Whiteman and Doran, 1993; Carrera et al., 2009), 기존 선행연구들과는 달리 분석 영역 주변의 계곡 방향이 일정하게 정렬되어 있지 않고 계곡의 너비가 넓지 않기 때문에 계곡 효과보다는 경사면을 따라 흐르는 경사효과가 보다 크게 작용하였을 것으로 추정된다. 참고로 캐나다 Champlain 호수 계곡은 길이가 190 km에 달한다(Carrera et al., 2009). 하지만 다른 계절을 포함하여 종관풍과 계곡의 방향에 따른 지상 바람장 변화에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 3.2 지표면 성질에 따른 분석

##### 3.2.1 바람의 일변화 분석

지표면 성질에 따른 바람의 일변화를 살펴보기 위하여 종관풍이 약한 초상과 설상 사례에 대해 3차원 초음파 풍향·풍속계로 관측된 1분 자료를 5분 평균하여 각 사례의 풍향과 풍속의 일변화를 Fig. 3에 제시하였다. 종관풍이 약한 모든 초상과 설상 사례에서 주간에 북서풍 계열의 활승 경사풍이, 야간에 남동풍 계열의 활강 경사풍이 나타나는 일변화가 관측되었다. 풍속의 경우 초상 사례에서는 활승 경사풍이 최대 2.3 m s<sup>-1</sup>, 활강 경사풍이 최대 1.6 m s<sup>-1</sup>로 나타났으며 설상 사례에서는 활승 경사풍이 최대 1.9 m s<sup>-1</sup>, 활강 경사풍이 최대 0.9 m s<sup>-1</sup>로 나타나, 초상과 설상 사례에서 모두 활승 경사풍이 활강 경사풍 보다 크게

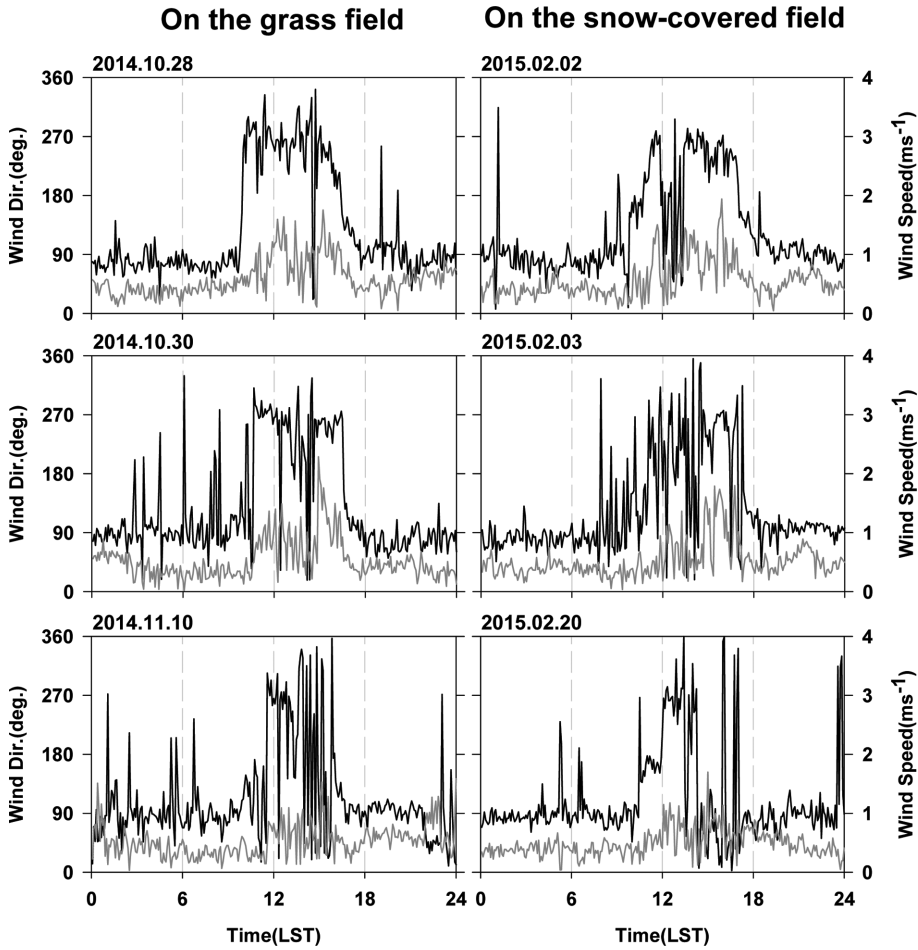


Fig. 3. Diurnal variations of wind direction and speed on the grass field (left) and the snow-covered field (right). Black lines indicate wind direction and gray lines indicate wind speed.

나타났으며, 변동성 역시 증가하는 것을 알 수 있었다. 경사풍은 일출과 일몰에 따라 풍향 전환이 하루 두 번 발생한다. 초상 사례의 경우 일출 후 활강 경사풍에서 활승 경사풍으로의 전환이 1000~1100 LST 사이 발생하는 반면, 설상 사례의 경우 1100~1200 LST 사이에 발생하여 설상에서의 풍향 전환이 초상보다 오랜 시간이 소요되었다. 이는 지표면이 초상일 경우 초상의 반사도(0.25)가 설상의 반사도(0.65~0.95)보다 작기 때문에 설상인 지표면보다 빠르게 가열됨으로써 열적으로 유도된 활승 경사풍으로의 전환이 초상 사례가 설상사례보다 빠르게 나타난 것으로 생각된다. 연직속도( $w$ )는 경사에 의한 바람의 강도와 방향간의 뚜렷한 운동학적 관계를 보여주는데(Monti et al., 2002), 앞선 풍향 · 풍속 일변화와 일관되게 주간에 양의 값으로의 편향이, 야간에 음의 값으로의 편향이 나타났으며 열적 강제력에 의해 능동적 바람 순환이 일어나

는 주간이 야간보다 큰 값과 큰 변동성을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 4).

### 3.2.2 난류 특성 분석

종관풍이 약한 초상과 설상 사례 중 대표사례를 선정하여 난류 특성을 Fig. 5에 제시하였다. 대표사례는 외부적인 강제력이 유사하다고 판단되는 일조시간과 일평균 풍속의 차이가 작은 조건을 기준으로 초상은 2014년 10월 30일, 설상은 2015년 2월 2일이 선정되었다. 현열속의 경우 초상 사례에서 모두 주간에 양의 값으로의 편향이 나타났으며, 야간에는 전반적으로 0 근처에서 음의 값들을 보였다. 주간에 현열속은 경사면의 방위각과 경사각, 경사방향에 따른 태양의 이동거리에 따라 변하며 지표면의 반사도 및 물리적 성질에 따라서도 변하는 반면, 야간에는 기본적으로 태양복사가 없지만 경사면에서 방출되는 장파복사와

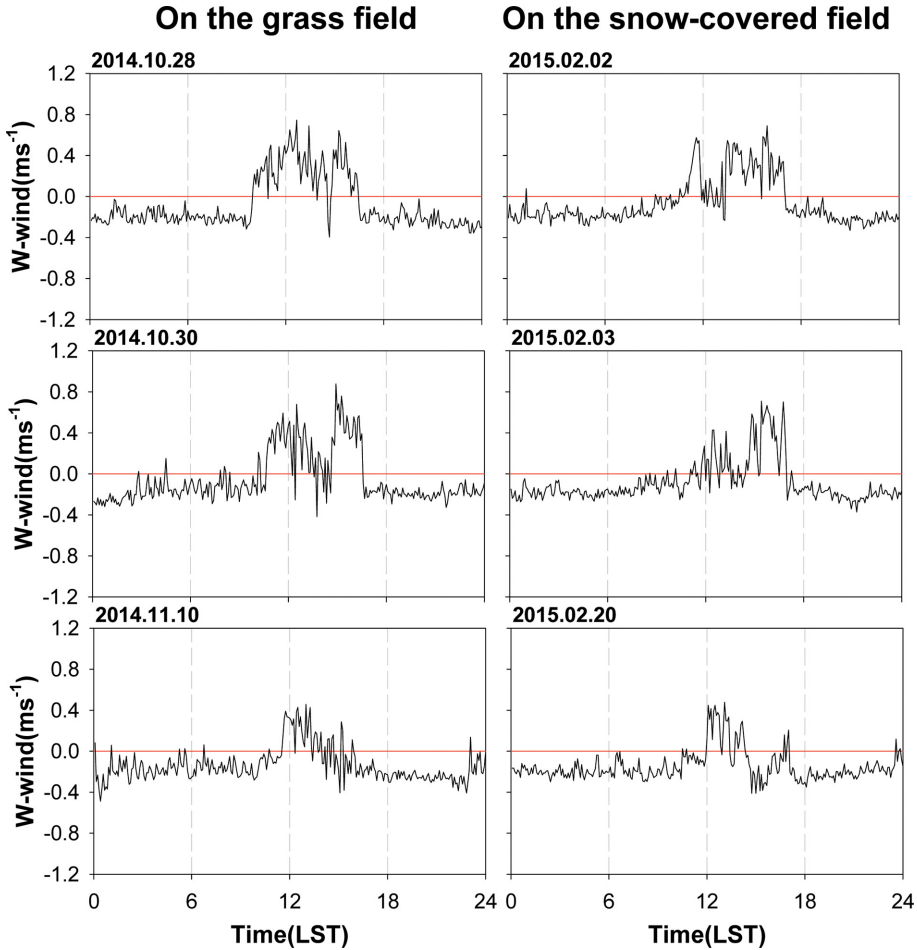
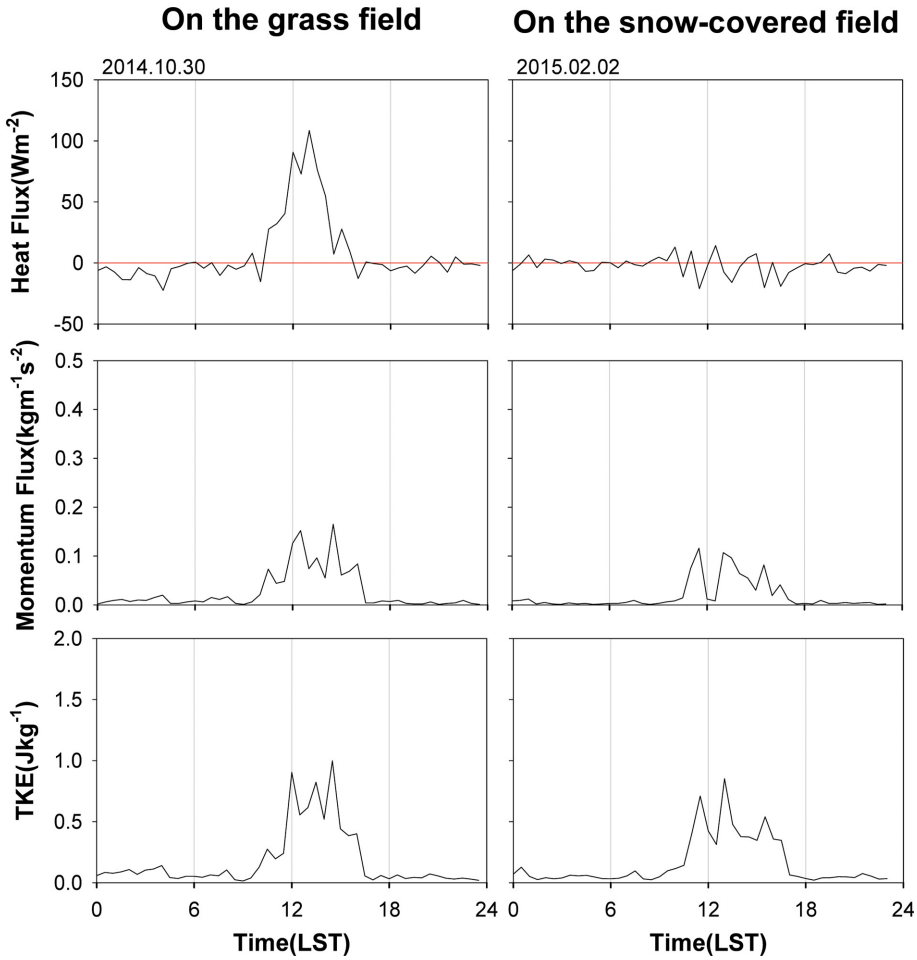


Fig. 4. Diurnal variations of w-wind components on the grass field (left) and the snow-covered field (right). Horizontal line indicates  $0 \text{ m s}^{-1}$ .

경사면의 낮은 고도에서 방출된 장파복사에 의해서도 현열속이 영향을 받을 수 있다(Oliver, 1992; Sun et al., 2003; Zoumakis et al., 2006). 난류 분석결과, 설상 사례에서는 눈의 높은 반사도로 인한 일사의 반사 효과와 부분적인 눈의 승화로 인한 잠열 손실 때문에 주간에도 전반적으로 현열속이 크게 증가하지 않는 경향을 보였다. 그리고 설상에서 현열속의 일변화가 뚜렷하지 않음에도 불구하고 주간의 활승 경사풍과 야간의 활강 경사풍이 잘 나타나고 있는 것은 주변 산지 경사면의 가열과 냉각에 기인한 것으로 추정된다(Figs. 3, 4). 초상과 설상의 대표 사례에서는 현열속의 최대값이 각각  $108.5 \text{ W m}^{-2}$ ,  $14.2 \text{ W m}^{-2}$ 로 설상 사례보다 초상 사례에서 약 7배 크게 나타났으며 대표 사례 외에도 모든 사례에서 현열속의 최대값이 설상보다 초상에서 4~10배 수준의 큰 값을 가지는 것

으로 나타났다.

운동량속은 일반적으로 풍속의 세기에 비례하고, 지표면의 물리적 성질에 따른 거칠기 길이의 영향도 받는데 거칠기 길이가 큰 지표면의 경우 거칠기 길이가 작은 지표면보다 큰 마찰속도를 갖게 되어 운동량속을 증가시키는 경향이 있다. 일차적으로 주간의 활승 경사풍이 활강 경사풍보다 강하게 나타나기 때문에 야간에 비해 주간에 운동량속이 현저하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 운동량속은 마찰속도( $u_*$ )의 제곱에 비례하여 지표면 거칠기 길이가 크고 풍속이 강할수록 증가하기 때문에 초상 사례가 설상 사례에 비해 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 초상과 설상의 전체 사례들의 평균값(최대값)은 각각  $0.08$  ( $0.17$ )  $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ,  $0.06$  ( $0.12$ )  $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 이었으며, 거칠기 길이 차이로 인해 초상 사례가 설상보다 전반적으로 크게 나타났다.



**Fig. 5.** Diurnal variations of sensible heat flux ( $Q_h$ ), momentum flux ( $\tau$ ), and turbulent kinetic energy (TKE) on the grass field (left) and the snow-covered field (right). Horizontal line indicates  $0 \text{ W m}^{-2}$ .

**Table 2.** Statistics of heat flux, momentum flux, and turbulent kinetic energy for daytime (1000~1600 LST) of the selected events.

Synoptic condition	Surface properties	Date	Heat flux ( $\text{W m}^{-2}$ )		Momentum flux ( $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ )		TKE ( $\text{J kg}^{-1}$ )	
			Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean
Weak	Grass field	2014.10.28	119.43	69.48	0.21	0.10	0.97	0.59
		2014.10.30	108.54	44.33	0.17	0.08	1.00	0.51
		2014.11.10	102.45	43.62	0.10	0.05	0.96	0.46
	Snow-covered field	2015.02.02	14.22	-2.69	0.12	0.06	0.85	0.42
		2015.02.03	11.48	0.91	0.16	0.05	0.96	0.38
		2015.02.20	25.75	0.21	0.11	0.04	0.73	0.34
Strong	Grass field	2014.12.02	34.68	11.50	0.74	0.37	5.96	4.45
		2014.12.17	18.18	-5.14	0.63	0.32	7.58	4.87
		2014.12.30	-8.02	-23.81	0.26	0.12	6.34	4.17

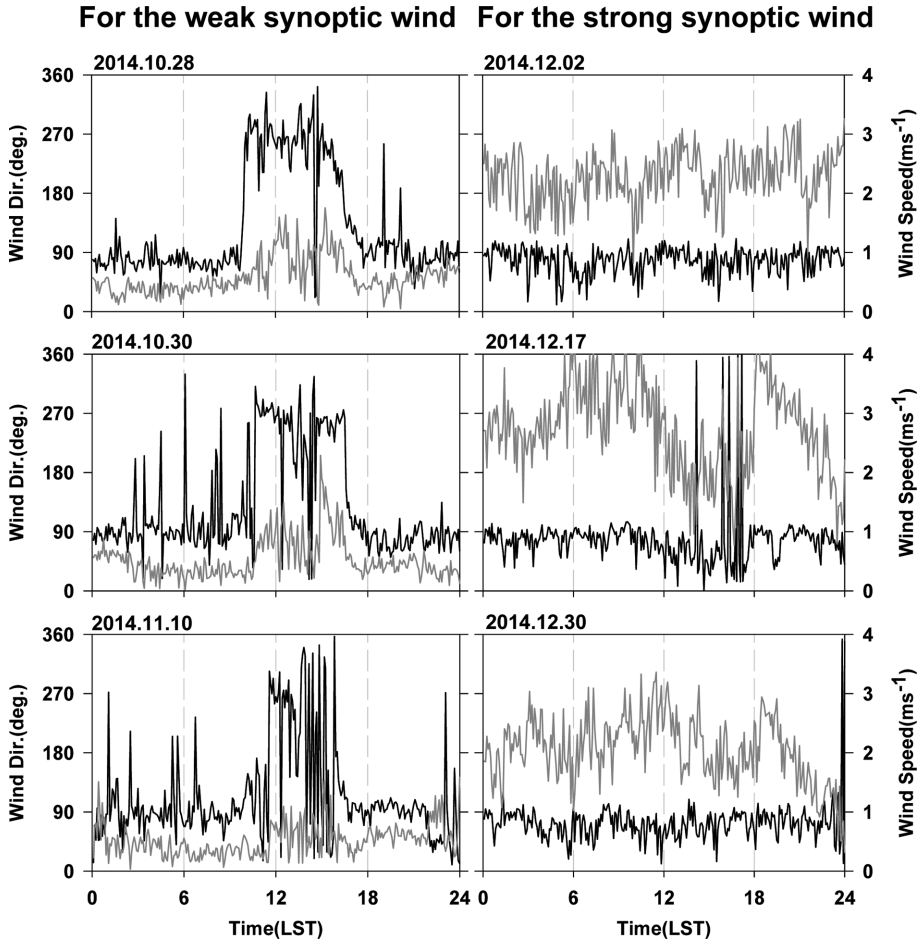


Fig. 6. Same as Fig. 3, except for the weak synoptic wind (left) and the strong synoptic wind (right).

난류운동에너지(TKE)는 주로 연직바람시어, 운동량속 그리고 현열속에 의해 생성되는데, 경사풍에 의해 생성되는 TKE는 하층 제트의 높이와 경사풍의 두께에 영향을 주며 궁극적으로 열과 운동량의 연직 혼합과 온도 균형에서 중요한 역할을 한다(Cuxart et al., 2011). 따라서 TKE의 일변화에서도 현열속과 운동량속 결과와 유사하게 주간에 증가하고 야간에 감소하는 경향이 잘 나타났으며 초상과 설상 사례 각각의 전체 평균이  $0.52 \text{ J kg}^{-1}$ ,  $0.38 \text{ J kg}^{-1}$ 으로 초상이 약 37% 정도 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 정량적인 난류 비교분석을 위하여 주간(1000~1600 LST)에 대한 현열속, 운동량속, 그리고 TKE의 최대값과 평균값을 계산하여 Table 2에 제시하였다.

3.3 종관풍 세기에 따른 분석

3.3.1 바람의 일변화 분석

산악지역의 바람은 일차적으로 종관장의 영향을 받

으며 종관장의 영향이 약할 때 잘 발달한다. 지표면이 초상인 조건에서 종관풍이 약한 사례와 강한 사례에 대한 풍향과 풍속의 일변화를 Fig. 6에 제시하였다. 종관풍이 약한 사례의 경우 앞 절에서 제시된 바와 같이 주간에 활승 경사풍이, 야간에 활강 경사풍이 나타나는 일변화가 관측된 반면에, 종관풍이 강한 사례에서는 주·야간 변화에 따른 경사풍의 일변화 없이 최대  $4.3 \text{ m s}^{-1}$ 의 강한 활강 경사풍(동풍 계열)만이 관측되었으며 풍속의 변동성 또한 크게 나타났다. 이는 주·야간 상관없이 산 정상에서 부는 서풍 계열의 강한 종관풍이 경사면을 따라 하강하여 강한 활강 경사풍을 생성한 것으로 생각되며, 이는 강한 종관풍의 영향이 지역풍(경사풍)의 발달을 억제하고 있음을 의미한다. 종관풍이 강한 사례의 경우 3.1절에서 제시한 바와 같이 동풍계열의 하강 경사풍이 일변화 없이 지속적으로 강하게 부는 것을 확인할 수 있는데, 이는 동풍내지 남동풍이 대체로 종관풍이 강한 겨



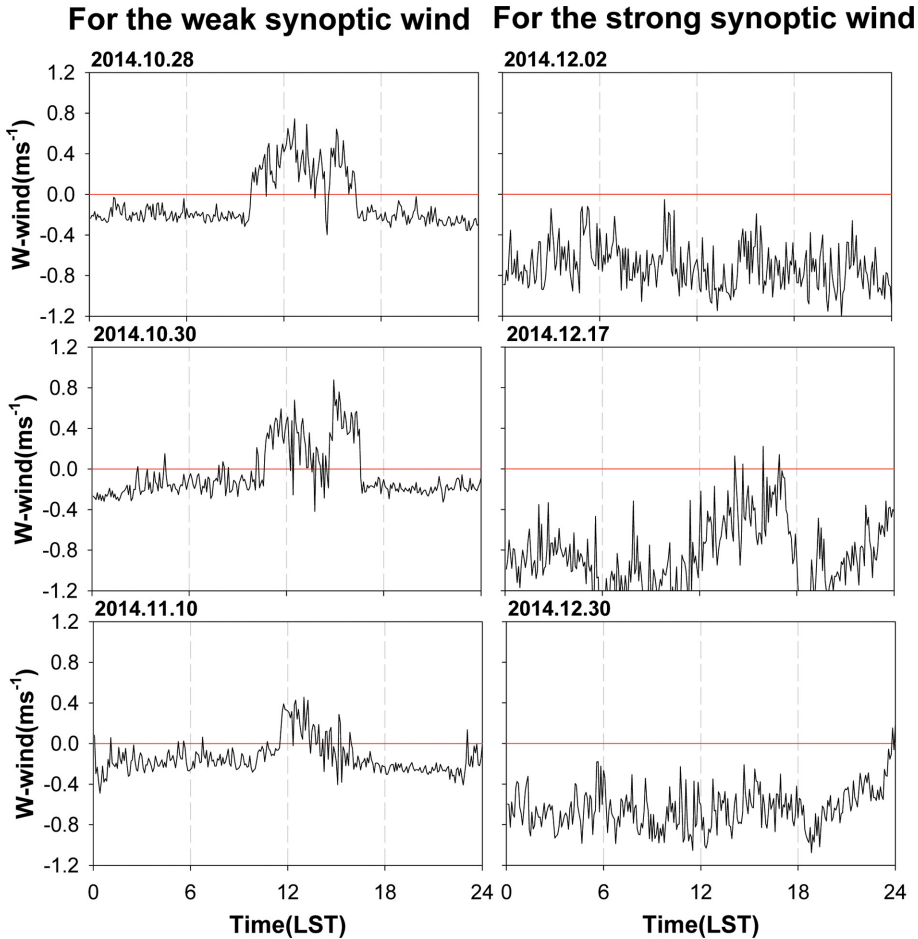


Fig. 7. Same as Fig. 4, except for the weak synoptic wind (left) and the strong synoptic wind (right).

울철 용평 알파인 스키장의 주풍향임을 의미한다. 연직속도( $w$ )의 일변화(Fig. 7) 또한 종관풍이 약한 사례의 경우 주간에 양의 값으로의 편향이, 야간에 음의 값으로의 편향이 나타나는 일변화가 나타난 반면에, 종관풍이 강한 사례의 경우 주·야간에 따른 일변화 없이 강한 음의 값으로의 편향(활강풍)이 지배적인 것으로 나타났다.

### 3.3.2 난류 특성 분석

종관풍이 약한 사례와 강한 사례 중 일조시간이 가장 유사한 사례를 대표 사례로 선정하여 난류 특성을 Fig. 8에 제시하였다. 종관풍이 약한 사례의 대표 사례는 2014년 10월 30일 사례이고 종관풍이 강한 사례의 대표 사례는 2014년 12월 2일 사례이다. 종관풍의 영향이 약한 경우에는 현열속의 일변화를 통해 주간에는 부력에 의한 난류 생성, 야간에는 부력에 의한 난류 소멸 메커니즘이 작용함으로써 풍속의 일변

화 역시 뚜렷하게 나타나는 것으로 생각된다. 결국 이는 바람 시어에 의한 난류생성에 영향을 미치지 때문에 난류변수들의 일변화 역시 현저하게 나타나는 원인이 된다. 하지만 종관풍의 영향이 강한 경우 지면 부근의 풍속과 현열속의 일변화 모두 약하게 나타나고, 활승 경사풍의 발달은 억제되며 강풍에 의해 역학적 난류가 증가하는 것으로 나타났다. 구체적으로 현열속을 살펴보면, 종관풍이 약한 사례와 강한 사례 모두 주간에 양의 값이 지배적인 것으로 나타났으며 대표 사례에서 주간 평균값(최대)이 각각  $44.3 (108.5) \text{ W m}^{-2}$ ,  $11.5 (34.7) \text{ W m}^{-2}$ 로 종관풍이 약한 사례가 강한 사례보다 약 4배 수준의 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 종관풍이 약한 사례의 경우는 늦가을인 반면 종관풍이 강한 사례의 경우는 12월 사례로 낮은 태양 고도각으로 인한 태양복사에너지 양의 감소와 강한 종관풍으로 인한 한기 하강풍으로 인해 현열속이 뚜렷하게 감소한 것으로 생각된다. 운동량속의 경

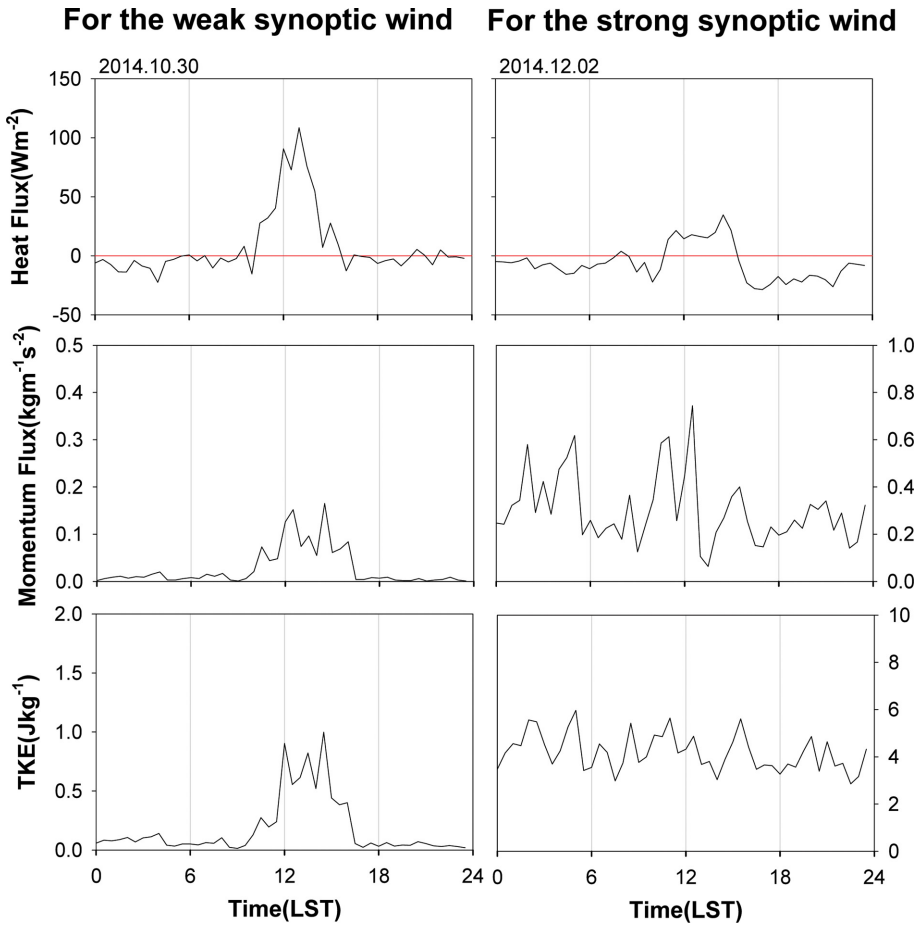


Fig. 8. Same as Fig. 5, except for the weak synoptic wind (left) and the strong synoptic wind (right).

우 종관풍이 약한 사례에서는 주간에 증가하고 야간에 감소하는 일변화가 잘 나타났으나, 종관풍이 강한 사례에서는 전체적으로 강한 풍속에 의해 운동량속의 증가와 함께(평균  $0.37 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ) 야간에도 강한 풍속이 지속되었기 때문에 종관풍이 약한 조건과는 달리 운동량속은 감소하지 않았다. TKE는 종관풍이 약한 사례의 경우 주간에 증가하고 야간에 감소하는 일변화가 관측되었으나 종관풍이 강한 사례의 경우 종관풍이 약한 사례보다 큰 변동성과 함께 9배 정도 증가한 값(사례 평균  $4.5 \text{ J kg}^{-1}$ )을 보였지만 주·야간에 따른 일변화는 역시 관측되지 않았다.

#### 4. 요약 및 결론

산악지역의 바람에 대한 기초적인 이해를 위하여 용평 알파인 경기장 도착지점에 3차원 초음파 풍향·풍속계를 설치하였으며, 2014년 10월 23일~2015년 2

월 28일 기간에 대한 관측자료를 이용하여 지표면 성질(초상, 설상)과 종관풍의 세기에 따라 산 경사면에서 발생하는 바람의 일변화와 에디 공분산 방법을 이용하여 난류 특성을 분석하였다. 종관풍이 약한 초상과 설상사례, 그리고 종관풍이 강한 초상사례를 각각 3사례씩 선별하여 총 9사례를 분석하였다.

겨울철 알파인경기장 경사면에서의 전반적인 풍향은 상층 종관풍이 북서풍 계열임에도 불구하고 50~60% 가량 남동풍계열의 활강 경사풍이 주풍향으로 나타났다. 종관풍이 약한 사례를 통한 지표면 성질에 따른 분석 결과, 모든 사례에서 주간에 활승 경사풍이 발생하고 야간에 활강 경사풍이 발생하는 일변화가 잘 나타났다. 난류 특성의 경우, 운동량속과 TKE는 초상과 설상 모든 사례에서 주간에 증가하고 야간에 감소하는 일변화가 나타났으나, 현열속은 초상 사례의 경우 주·야간에 따른 일변화가 나타난 반면, 설상 사례의 경우 주간에 일사에 대한 눈의 높은 반사도 효

과로 인해 주간에도 전반적으로 현열속이 크게 증가하지 않는 경향을 보였다. 지표면 성질에 따른 현열속과 운동량속의 차이는 모두 초상이 설상보다 크게 증가하였으며, TKE는 초상이 설상보다 약 37% 정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

한편 지표면이 초상인 조건에서 종관풍 세기에 따른 분석 결과, 종관풍이 약한 사례에서는 주간에 활승 경사풍이, 야간에 활강 경사풍이 발생하는 일변화와 난류 특성 분석에서 주간에 증가하고 야간에 감소하는 일변화가 잘 나타났다. 반면에, 종관풍이 강한 사례에서는 주 · 야간 시간변화에 따른 경사풍의 일변화 없이 강한 동풍 내지 남동풍 계열의 활강 경사풍만 발생하였으며, 운동량속과 TKE 분석 결과에서도 주 · 야간 변화에 따른 일변화 없이 자체 값과 변동성 모두 크게 나타났는데, 이는 강한 종관장의 영향으로 경사풍 발달을 억제하는 것을 의미한다. 종관풍이 강한 사례들의 TKE는 약한 사례에 비해 약 9배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구의 분석지점인 용평 알파인 경기장은 2018 평창 동계올림픽 경기 중 알파인 경기가 이루어지는 장소로 원만한 동계올림픽 경기 운영과 선수의 안전 보호를 위하여 기상특성 파악이 우선적으로 필요한 곳으로써, 본 연구 결과는 용평 알파인 경기장과 같은 복잡한 지형 조건을 갖는 산악지역의 바람 순환에 대한 기초적인 정보로 활용 가능할 것이다. 하지만 향후 현열속의 일변화에 영향을 주는 태양 고도각 변화에 따른 경사면 바람장 변화, 그리고 주변 계곡의 방향과 종관풍 방향에 따른 용평부근 바람장 특성 등에 대한 추가 연구 등이 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 재해기상연구센터 ‘강원 영동지역 겨울철 재해기상 분석 · 예측기법 개발’ 용역 사업의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 제 1저자는 강릉원주대학교 전일제대학원생 장학금을 지원받았습니다.

## REFERENCES

- Carrera, M. L., J. R. Gyakum, and C. A. Lin, 2009: Observation study of wind channeling within the St. Lawrence River Valley. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **48**, 2341-2361.
- Cuxart, J., and M. A. Jiménez, 2011: Deep radiation fog in a wide closed valley: Study by numerical modeling and remote sensing. *Pure. Appl. Geophys.*, **169**, 911-926, doi:10.1007/s00024-011-0365-4.
- \_\_\_\_\_, J. Cunillera, M. A. Jiménez, D. Martínez, F. Molinos, and J. L. Palau, 2011: Study of mesobeta basin flows by remote sensing. *Bound.-Layer Meteor.*, **143**, 143-158, doi:10.1007/s10546-0119655-8.
- Eun, S. H., S. H. Chae, B. G. Kim, and K. H. Chang, 2011: Effect of urbanization on the light precipitation in the mid-Korean peninsula. *Atmosphere*, **21**, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Gustavsson, T., M. Karlsson, J. Bogren, and S. Lindqvist, 1998: Development of temperature patterns during clear nights. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 559-571.
- Haiden, T., and C. D. Whiteman, 2005: Katabatic flow mechanisms on a low-angle slope. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 113-126.
- Han, S.-H., and J.-G. Lee, 2007: A numerical simulation study on the sensitivity of WRF model in the wind field to the steepness of mountain slope. *Atmos. Korean Met. Soc.*, **17**, 349-364.
- Horst, T. W., and J. C. Doran, 1986: Nocturnal drainage flow on simple slopes. *Bound.-Layer Meteor.*, **34**, 263-286.
- Kim, B.-G., and Coauthors, 2014: *An analysis of heavy snowfalls and cold wave and development of its forecast method in Yeongdong*. National Institute of Meteorological Science, 35-43.
- Lee, X., W. Massman, and B. Law, Eds., 2004: *Handbook of micrometeorology: A Guide for surface Flux Measurement and Analysis*. Kluwer Academic Publishers, 250 pp.
- Lindqvist, L., and S. Lindqvist, 1997: Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain. *Agric. Forest Meteor.*, **87**, 139-153.
- \_\_\_\_\_, T. Gustavsson, and J. Bogren, 2000: A frost assessment method for mountainous areas. *Agric. Forest Meteor.*, **102**, 51-67.
- Mahrt, L., 2006: Variation of surface air temperature in complex terrain. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1481-1493.
- Monti, P., H. J. S. Fernando, M. Princevas, W. C. Chan, T. A. Kowalewski, and E. R. Pardyjak, 2002: Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 2513-2534.
- Oliver, H. R., 1992: Studies of the energy budget of sloping terrain. *Int. J. Climatol.*, **12**, 55-68.
- Papadopoulos, K. H., C. G. Helmis, A. T. Soilemes, J. Kalogiros, P. G. Papageorgas, and D. N. Asimakopoulos, 1997: The structure of katabatic flows down a simple slope. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 1581-

- 1601.
- Sun, J., S. P. Burns, A. C. Delany, S. P. Oncley, T. W. Horst, and D. H. Lenschow, 2003: Heat balance in the nocturnal boundary layer during CASES-99. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1649-1666.
- Wilczak, J. M., S. P. Oncley, and S. A. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Bound.-Layer Meteor.*, **99**, 127-150.
- Whiteman, C. D., 2000: *Mountain Meteorology: Fundamentals and applications*. Oxford University Press, 376 pp.
- \_\_\_\_\_, and J. C. Doran, 1993: The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 1669-1682.
- \_\_\_\_\_, and S. Zhong, 2008: Downslope flows on a low-angle slope and their interactions with valley inversions. I. Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 2023-2038.
- Zoumakis, N. M., G. A. Efstathiou, A. G. Kelessis, J. Triandafyllis, D. Papas, M. Chasapis, M. Petrakakis, and P. Karavelis, 2006: A simple scheme for daytime estimates of surface energy budget in complex terrain. *Fresen. Environ. Bull.*, **15**, 923-927.