

경사가 있는 지형의 거칠기 아층에서 풍향시어와 운동량 플럭스의 특성

이영희*

경북대학교 천문대기과학과

(접수일: 2015년 3월 13일, 수정일: 2015년 9월 18일, 게재확정일: 2015년 10월 5일)

Characteristics of Wind Direction Shear and Momentum Fluxes within Roughness Sublayer over Sloping Terrain

Young-Hee Lee*

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 13 March 2015; revised 18 September 2015; accepted 5 October 2015)

Abstract We have analyzed wind and eddy covariance data collected within roughness sublayer over sloping terrain. The study site is located on non-flat terrain with slopes in both south-north and east-west directions. The surface elevation change is smaller than the height of roughness element such as building and tree. This study examines the directional wind shear for data collected at three levels in the lowest 10 m in the roughness sublayer. The wind direction shear is caused by drag of roughness element and terrain-induced motions at this site. Small directional shear occurs when wind speed at 10 m is strong and wind direction at 10 m is southerly which is the same direction as upslope flow near surface at this site during daytime. Correlation between vertical shear of lateral momentum and lateral momentum flux is smaller over steeply sloped surface compared to mildly sloped surface and lateral momentum flux is not down-gradient over steeply sloped surface. Quadrant analysis shows that the relative contribution of four quadrants to momentum flux depends on both surface slope and wind direction shear.

Key words: Eddy covariance data, lateral momentum flux, non-flat terrain, wind direction shear

1. 서 론

거칠기 아층이란 개별 지표면 거칠기 성분이 흐름에 직접적으로 영향을 미쳐 흐름이 수평적으로 비균질한 층으로 층의 연직범위는 지표면부터 거칠기 성분크기의 약 3배 고도까지 해당한다(e.g., Kaimal and Finnigan, 1994; Mahrt, 2000). 거칠기 아층에서의 평균 바람과 난류는 지표면과 대기간의 열과 운동량의 교환과정뿐만 아니라 오염물질의 확산과 수송 등에

중요한 역할을 하므로 이들에 대한 연구는 관측과 모델링을 통하여 수십 년간 꾸준히 이루어져 왔다(e.g., Gao et al., 1989; Leclerc et al., 1991; Raupach et al., 1996; Katul and Albertson, 1998; Pyles et al., 2004). 식생 밀도가 높은 자연 캐노피에서 난류 관측을 통한 많은 연구들이 수행되어 왔고 잘 알려진 연구결과는 캐노피 꼭대기에서 나타나는 시어불안정에 의해 캐노피 규모의 sweep 운동이 캐노피 내부의 열과 운동량 수송에서 중요한 역할을 한다는 점이다(Raupach et al., 1996). 최근에는 다양한 캐노피에서 관측연구들이 수행되고 있는데 도시 캐노피에서의 난류 관측(e.g., Christen et al., 2007)이나 식생밀도가 낮은 개방형 캐노피에서의 난류 관측(Su et al., 2008; Lee, 2009) 등이 있다. 기존의 거칠기 아층에 관한 연구들은 주로

*Corresponding Author: Young-Hee Lee, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu 41566, Korea.
Phone : +82-53-950-7353, Fax : +82-53-950-6359
E-mail : young@knu.ac.kr

평평한 지표면 상에서 자연 캐노피나 도시 캐노피에서의 평균 흐름과 난류를 다루어 왔다. 그러나 복잡한 지형에서 지면 경사가 거칠기 아층의 평균 흐름과 난류에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 적게 이루어졌다(e.g., Lee, 2012).

Finnigan and Belcher (2004)는 언덕(hill)을 넘어가는 평균 흐름의 변화와 그 흐름의 변화가 캐노피 난류에 미치는 영향을 분석하였는데 실제 지표면에는 산이나 언덕뿐만 아니라 캐노피의 연직규모보다 작은 규모의 지면 고도의 변화들이 존재하고 이러한 지형들은 거칠기 아층의 흐름에 영향을 미친다. Lee (2012)는 지면 고도의 변화가 캐노피의 연직규모보다 작지만 평평하지는 않은 지형에서 개방형 캐노피 난류의 특성을 분석하였다. 이들은 풍향에 따른 난류와 바람 자료의 분석을 통해 지면경사의 변화가 지표면 부근의 풍향시어와 난류에 영향을 미치고 있음을 보고하였다. 그러나 이들은 두 고도에서의 바람 자료만을 분석하였고 관측기간이 9개월이어서 상대적으로 적은 수의 자료가 분석에 사용되었다.

캐노피가 존재하거나 지면 경사가 있는 경우 지면 부근에 풍향 시어가 나타난다(Pyles et al., 2004; Mahrt et al., 2014). 그러나 풍향시어에 관한 특성 연구는 상대적으로 적게 이루어졌다. Bowen et al. (2000)은 복잡한 지형에서 야간에 풍향시어의 통계특성을 분석하고 모델모의를 통하여 풍향시어를 고려하지 않을 경우 고농도 오염물질의 농도가 나타나는 지점을 잘못 예측할 수 있다고 보고하였다. Mahrt et al. (2014)은 야간에 복잡한 지형에서 나타나는 경사류의 발달과 일시적인 운동(transient motion)과 관련된 풍향시어의 통계적인 특성을 풍속과 안정도의 함수로 분석하였다.

본 연구에서는 경사가 있는 거칠기 아층에서 2년간 관측된 세 고도의 바람과 한 고도의 난류자료를 이용하여 연직 풍향 시어의 특징을 분석하고 이들이 운동량의 연직 수송에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 자료

본 연구의 관측지는 경북대학교 대구 캠퍼스 내의 관측 노장이다(35° 53' N, 128° 36' E). 관측지 북쪽으로 약 40 m 떨어진 곳에 약 16 m 높이의 제 2 과학관 건물이 위치해 있고 건물과 노장 사이에는 주차장이 있다. 남쪽에는 운동장이 있고 운동장은 노장보다 약 7 m 정도 낮은 고도에 위치해 있다. 운동장과 노장 사이에는 활엽수들로 구성된 가로수들이 있고 동쪽에는 침엽수로 구성된 가로수들이 줄지어 있다. 활엽수들은 2 m부터 10 m 높이를 갖고 낮은 밀도로 존재한다. 노장의 서쪽에는 약 3.5 m 높이의 언덕이 위

치해 있고 동쪽에는 작은 1층 건물이 있다. Figure 1은 관측지 주변의 지형도, 관측지의 위성 사진, 그리고 관측지의 동서와 남북 지형단면도의 모식도를 제시한 것이다. 자세한 관측지에 대한 정보는 Lee (2012)에 기술되어 있다.

3차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Inc., USA)는 5 m 고도에 설치되어 있으며 바람성분과 온도를 10 Hz로 관측하였고 10 m와 2.5 m 고도에 2차원 초음파 풍속계(Windsonic, Gill)를 설치하여 평균 바람을 관측하였다. 평균 바람과 난류 통계값은 30분 단위로 계산하였다.

난류 자료의 품질 관리를 위해서 각 변수의 최댓값과 최솟값 검사, 스파이크 제거를 수행한 후 Planar fit 회전(Wilczak et al., 2001)을 수행하였다. 이 좌표축은 장기간 얻어진 자료로부터 얻어진 평균 유선면을 수평면으로 하고 그 유선면에 수직인 방향을 연직축으로 사용한다. 낮은 풍속에서는 흐름 왜곡(flow distortion)이 있을 수 있으므로 풍속이 0.5 m s^{-1} 이상인 자료들을 평균 유선면의 경사각도를 계산하는데 사용하였고, 각 방향별 지형경사가 현저히 변화하므로 풍향을 8 방향으로 나누어 각 풍향에 대하여 유선면의 경사각도를 계산하였다. 유선면의 경사각도의 계산에는 난류 관측이 이루어진 2011년부터 2014년까지 4년간 자료를 사용하였고 풍향시어와 운동량 플럭스의 분석에는 세 고도의 바람 관측이 이루어진 2013년부터 2014년까지 2년간의 자료를 사용하였다.

2.2 사분원 분석

사분원 분석은 변수의 순간 연직 플럭스인 $w'c'$ 을 w' 의 부호와 c' 의 부호에 따라서 4가지 성분인 sweep, ejection, inward interaction, outward interaction으로 분류하는 방법이다(Raupach, 1981). Table 1은 운동량 플럭스에 대하여 4 성분에 대한 설명을 제시한 것이다. 평균 플럭스 값으로 정규화된 각 사분원의 플럭스 기여도 $S(i)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S(i) = \frac{\overline{w'c'_i}}{\overline{w'c'}} \quad (1)$$

$$\overline{w'c'_i} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} w'c' I_i(t) dt \quad (2)$$

여기서 $c = u, v$ 이며, t_p 는 평균에 사용되는 시간규모로 본 분석에서는 30분을 사용하였다. I_i 의 값은 순간 플럭스가 해당 사분원에 속할 때만 1의 값을 갖고 나머지 경우에는 0의 값을 갖는다. 아래 첨자 i 는 사분원의 4성분을 나타낸다.

각 사분원에서 나타나는 플럭스의 상대적인 크기를 비교하기 위하여 다음과 같이 F 를 정의하였다(Dupont and Patton, 2012).

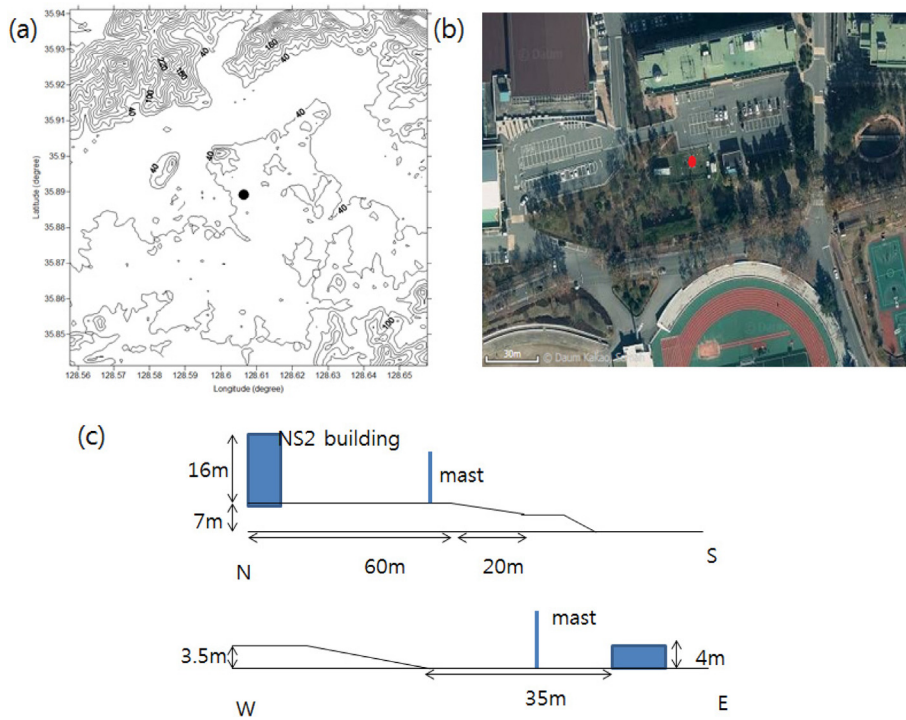


Fig. 1. (a) Topographic map of surrounding area, (b) satellite photo of study site (<http://map.daum.net>) and (c) schematics of topography along N-S direction (upper) and W-E direction (lower). Black dot in the center in (a) indicates location of site and red dot in the center in (b) indicates location of tower.

Table 1. Description of quadrants for momentum fluxes. Here ϕ represents horizontal velocity components, u or v .

Quadrant	Turbulent flux		Description
	$r_{\phi w} > 0$	$r_{\phi w} < 0$	
Q ₁	$\phi' < 0, w' > 0$	$\phi' > 0, w' > 0$	Outward interaction
Q ₂	$\phi' < 0, w' < 0$	$\phi' > 0, w' < 0$	Sweep
Q ₃	$\phi' > 0, w' > 0$	$\phi' < 0, w' > 0$	Ejection
Q ₄	$\phi' > 0, w' < 0$	$\phi' < 0, w' < 0$	Inward interaction

$$F_i = |S(i)| / \sum_{i=1}^4 |S(i)| \quad (3)$$

3. 결 과

3.1 풍향시어의 특징

Figure 2는 세 고도에서 관측된 30분 평균 바람을 주간과 야간에 대하여 바람 장미로 제시한 것이다. 여기서 주간은 0600 LST부터 1800 LST까지로 정의하였고 야간은 나머지 시간으로 정의하였다. 10 m 고도에서 우세한 바람은 주간과 야간 모두 북서풍과 남동풍이고 주간에 남서풍의 빈도가 증가하고 야간에 북

동풍의 빈도가 증가한다. 야간에 발생하는 북동풍의 풍속은 매우 낮다. 5 m 고도에서는 동풍과 서풍이 주풍을 이루고 있고 주간에 남서풍의 발생빈도가 현저히 증가한다. 북풍계열의 바람의 빈도가 현저히 낮는데 이는 북쪽에 위치해 있는 건물이 북풍계열의 바람을 막는데 기인한다. 2.5 m 고도에서의 바람은 남서풍과 북동풍의 빈도가 높게 나타나고 특히 주간에는 남풍이 가장 높은 발생 빈도를 보인다. 이러한 특징을 보이는 것은 본 관측지가 남북 방향의 경사를 갖고 있어 주간에 경사를 따라 올라가는(upslope) 흐름이 발생하는 것에 기인한다(Stull, 1988).

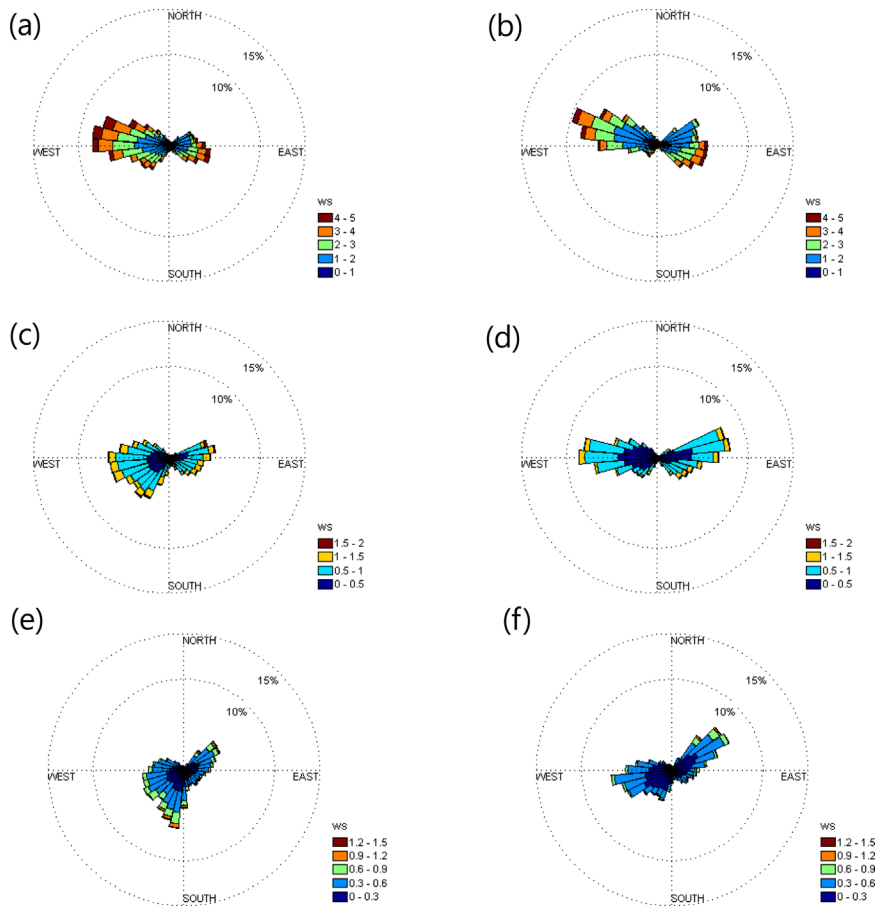


Fig. 2. Wind rose at (a) 10 m, (c) 5 m, (e) 2.5 m during daytime and (b) 10 m, (d) 5 m, (f) 2.5 m during nighttime.

세 고도의 바람장미는 본 관측지에 고도에 따른 풍향시어가 현저함을 나타낸다. 풍향시어의 특징을 좀더 분석하기 위해서 10 m의 풍향을 기준으로 동풍계열($0^\circ < \text{풍향} < 180^\circ$)과 서풍계열($180^\circ < \text{풍향} < 360^\circ$)로 나누어 두 고도의 풍향 차이의 히스토그램을 주간과 야간에 대하여 Figs. 3과 4에 각각 제시하였다. 서풍계열과 동풍계열의 풍향차이의 분포는 현저한 차이를 보인다. 주간과 야간을 비교하면 동풍계열의 경우 분포의 차이는 적고 서풍계열의 경우 야간에 최빈수(mode)에서의 빈도가 현저히 감소하는 특징을 보인다. 서풍계열의 경우 5 m와 2.5 m 고도 모두에서 음의 방향 시어가 대부분을 차지하고 있고 5 m보다 2.5 m 고도에서 음의 값의 크기가 더 증가하므로 고도가 낮아질수록 평균 수평 흐름은 반시계 방향으로 회전함을 나타낸다. 거칠기 이층에서 평균 수평 바람이 캐노피층으로 들어갈수록 반 시계방향으로 회전하는 것은 선행 연구결과와 일치한다(e.g., Pyles et al., 2004; Su

et al., 2008). 이는 캐노피 내부로 갈수록 마찰력이 증가하면서 나타나는 현상이다. 또한 주간에 지면 부근에서 발달하는 경사를 따라 상승하는 흐름은 10 m 고도의 바람에 상대적으로 지면 부근에 남서풍이나 남풍 계열의 바람을 유발한다. 그러므로 경사를 따라 상승하는 흐름 또한 거칠기 이층으로 들어갈수록 반 시계방향으로 회전하는 흐름을 초래한다. 주간에 마찰항력과 경사류가 같은 방향의 풍향시어를 유발하므로 최빈수(mode)에서 발생빈도가 높게 나타난다. 한편, 야간에는 10 m 고도에서 북서풍의 빈도가 증가하는 반면 5 m와 2.5 m에서 경사류의 발달은 뚜렷하지 않아 여전히 지면으로 갈수록 반 시계방향 회전의 특성을 보인다. 5 m와 2.5 m에서 경사류의 발달이 뚜렷하지 않은 것은 타워의 북서쪽에 약 3.5 m 높이의 언덕이 위치해 있고 북쪽에 16 m 높이의 건물이 있어 북서풍과 북풍 계열의 바람을 막아주고 있기 때문이다. 반면 10 m 고도에서의 북서풍은 더 큰 수평규모 상

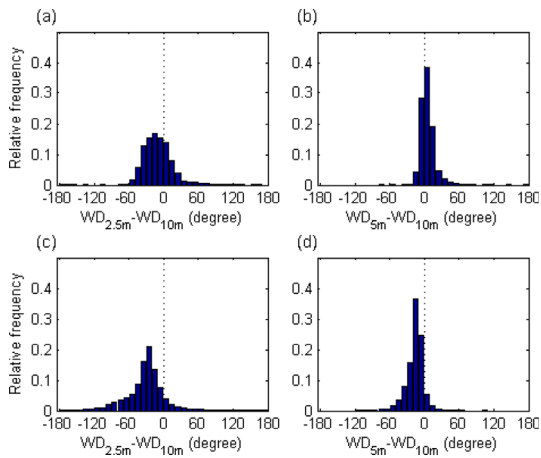


Fig. 3. Histogram of wind direction difference between (a) 2.5 m and 10 m, (b) 5 m and 10 m for winds with wind direction less than 180° at 10 m, (c) 2.5 m and 10 m, (d) 5 m and 10 m for winds with wind direction more than 180° at 10 m during daytime.

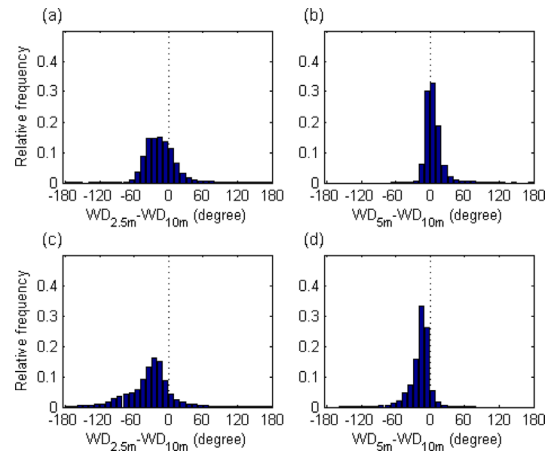


Fig. 4. Histogram of wind direction difference between (a) 2.5 m and 10 m, (b) 5 m and 10 m for winds with wind direction less than 180° at 10 m, (c) 2.5 m and 10 m, (d) 5 m and 10 m for winds with wind direction more than 180° at 10 m during nighttime.

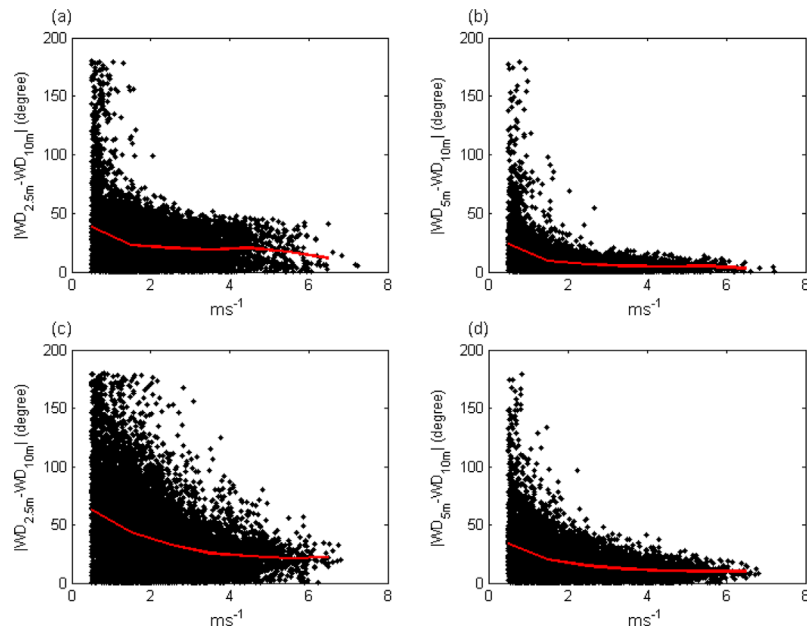


Fig. 5. Scatterplot between wind speed at 10 m and magnitude of wind direction difference between (a) 2.5 m and 10 m (b) 5 m and 10 m for winds with wind direction less than 180° at 10 m, (c) 2.5 m and 10 m, (d) 5 m and 10 m for winds with wind direction more than 180° at 10 m. The solid red lines represent interval averages.

에서 경사를 따라 하강하는 흐름과 관련이 있을 수 있다.

동풍계열의 바람이 부는 경우 5 m와 10 m 고도의 풍향차이는 크지 않고 양의 값이 상대적으로 더 많이

나타나는 반면 2.5 m와 10 m 고도의 풍향차이는 음의 값이 더 높은 빈도를 보인다. 5 m와 10 m 고도간의 풍향차이가 작은 것은 서풍과 달리 동쪽에는 언덕과 같은 큰 장애물이 없기 때문이다. 5 m와 10 m 고도의

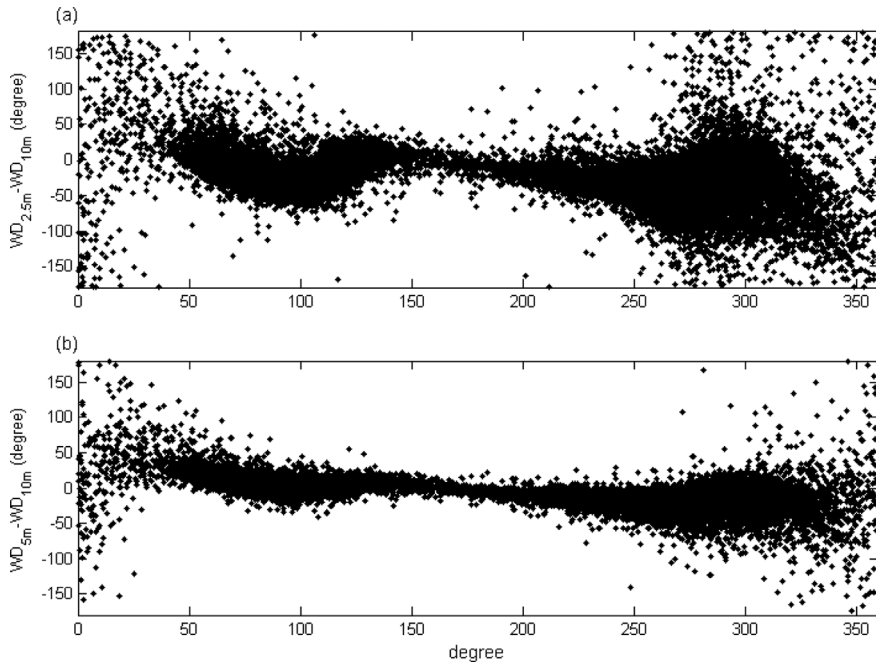


Fig. 6. Scatterplot between wind direction at 10 m and wind direction difference between (a) 2.5 m and 10 m, (b) 5 m and 10 m.

양의 풍향차이는 주간 경우 upslope 흐름이 지면 부근에서 더 강하게 발달하고 야간의 경우 10 m 고도에서는 북동풍이 나타나는데 5 m 고도에서는 북동풍 계열의 바람이 북쪽에 위치한 건물로 인해 막아지는데 기인한다. 반면 2.5 m와 10 m 고도의 음의 풍향차이는 동쪽에 위치하고 있는 1층 건물과 주변의 나무들의 영향을 반영한다.

연직 풍향시어에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위하여 동풍계열과 서풍계열로 나누어서 두 고도의 풍향차이의 절대값과 10 m 고도의 풍속의 관계를 분산도로 제시하였다(Fig. 5). 동풍계열의 경우 100° 이상의 큰 풍향시어가 나타나는 경우는 대부분 풍속이 1 m s^{-1} 보다 작은 경우이다. 풍속이 증가함에 따라 풍향시어가 감소하다가 풍속이 2 m s^{-1} 이상에서는 풍향시어와 풍속의 관계가 뚜렷하지 않다. 서풍계열의 경우 풍속이 작을 때 평균 풍향시어가 훨씬 크게 나타나고 풍속이 증가함에 따라 풍향시어가 지속적으로 감소하는 특징을 보인다. 이 결과는 바람시어에서 풍향시어가 차지하는 비율이 풍속이 클수록 감소한다고 보고한 Mahrt et al. (2014)의 결과와 일관된다. Figure 6은 10 m 고도의 풍향과 두 고도의 풍향차이를 분산도로 제시한 것이다. 풍향시어는 북풍계열의 바람이 불 때 현저히 증가하고 남풍계열의 바람이 불 때 감소하는 특징을 보인다. 큰 양의 풍향시어가 나타나는

경우는 10 m 고도에서는 북풍계열의 바람이 불고 있으나 지면 부근에서는 경사를 따라 상승하는 남풍계열의 바람이 발달하는 경우이다. 그러나 동풍계열의 바람에서 2.5 m 고도와 10 m 고도의 풍향차이가 양의 값을 갖는 경우의 발생빈도는 높지 않다(Figs. 3, 4). 대부분의 자료가 위치한 음의 풍향차이를 갖는 경우는 10 m 고도에서 동풍이 부는 경우로 관측지의 동쪽에 위치한 1층 건물의 영향을 반영한다. 반면 10 m 고도의 풍향이 남풍일 때 큰 풍향시어가 나타나지 않는데 이는 큰 수평규모의 흐름과 관측지의 작은 수평규모의 경사류의 방향이 일치하는 데 기인한다. 또한 주간 활발한 열적 혼합도 서로 다른 방향의 경사류의 풍향시어를 줄이는 데 기여했을 것으로 사료된다.

3.2 풍향시어와 지면 경사가 운동량의 연직 수송에 미치는 영향

지면 부근의 유선면은 지면경사에 의존하는데 노장의 동쪽과 서쪽은 지면경사에 있어서 현저한 차이를 보이므로 동풍과 서풍의 유선면 또한 다르게 나타난다. 지면 경사가 운동량의 연직 수송에 미치는 영향을 분석하기 위해서 유선면(streamline plane)의 경사가 다른 동풍과 서풍을 나누어 분석을 수행하였다. 그러므로 난류 관측이 이루어진 5 m 고도의 풍향을 기준으로 풍향이 67.5° 부터 112.5° 까지를 동풍으로 분류

Table 2. Regression coefficients of regression function $\bar{w} = b_0 + b_1\bar{u} + b_2\bar{v}$ for streamline plane, where $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ are components of the (30-min) mean velocity in the instrument coordinate system.

Wind	Wind direction (degree)	<i>N</i>	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂
Easterly	67.5~112.5	10728	-0.01425	-0.02623	0.16673
Westerly	247.5~292.5	11259	-0.03551	-0.17288	0.38896

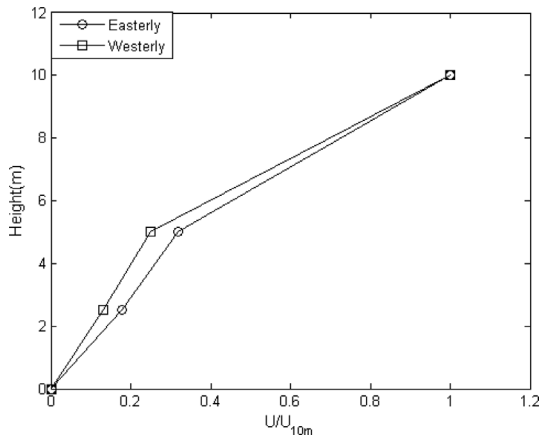


Fig. 7. Comparison of mean wind profile in near-neutral conditions between easterly and westerly.

하고 풍향이 247.5°부터 292.5°까지를 서풍으로 분류하였다. 안정도에 따른 차이를 배제하기 위하여 5 m 고도에서 계산된 국지 안정도 z/Λ 가 -0.1에서 0.1 사이의 값을 갖는 경우만을 분석에 사용하였다. 여기서 Λ 는 국지 오브코프 길이이고 z 는 지면으로부터의 거리이다. Table 2는 4년간의 자료를 사용하여 얻어진 동풍과 서풍의 유선면에 대한 회귀상수 값을 제시한 것이다. 서풍이 부는 경우 유선면은 동쪽과 남쪽을 향하는 경사를 가지고 있는 반면 동풍이 부는 경우 유선면은 남쪽을 향하는 경사만을 갖고 있다. 또한 유선면의 남쪽방향의 경사각은 서풍의 경우가 동풍의 경우보다 훨씬 크다. 먼저 두 풍향대의 풍속의 연직구조를 Fig. 7에 제시하였다. 관측은 노장인 초지에서 이루어졌지만 동풍과 서풍의 경우 모두 캐노피 내부에서 나타나는 바람 구조를 보인다. 이는 타워 주변의 거칠기 성분들이 풍속의 연직구조에 영향을 미치

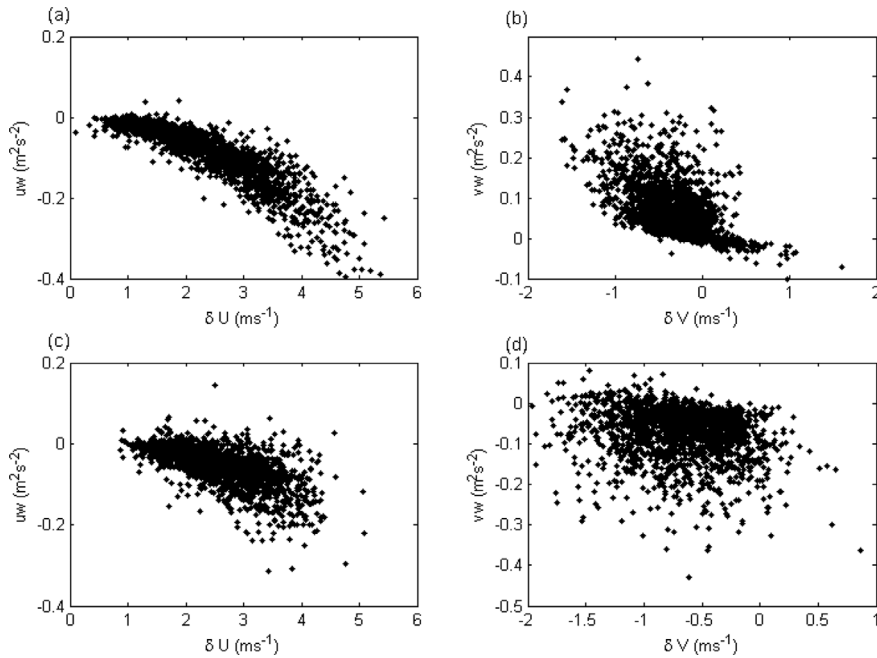


Fig. 8. Scatterplot between longitudinal wind difference between 2.5 m and 10 m and longitudinal momentum flux at 5 m (a) easterly (c) westerly and scatterplot between lateral wind difference between 2.5 m and 10 m and lateral momentum flux at 5 m (b) easterly (d) westerly near neutral conditions.

고 있음을 시사한다. 또한 동풍과 서풍의 경우를 비교하면 서풍의 경우 캐노피 꼭대기의 바람 시어가 조금 더 크게 나타나지만 두 경우 모두 변곡점(inflexion point)를 갖고 있어 시어 불안정이 운동량의 연직수송에 역할을 할 것임을 시사한다.

평평한 지표면과 달리 경사면이거나 풍향시어가 있는 곳에서는 횡단 운동량 플럭스(lateral momentum flux)인 $\overline{v'w'}$ 의 값이 존재한다(Lee et al., 2004). 본 관측지에서는 횡단 운동량 플럭스가 종단 운동량 플럭스와 거의 유사한 크기를 갖는다. 풍향시어와 운동량 플럭스의 관계를 분석하기 위하여 5 m 고도의 바람을 기준으로 바람의 종단성분과 횡단 성분의 연직 차이를 5 m 고도에서 관측된 운동량 플럭스와 비교하여 제시하였다(Fig. 8). 종단 운동량 플럭스(longitudinal momentum flux)과 바람의 종단 성분의 연직 차이(δV)는 동풍과 서풍에 대해 모두 음의 상관관계를 보이며 상관계수는 각각 -0.90 와 -0.62 이다. 유선면이 동쪽을 향하는 경사를 갖는 서풍에서 상관계수가 더 작게 나타났다. 횡단 운동량 플럭스 $\overline{v'w'}$ (lateral momentum flux)을 보면 동풍의 경우 횡단성분의 연직차이 $|\delta V|$ 가 증가할수록 $\overline{v'w'}$ 의 크기가 증가하는 경향을 보이며 δV 와 $\overline{v'w'}$ 는 -0.57 의 음의 상관관계를 보인다. 그러나 서풍의 경우에는 δV 가 음수일 때 $\overline{v'w'}$ 가 음수 값을 보여 하향 경도(down-gradient) 관계를 보이지 않는다. 또한 두 변수간의 상관계수는 -0.2 로 낮은 값을 보인다. δV 가 음수라는 것은 서풍의 경우 10 m 고도의 바람이 북풍 성분을 갖고 있고 동풍의 경우 10 m 고도의 바람이 남풍 성분을 가짐을 의미한다. 유선면은 남쪽을 향하고 있으므로 서풍이 부는 경우 10 m 고도의 북풍은 경사를 따라 하강하는 흐름이고 동풍의 경우 10 m 고도의 남풍은 경사를 따라 상승하는 흐름이다. 현재의 분석결과를 정리하면 유선면의 경사가 크고 지면 경사를 따라 하강하는 흐름일 때 운동량 플럭스와 바람성분의 연직 차이의 상관성이 작게 나타난다.

3.3 사분원 분석 결과

운동량의 연직 전달 특징을 좀 더 분석하기 위하여 $\overline{u'w'}$ 과 $\overline{v'w'}$ 에 대하여 사분원 분석을 수행하였다. 풍향시어와 지면 경사의 효과가 운동량의 연직 전달에 미치는 영향을 분석하기 위하여 풍향과 δV 의 크기에 따라 4가지 경우로 분류하였다. Figure 9는 $\overline{u'w'}$ 과 $\overline{v'w'}$ 에 대하여 사분원 분석 결과를 비교하여 제시한 것이다. δV 가 작을 때 $\overline{u'w'}$ 의 사분원 분석결과를 동풍과 서풍에 대하여 비교하면 동풍의 경우 sweep의 기여도가 서풍의 경우보다 크게 나타난다. 또한 서풍의 경우 inward interaction과 outward interaction의 비중이 상대적으로 높게 나타난다. 서풍이 부는 경우 지

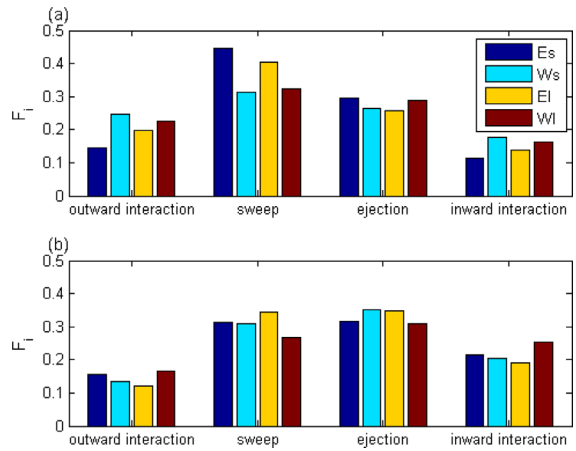


Fig. 9. Comparison of fraction of the (a) longitudinal momentum flux $\overline{u'w'}$, and (b) lateral momentum flux $\overline{v'w'}$; Es: easterly with $-0.2 \leq \delta V < 0$, Ws: westerly with $-0.2 \leq \delta V < 0$, El: easterly with $-0.2 \leq \delta V < -1.0$, Wl: westerly with $-0.2 \leq \delta V < -1.0$. Unit of δV is $m s^{-1}$.

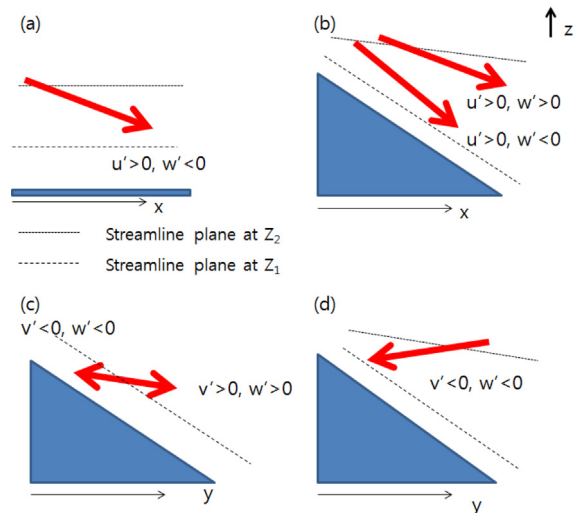


Fig. 10. Schematic diagram of canopy-scale eddy motion (red arrow) over (a) flat surface (b) down-sloped surface for longitudinal momentum flux, (c) eddy motion over sloped surface with no mean lateral wind shear and (d) canopy-scale eddy motion over up-sloped surface with mean lateral wind shear for lateral momentum flux ($\overline{v'w'} > 0$).

면 부근에서는 지면과 평행하게 경사를 따라 하강하는 바람이 불지만 고도가 높아질수록 유선면은 수평적으로 나타난다(Kaimal and Finnigan, 1994). 그러므로 10 m의 고도에서 평평한 바람은 5 m 고도의 유선면 상에서는 상승하는 연직 성분을 갖고 있어 캐노피

꼭대기의 바람시어에 의해 발생하는 불안정은 5 m 고도에서 강한 하강운동을 일으키지 못한다. 결과적으로 sweep 기여도는 감소하고 outward interaction의 비중은 증가하게 된다. Figures 10a와 10b는 동풍과 서풍에 대하여 고도에 따른 유선면의 변화와 시어불안정에 의해 발생하는 조직화된 에디 운동을 모식도로 나타낸 것이다.

δV 가 커지면 동풍이 부는 경우 $\overline{u'w'}$ 에서 sweep과 ejection의 기여도가 감소하고 inward interaction과 outward interaction이 증가하는 특성을 보인다. 이는 바람의 종단성분의 시어가 감소하고 바람의 횡단 성분의 시어에 의해 발생하는 불안정은 종단운동량을 효과적으로 전달하지 못하기 때문이다. 반면 서풍의 경우에는 δV 에 따른 변화가 작지만 sweep과 ejection의 기여도가 증가하고 inward interaction과 outward interaction의 기여도가 좀더 감소하는 특성을 보인다. 이는 바람의 횡단 성분의 시어가 증가하면서 $\overline{v'w'}$ 의 값이 오히려 $0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 으로 접근함에 따라 $\overline{u'w'}$ 의 전달 효율이 증가하는 것으로 사료된다.

$\overline{v'w'}$ 에 대해서 δV 가 작을 때 동풍과 서풍을 비교하면 상대적으로 차이가 작다. 동풍과 서풍의 유선면은 둘 다 남쪽을 향하는 경사를 갖고 있는데 횡단 운동량 플럭스의 사분원 분석에서 나타나는 공통된 특징은 sweep과 ejection이 비슷한 기여도를 보이고 inward interaction의 비중이 outward interaction보다 더 크게 나타난다는 점이다. 이는 횡단 운동량의 연직시어가 없을 때 주 에디 운동은 평균 바람의 유선면보다 더 수평한 면에서 운동한다는 것을 시사한다(Fig. 10c). $|\delta V|$ 가 클 때 동풍의 경우 sweep과 ejection의 기여도는 증가하고 inward interaction과 outward interaction의 기여도는 감소한다. 이는 $|\delta V|$ 가 증가하면 횡단 방향의 바람시어 불안정에 의해 발생하는 캐노피 규모의 에디운동이 upslope 유선면상에서 sweep에 의한 운동량 전달을 효과적으로 증가시키기 때문이다(Fig. 10d). 반면 서풍의 경우 $|\delta V|$ 가 클 때 sweep과 ejection의 기여도가 감소하고 inward interaction과 outward interaction의 기여도가 증가한다. 이는 횡단 바람성분의 시어 불안정이 유발하는 운동량의 하향전달과 경사면상에서 에디 운동에 기인한 운동량 전달이 서로 반대방향을 가지므로 시어불안정에 의해 하향 운동량 전달이 있는 경우 inward interaction을 증가시키면서 오히려 연직 전달효율을 감소시키기 때문이다.

4. 요약 및 결론

경사가 있는 거칠기 아층에서 관측된 세 고도(2.5 m, 5 m, 10 m)의 바람 자료와 한 고도(5 m)의 에디 공분

산 자료를 이용하여 풍향시어의 특성과 풍향시어와 운동량 플럭스의 관계를 분석하였다. 10 m 고도에서 서풍계열의 바람이 불 때 수평바람은 고도가 낮아짐에 따라 반 시계 방향으로 회전하는 특징을 보이는데 이는 서쪽에 위치한 거칠기 성분들에 의한 운동량의 흡수와 남북 방향의 경사를 갖는 지표면 상에서 발달하는 경사류에 기인한다. 10 m 고도에서 동풍계열의 바람이 불 때 5 m와 10 m 고도의 풍향 차이는 상대적으로 작게 나타났다. 본 관측지의 풍향시어는 10 m 풍속이 작을수록 크게 나타나고 풍향이 남풍계열일 때 작게 나타났다. 풍향시어와 10 m 풍향과의 의존성은 본 관측지에서 발달하는 경사류가 원인으로 사료된다.

풍향시어와 운동량 플럭스의 관계를 동풍($67.5^\circ < \text{풍향} < 112.5^\circ$)과 서풍($247.5^\circ < \text{풍향} < 292.5^\circ$)으로 나누어서 분석하였다. 동풍의 유선면은 남북방향의 경사만 존재하는 반면 서풍의 유선면은 동서방향과 남북방향의 경사가 모두 존재하고 경사각도 크다. 유선면의 경사가 클수록 바람 성분의 연직차이와 해당 운동량 플럭스의 상관관계는 감소한다. 지면 경사가 큰 서풍의 횡단 운동량 플럭스의 경우 횡단 운동량의 연직 성분과 횡단 운동량 플럭스는 하향 경도 관계를 보이지 않는다.

운동량 플럭스의 사분원 분석 결과 바람 시어에 의한 불안정은 지면 경사를 따라 하강하는 흐름에서 경사진 지면의 유선면상에 강한 하강운동을 유발하지 못하므로 종단 운동량 플럭스에 대한 sweep의 기여도는 감소한다. 횡단 운동량 플럭스의 sweep과 ejection의 기여도는 비슷하고 inward interaction의 비중이 outward interaction 보다 높게 나타난다. 운동량 플럭스에 대한 각 사분원의 상대적 기여도는 지면경사와 풍향 시어에 둘 다 의존하여 변화한다.

본 연구의 결과는 지표면의 작은 경사가 10 m 이하의 고도에서 큰 풍향시어를 유발할 수 있음을 보여준다. 이는 대부분의 사람들이 거주하는 도시지역의 거칠기 아층에서 대기 오염물질의 수송과 확산을 모의할 때 지표면의 고도변화와 이에 따른 풍향의 변화를 고려하는 것이 필요함을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

Bowen, B. M., J. A. Baars, and G. L. Stone, 2000: Nocturnal wind direction shear and its potential impact on

Atmosphere, Vol. 25, No. 4. (2015)

- pollutant transport. *J. Appl. Meteorol.*, **39**, 437-445.
- Christen, A., E. van Gorsel, and R. Vogt, 2007: Coherent structures in urban roughness sublayer turbulence. *Int. J. Climatol.*, **27**, 1955-1968.
- Dupont, S., and E. G. Patton, 2012: Momentum and scalar transport within a vegetation canopy following atmospheric stability and seasonal canopy changes: The CHATS experiment. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 5913-5935.
- Finnigan, J. J., and S. E. Belcher, 2004: Flow over a hill covered with a plant canopy. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1-29.
- Gao, W., R. H. Shaw, and K. T. Paw U, 1989: Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Bound.-Layer Meteorol.*, **47**, 349-377.
- Kaimal, J. C., and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric boundary layer Flows: Their structure and measurement*. Oxford University Press, 289 pp.
- Katul, G. G., and J. D. Albertson, 1998: An investigation of higher-order closure models for a forested canopy. *Bound.-Layer Meteorol.*, **89**, 47-74.
- Leclerc, M. Y., K. C. Beissner, R. H. Shaw, G. D. Hartog, and H. H. Neumann, 1991: The influence of buoyancy on third-order turbulent velocity statistics within a deciduous forest. *Bound-Layer Meteorol.*, **55**, 109-123.
- Lee, X., W. Massman, and B. Law, 2004: *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, 250 pp.
- Lee, Y., 2009: The influence of local stability on heat and momentum transfer within open canopies. *Bound.-Layer Meteorol.*, **132**, 383-399.
- _____, 2012: Influence of non-flat terrain and wind direction shear on canopy turbulence. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **48**, 243-252.
- Mahrt, L., 2000: Surface heterogeneity and vertical structure of the boundary layer. *Bound.-Layer Meteorol.*, **96**, 33-62.
- _____, S. Richardson, D. Stauffer, and N. Seaman, 2014: Nocturnal wind-directional shear in complex terrain. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 2393-2400.
- Pyles, R. D., K. T. Paw U, and M. Falk, 2004: Directional wind shear within an old-growth temperate rainforest: observations and model results. *Agric. For. Meteorol.*, **125**, 19-31.
- Raupach, M. R., 1981: Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, **108**, 363-382.
- _____, J. J. Finnigan, and Y. Brunet, 1996: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. *Bound.-Layer Meteorol.*, **78**, 351-382.
- Stull, R. B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer, 670 pp.
- Su, H. B., H. P. Schmid, C. S. Vogel, and P. S. Curtis, 2008: Effects of canopy morphology and thermal stability on mean flow and turbulence statistics observed inside a mixed hardwood forest. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 862-882.
- Wilczak, J. M., S. P. Oncley, and S. A. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Bound.-Layer Meteorol.*, **99**, 127-150.