

평균 방법이 도시 난류 플럭스에 미치는 영향

권태현 · 박문수* · 이재연 · 최영진
기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단

(접수일: 2014년 1월 17일, 수정일: 2014년 3월 11일, 게재확정일: 2014년 3월 18일)

Effects of Different Averaging Operators on the Urban Turbulent Fluxes

Tae Heon Kwon, Moon-Soo Park*, Chaeyeon Yi, and Young Jean Choi

Weather Information Service Engine, Center for Atmospheric Science & Earthquake Research, Seoul, Korea

(Manuscript received 17 January 2014; revised 11 March 2014; accepted 18 March 2014)

Abstract The effects of different averaging operators and atmospheric stability on the turbulent fluxes are investigated using the vertical velocity, air temperature, carbon dioxide concentration, and absolute humidity data measured at 10 Hz by a 3-dimensional sonic anemometer and an open-path CO₂/H₂O infrared gas analyzer installed at a height of 18.5 m on the rooftop of the Jungnang KT building located at a typical residential area in Seoul, Korea. For this purpose, 7 different averaging operators including block average, linear regression, and moving averages during 100 s, 300 s, 600 s, 900 s, and 1800 s are considered and the data quality control procedure such as physical limit check and spike removal is also applied. It is found that as the averaging interval becomes shorter, turbulent fluxes computed by the moving average become smaller and the ratios of turbulent fluxes computed by the 100 s moving average to the fluxes by the 1800 s moving average under unstable stability are smaller than those under neutral stability. The turbulent fluxes computed by the linear regression are 85~92% of those computed by the 1800 s moving average and nearly the same as those computed by 900 s moving average, implying that the adequate selection of an averaging operator and its interval will be very important to estimate more accurate turbulent fluxes at urban area.

Key words: Averaging operator, carbon dioxide flux, latent heat flux, sensible heat flux, turbulent flux, urban residential area

1. 서 론

지표와 대기 사이의 운동량, 현열, 또는 잠열 등의 플럭스를 얻기 위해 가장 많이 사용하는 방법 중 하나가 에디공분산법이다(Baldocchi *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2004; Aubinet *et al.*, 2012). 일반적으로 공분산 계산을 위한 평균으로는 정해진 시간 동안의 단순 평균을 적용한다(Panofsky and Dutton, 1984). 또한 정확

한 플럭스를 얻으려면 자료의 수집 속도는 에너지 스펙트럼의 에너지가 급격하게 떨어지는 관성소영역(inertial subrange)을 포함할 정도로 충분히 빨라야 하며, 평균 시간은 여러 번 시행한 경우에도 그 값이 오차 범위 내에서 동일한 값에 수렴할 정도로 충분히 길어야 한다(Tennekes and Lumley, 1972; Kaimal and Finnigan, 1994). 이에 대해 대부분의 연구자들은 1~20 Hz 사이의 수집 속도와 5~60분 사이의 평균 시간을 선택하여 플럭스를 계산하고 있다(Baldocchi *et al.*, 2001; Göckede *et al.*, 2008; Kwon and Kim, 2010). 일반적으로 수증기량, 바람 등의 기상 변수는 아주 큰 일변화 경향을 보이지 않지만, 기온, 이산화탄소 농도 등의 변수는 전형적인 일변화 경향을 보인다(Park *et*

*Corresponding Author: Moon-Soo Park, Weather Information Service Engine, Center for Atmospheric Science & Earthquake Research, Sang-Am IT Building 12th Fl., 434 World Cup Buk-ro, Mapo-gu, Seoul 121-835, Korea.
Phone : +82-70-4617-3769, Fax : +82-2-6922-2930
E-mail : moonsoo@paran.com

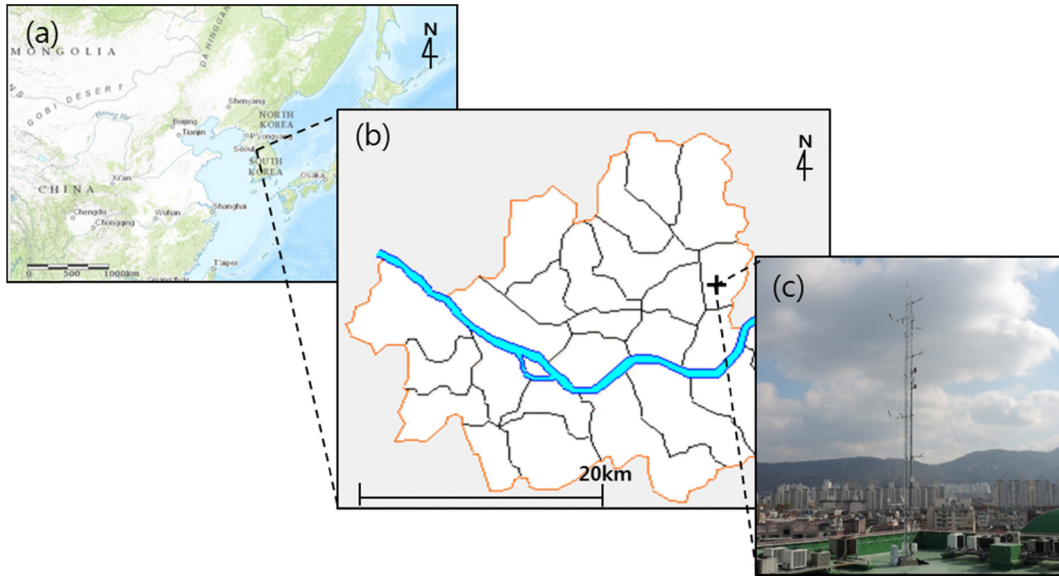


Fig. 1. (a) The geographical location of Seoul, Korea in East Asia, (b) the location of the Jungnang site in Seoul, and (c) the 18.5 m measurement tower installed over rooftop of the KT Jungnang building.

al., 2013). 예를 들면, 1시간 동안 기온은 2°C 이상 그리고 이산화탄소 농도는 80 mg m^{-3} 이상 변화할 수 있으며, 이 경우 편차가 시간에 따라 경향성을 가지게 되어 플럭스 값에 왜곡이 나타날 수 있다(Culf, 2000). 이런 문제를 해결하기 위하여 단순 평균 이외에 선형회귀곡선, 정해진 시간 동안의 이동평균, 또는 이외에 다양한 종류의 연산자를 적용하여 편차를 산출하기도 한다(Gash and Culf, 1996; Rannik and Vesala, 1999; Culf, 2000; Lee *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2013).

특히, 도시에는 수~수백 m 높이의 건물들이 매우 불규칙하게 있으며 지면 조건이 급격하게 변하기 때문에 기상 변수들의 평균과 이들의 연직 플럭스가 수평적으로 균일하지 않다. 따라서, 에디공분산법을 이용한 플럭스 계산의 가정인 평평하고 균일한 지표 조건을 위반할 수 있기 때문에 자료 처리와 해석에 많은 주의를 필요로 한다(Kaimal and Finnigan, 1994; Batchvarova *et al.*, 2001; Gryning and Batchvarova, 2009).

본 연구에서는 서울의 주거 지역에 위치한 중랑 KT 지사 건물 옥상의 18.5 m 높이의 관측탑에 설치된 3차원 초음파풍속계와 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 기체분석기에서 10 Hz로 수집된 자료에 대해 단순 평균, 선형회귀, 그리고 100 s, 300 s, 600 s, 900 s, 1800 s 이동평균의 연산자를 적용하여 계산된 현열속, CO_2 플럭스, 잠열속을 이용하여 대기 안정도와 평균 연산자가 도시에서의 난류 플럭스에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 관측소 및 기기의 설치

2.1 관측소

중랑 관측소는 서울 동부 주거 지역에 해당하는 KT 중랑지사 건물의 옥상에 위치하고 있다. 건물의 해발 고도는 14 m이고, 높이는 20 m, 위경도는 각각 $37^{\circ}35.4'N$, $127^{\circ}04.4'E$ 이다(Fig. 1).

관측소 주변의 지면은 주거지역(48%), 상업지역(8%), 혼합지역(37%), 공공건물(1%), 아파트(6%)로 구성되어 있다(Fig. 2). 관측소 중심으로 600 m 반경을 포함하는 주변에서 영역별 건물의 평균 높이 z_H 와 전체 넓이 중 건물 평면 넓이의 비를 나타내는 평면비 λ_p 와 건물의 풍압을 받는 옆면 넓이의 비를 나타내는 옆면비 λ_f 를 Table 1에 나타내었다(Grimmond and Oke, 1999). 주변 지면 중 가장 넓은 면적을 차지하는 주거지역은 z_H 가 9.8 m이며, λ_p 와 λ_f 가 각각 0.48, 0.47이며, 혼합지역은 z_H 가 10.0 m, λ_p 와 λ_f 가 각각 0.49, 0.45이며, 상업지역은 z_H 가 12.8 m, λ_p 와 λ_f 가 각각 0.50, 0.39이다. 공공건물은 모두 학교로 z_H 가 15.1 m, λ_p 와 λ_f 가 각각 0.31, 0.18이며, 아파트는 관측소로부터 남서쪽으로 500 m 떨어져 있으며, z_H , λ_p , λ_f 가 각각 40.5 m, 0.33, 0.60이다.

각 영역에서 변위거리 z_d 와 지표면 거칠기길이 z_0 는 각각

$$\frac{z_d}{z_H} = 1 + \alpha^{-\lambda_p}(\lambda_p - 1), \quad (1a)$$

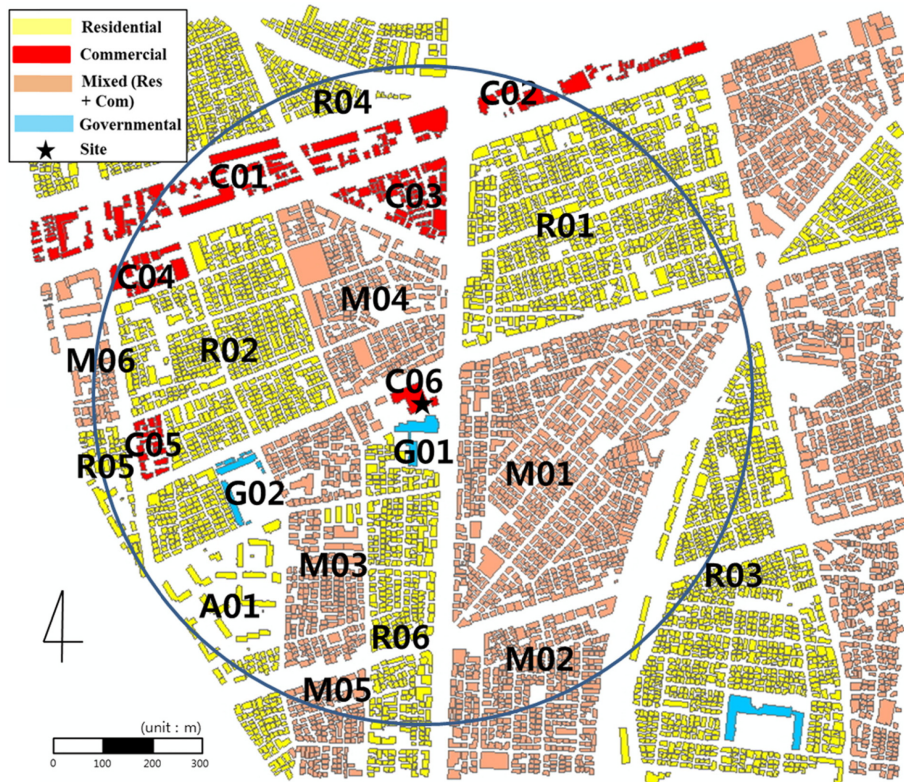


Fig. 2. Land cover near the Jungnang site. Prefixes “R”, “M”, “C”, “G”, and “A” indicate residential, mixed, commercial, governmental, and apartment area, respectively. The radius of 600 m from the site is shown in solid circle.

$$\frac{z_0}{z_H} = \left(1 - \frac{z_d}{z_H}\right) \exp\left\{-\left[0.5\beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{z_H}\right) \lambda_F\right]^{-0.5}\right\}, \quad (1b)$$

를 사용하여 계산하였다(Macdonald *et al.*, 1998). 여기서 k 는 본 카르만 상수를, C_D 는 항력 계수를 나타내며(Grimmond and Oke, 1999), 경험 상수 α 와 β 와 C_D 는 도시와 유사하게 배치된 정육면체 구조물에 대해 수행되었던 풍동실험을 통해 얻은 값인 4.43과 1.0과 1.2를 각각 사용하였다(Macdonald *et al.*, 1998).

각 영역별 z_d 와 z_0 를 Table 1에 추가하였다. 주거지역과 혼합지역에서의 z_d 는 각각 7.3 m, 7.5 m이고, z_0 는 각각 0.55 m, 0.52 m로 거의 유사하게 나타났다. 이에 비해 공공건물(상업지역)에서의 z_d 와 z_0 는 8.7(9.5) m, 1.06(0.56) m로 주거 지역보다 더 큰 값을 나타내었으며, 아파트에서는 높은 건물 때문에 z_d 가 23.9 m, z_0 가 5.85 m로 가장 큰 값을 보였다.

2.2 기기 및 자료의 수집

중랑 관측소에 위치한 에너지수지 관측탑의 18.5 m

에 3차원 초음파풍속계(CSAT3A, Campbell Scientific Inc.), 개회로 CO₂/H₂O 기체분석기(EC150, Campbell Scientific Inc.), 기압계, 그리고 온도계를 설치하여 세 방향의 풍속(u, v, w), 음파온도 T , 이산화탄소 농도 c , 절대습도 q , 그리고 자료 보정을 위한 기압과 기온을 10 Hz로 수집하였다. 자료 보정을 위한 기온은 빨리 반응하지 않기 때문에 현열속 계산에는 음파온도를 사용하였다.

3. 자료 및 처리

3.1 자료 기간

본 연구에서는 2013년 11월 11일부터 13일까지 3일 동안에 수집된 자료를 사용하였다. 분석 기간 동안 강수는 없었으며, 운량이 11일, 12일, 13일에 각각 0.0, 0.3, 1.9로 매우 맑았다(<http://www.kma.go.kr>). 같은 기간 동안 30분 단속 평균한 풍속, 풍향, T , c , q 의 시계열을 Fig. 3에 나타내었다. 3일 평균 풍속은 1.9 m s⁻¹로 새벽에 낮은 값을 그리고 오후에 비교적 큰 값을 보였으며, 11월 13일 0600~1200 LST에 동풍이

Table 1. Mean building height (z_H), plane area density (λ_p), frontal area density (λ_f), zero-plane displacement length (z_d), and surface roughness length (z_0) at each surface code listed in Fig. 2.

Surface code	z_H (m)	λ_p	λ_f	z_d (m)	z_0 (m)
R01	9.9	0.48	0.46	7.33	0.56
R02	10.4	0.50	0.51	7.92	0.56
R03	9.1	0.46	0.43	6.64	0.54
R04	9.5	0.53	0.56	7.52	0.44
R05	15.8	0.44	0.58	11.12	1.34
R06	9.2	0.51	0.45	7.11	0.43
Residential	9.8	0.48	0.47	7.28	0.55
M01	10.2	0.49	0.48	7.72	0.55
M02	8.1	0.51	0.39	6.22	0.34
M03	10.5	0.49	0.50	7.88	0.59
M04	10.4	0.50	0.43	7.86	0.50
M05	9.7	0.51	0.48	7.42	0.48
M06	12.1	0.43	0.37	8.45	0.79
Mixed	10.0	0.49	0.45	7.53	0.52
C01	13.1	0.47	0.34	9.67	0.61
C02	9.6	0.47	0.29	7.07	0.38
C03	11.3	0.56	0.54	9.13	0.43
C04	16.0	0.46	0.42	11.70	0.92
C05	13.8	0.54	0.55	10.99	0.60
C06	12.0	0.63	0.33	10.29	0.26
Commercial	12.8	0.50	0.39	9.48	0.56
G01	20.0	0.44	0.18	14.18	0.60
G02	12.4	0.24	0.19	5.76	1.30
Government	15.1	0.31	0.18	8.72	1.06
A01	40.5	0.33	0.60	23.94	5.85
Apartment	40.5	0.33	0.60	23.94	5.85

분 것을 제외하면 서풍이 우세하였다(Figs. 3a-b). 기온은 새벽에 최저를 오후에 최고를 가지는 전형적인 일변화 경향을 보였다(Fig. 3c). 3일 평균 기온은 5.0°C이며, 11일에 4.3°C, 12일에 4.7°C, 13일에 5.9°C로 시간에 따라 상승하였으며, 일교차 역시 11일에 4.4°C에서 13일에 8.9°C로 시간에 따라 커졌다(Fig. 3c). 이산화탄소 농도는 처음 2일 동안은 오전 시간대에 높은 농도를, 마지막 날은 오후에만 낮은 농도를 보였다(Fig. 3d). 3일 평균 이산화탄소 농도는 798 mg m⁻³을 보였으며, 관측 기간 중 최고 농도는 13일 2300 LST에 922 mg m⁻³를, 최저 농도는 12일 1500 LST에 757 mg m⁻³을 기록하였다(Fig. 3d). 절대습도는 12일 1200 LST 이전에는 1.4 g m⁻³으로 낮은 값을 그 이후에는 2.4 g m⁻³으로 높은 값을 보였으며, 3일 평균 절대습도는 1.9 g m⁻³이었다(Fig. 3e).

한국기상학회 대기 제24권 2호 (2014)

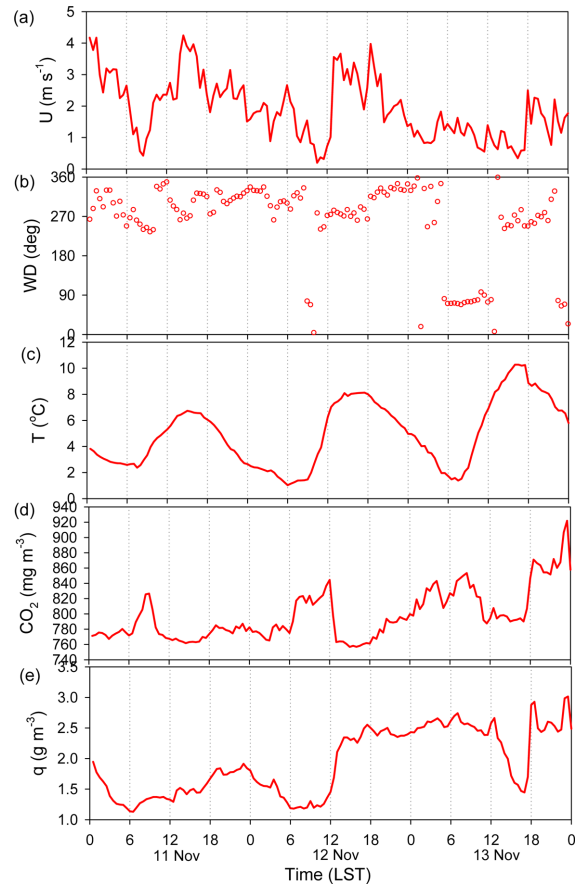


Fig. 3. Time series of 30-minute averaged (a) wind speed (m s^{-1}), (b) wind direction (deg), (c) air temperature ($^{\circ}\text{C}$), (d) CO_2 concentration (mg m^{-3}), (e) absolute humidity (g m^{-3}) for the period from 0000 LST 11 to 2400 LST 23 November 2013 at the Jungnang site.

3.2 평균 연산자

각 자료의 평균 시간은 가장 널리 사용되는 30분을 취하였으며(Nordbo *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2013), 다음에 제시된 7 종류의 평균 연산자를 사용하였다. 먼저 자료의 수가 N 개인 변수 x_i 에 대한 단순 평균 \bar{x}_1 은

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

를 그리고 선형회귀 평균 \bar{x}_2 는

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_1 + b \left(t_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \right), \quad (3a)$$

를 사용하여 계산하였다. 여기서, t_i 는 시간을 나타내고 계수 b 는

Table 2. Physical limits of wind velocity for each component, air temperature, CO₂ concentration, and absolute humidity.

Variable	Lower limit	Upper limit
u, v (m s ⁻¹)	-30.0	30.0
w (m s ⁻¹)	-8.0	8.0
T (°C)	-30.0	50.0
c (mg m ⁻³)	500.0	1200.0
q (g m ⁻³)	0.0	42.0

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i t_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N t_i t_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \sum_{i=1}^N t_i}, \quad (3b)$$

로 주어진다. 마지막으로 이동평균은

$$x_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=k-N_k/2}^{k+N_k/2-1} x_i, \quad (k=3, 4, 5, 6, 7), \quad (4)$$

를 사용하여 계산하였다. 여기서 N_k 는 이동평균 자료의 개수(평균 시간)로 $N_3=1000(100\text{ s})$, $N_4=3000(300\text{ s})$, $N_5=6000(600\text{ s})$, $N_6=9000(900\text{ s})$, $N_7=18000(1800\text{ s})$ 을 각각 사용하였다.

3.3 자료의 처리 방법

10 Hz로 수집된 자료는 물리한계검사와 튀는자료 제거의 품질 관리 과정을 거쳐 30분 단위의 공분산을 계산하였다(Yuan *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2009).

먼저, 물리한계검사에서는 기기의 한계와 관측 가능 범위를 고려하여 결정하였다(http://www.campbellsci.com). 연직 풍속과 기온의 경우 Lim and Lee (2008)에서 제시한 값인 $-8\sim+8\text{ m s}^{-1}$ 와 $-30\sim+50^\circ\text{C}$ 를 사용하였으며, 수평 풍속은 기기의 한계에 포함되도록 $-30\sim+30\text{ m s}^{-1}$ 로, 절대습도는 $0\sim42\text{ g m}^{-3}$ 을 사용하였다(Table 2). CO₂ 농도의 경우 도시에서는 인위적인 배출에 의해 CO₂ 농도가 높은 값을 가질 수 있기 때문에(Park *et al.*, 2014) 물리한계의 상한으로 Lim and Lee (2008)에서 제시한 상한보다 크며 기기의 한계 내에 포함되는 $1,200\text{ mg m}^{-3}$ 을 사용하였다.

둘째, 튀는자료를 제거하기 위하여 먼저 30분 단순 평균에 대한 표준편차 σ 를 구하고, 각 자료들 편차의 절대값이 표준편차의 D 배 이내에 드는 자료($|x_i - \bar{x}| \leq D \cdot \sigma_x$)와 인접한 두 값의 차 Δx 들 편차의 절대값이 Δx 들 표준편차의 $D_{\Delta x}$ 배 이내에 드는 자료($|\Delta x_i - \overline{\Delta x}| \leq D_{\Delta x} \cdot \sigma_{\Delta x}$)를 선택하였다. 여기서 허용 범위 D 와 $D_{\Delta x}$ 의 값으로 3.5를 사용하였다(Vickers and Mahrt, 1997; Clement, 2004; Aubinet *et al.*, 2012). 물리한계검사와 튀는자료 검사 결과 95% 이상의 자료가 선택되었을

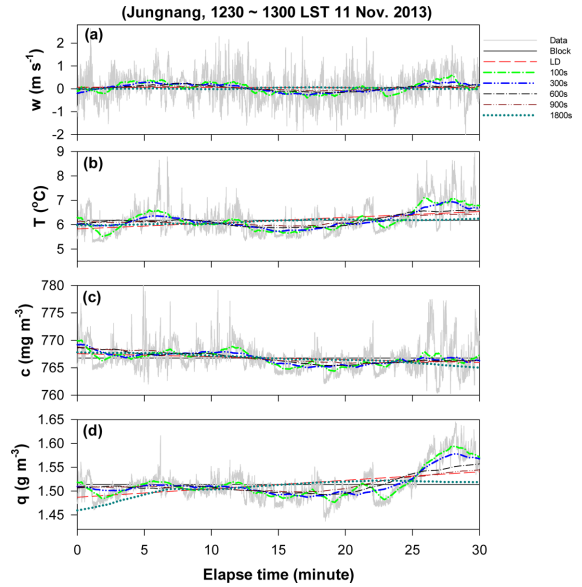


Fig. 4. Time series of raw data, block average, linear regression, and 100 s, 300 s, 600 s, 900 s, 1800 s running mean of (a) vertical velocity, (b) air temperature, (c) CO₂ concentration, and (d) absolute humidity measured for the period from 1230 to 1300 LST 11 November 2013 at the Jungnang site.

때 유효한 자료로 분류하였다.

셋째, T, c, q 관측 자료에 대해 7 종류의 연산자를 적용한 편차 $x'_k = x - \bar{x}_k$ ($k=1, 2, \dots, 7$)들의 공분산으로 현열속($\overline{w'T'_k}$), CO₂ 플럭스($\overline{w'c'_k}$), 잠열속($\overline{w'q'_k}$)을 각각 계산하였다.

4. 결 과

4.1 평균 연산자에 따른 플럭스의 예

서로 다른 대기안정도에서 평균 연산자가 플럭스에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 단순 평균 현열속 $\overline{w'T'}$ 의 값이 0.10 이상인 경우를 불안정한 대기로, 0.05 이하인 경우를 중립인 대기로 분류하였다.

또한, 시간에 따른 자료의 일관성을 계산하기 위하여 30분 자료를 6개의 5분 자료로 나누어 비정상지수를 계산하였다. 즉, 비정상지수는 30분-평균 표준편차와 6개의 5분-평균 표준편차를 이용하여

$$RN = \left| \frac{\overline{\sigma_x} - \sigma_{x0}}{\sigma_{x0}} \right|, \quad (6)$$

과 같이 계산되었다(Foken and Wichura, 1996; Lee *et al.*, 2013). 여기서 $\overline{\sigma_x}$ 는 5분-표준편차 6개의 평균을 그리고 σ_{x0} 는 30분 표준편차를 나타낸다.

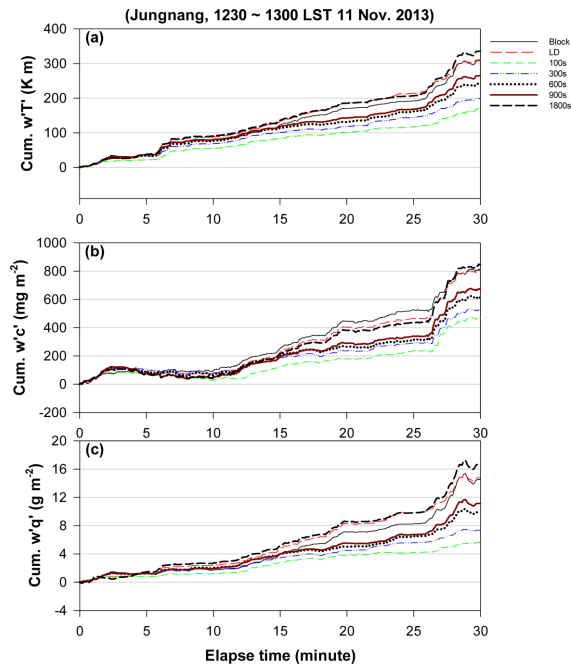


Fig. 5. Cumulative (a) sensible heat flux, (b) CO₂ flux, and (c) latent heat flux computed by the block average, linear regression, and 100 s, 300 s, 600 s, 900 s, 1800 s running mean for the period from 1230 to 1300 LST 11 November 2013 at the Jungnang site.

4.1.1 불안정한 대기(주간)

Figure 4는 주간 불안정한 대기에 해당하는 2013년 11월 11일 1230 LST부터 1300 LST까지 10 Hz로 수집된 w , T , c , q 의 시계열과 각각 7 종류의 평균 연산자로 계산된 평균 시계열의 예를 나타낸 것이다. 분석 기간 중 w , T , c , q 의 30분 평균은 각각 0.06 m s^{-1} , 6.2°C , 766.8 mg m^{-3} , 1.51 g m^{-3} 이었으며, 5분 단위의 표준편차는 각각 $0.50\text{--}0.63 \text{ m s}^{-1}$, $0.28\text{--}0.60^\circ\text{C}$, $1.43\text{--}3.81 \text{ mg m}^{-3}$, $0.014\text{--}0.028 \text{ g m}^{-3}$ 범위에 포함되었다. 비정상지수 RN 은 w 의 경우는 6.3%로 작았으나 T , c , q 의 경우는 각각 25.8%, 26.4%, 43.1%로 큰 편이었다. 30분 동안 c 와 w 는 1.63 mg m^{-3} 와 0.03 m s^{-1} 만큼 감소하였으며 T 와 q 는 0.71 , 0.05 g m^{-3} 만큼 증가하였다.

Figure 5는 Fig. 4에서 제시된 기간 중 7 종류의 평균 연산자에 의해 계산된 T , c , q 의 누적 플럭스를 나타낸 것이다. 누적 현열속은 관측 기간 중 2분, 6분, 27분 부근에 급하게 증가하는 구간이 있었지만 나머지 기간 동안에는 거의 일정한 기울기로 증가하였으며, 이는 현열속이 시간에 따라 거의 일정하였음을 의미한다(Fig. 5a). 100 s 이동평균에 의한 30분-평균 현

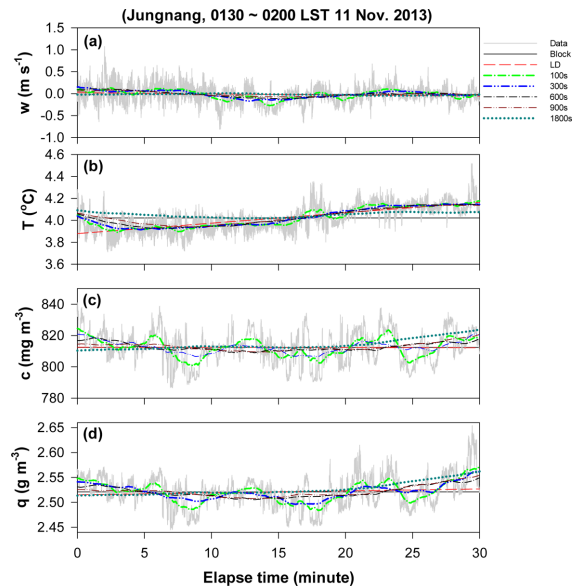


Fig. 6. The same as in Fig. 4 except for the period from 0130 to 0200 LST 13 November 2013.

열속은 0.09 K m s^{-1} 로 1800 s 이동평균에 의한 현열속인 0.19 K m s^{-1} 의 약 50%를 나타내었다. 누적 CO₂ 플럭스는 2분에서 10분 사이에 음의 값을 보이기는 했지만 전반적으로 양의 값을 기록하였다(Fig. 5b). 100 s 이동평균에 의한 30분-평균 CO₂ 플럭스는 $0.26 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 1800 s 이동평균 CO₂ 플럭스인 $0.47 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 약 55%였다. 한편, 잠열속은 28-29분 구간을 제외하면 시간에 따라 꾸준히 양의 값을 보였으며 100 s 이동평균에 의한 30분-평균 잠열속은 $3.14 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 1800 s 이동평균 잠열속인 $9.28 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 약 34%였다.

이동평균에 의해 계산된 현열속, CO₂ 플럭스, 잠열속은 모두 평균 시간이 길어짐에 따라 순차적으로 커졌으며, 선형회귀에 의해 계산된 플럭스는 단순 평균에 의해 계산된 플럭스와 거의 유사한 값을, 그리고 1800 s 이동평균에 의해 계산된 플럭스보다 약간 작은 값을 보였다.

4.1.2 중립 안정도인 대기(야간)

Figure 6은 야간의 중립 안정도에 해당하는 2013년 11월 13일 0130 LST부터 0200 LST까지 10 Hz로 수집된 w , T , c , q 의 시계열과 7 종류의 평균 연산자로 계산된 평균의 시계열을 나타낸 것이다. 관측 기간 중 w , T , c , q 의 30분 평균은 각각 -0.02 m s^{-1} , 4.02°C , 812.4 mg m^{-3} , 2.52 g m^{-3} 이었으며, 5분 단위의 표준편차는 각각 $0.14\text{--}0.19 \text{ m s}^{-1}$, $0.05\text{--}0.10^\circ\text{C}$, $6.7\text{--}12.0 \text{ mg m}^{-3}$, $0.015\text{--}0.036 \text{ g m}^{-3}$ 의 범위에 들었다. w 와 T

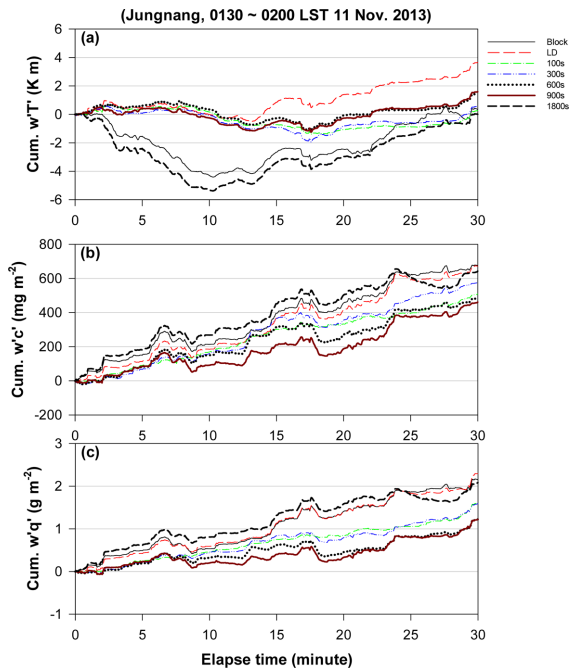


Fig. 7. The same as in Fig. 5 except for the period from 0130 to 0200 LST 13 November 2013.

의 표준편차는 불안정한 대기와 비교하여(Fig. 4) 작은 값을 보였으며, c 는 더 높은 값을, 그리고 q 는 약간 높은 값을 보였다. 시계열 w , T , c , q 의 RN은 각각 13.2%, 38.1%, 17.0%, 21.1%을 보여 기온을 제외한 나머지 변수들은 시간에 따라 비교적 일관된 값을 보였다. 30분 동안 c 와 w 는 각각 $0.35\ mg\ m^{-3}$ 와 $0.08\ m\ s^{-1}$ 만큼 감소하였으나, T 와 q 는 $0.30^\circ C$, $0.01\ g\ m^{-3}$ 만큼 증가하였다.

Figure 7은 Fig. 6과 같은 시간 동안 7 종류의 평균 연산자에 의해 계산된 T , c , q 의 누적 플럭스의 시계열을 나타낸 것이다. 단순 평균에 의해 계산된 현열속의 경우 처음 10분 동안은 음의 값을 그리고 나머지 시간 동안은 양의 값을 보여 30분-평균 현열속은 $0.0\ K\ m\ s^{-1}$ 를 보였다(Fig. 7a). 반면에 선형회귀에 의해 계산된 현열속은 누적 플럭스가 지속적으로 양의 값을 보였지만 30분-평균 현열속은 $0.002\ K\ m\ s^{-1}$ 로 중립의 대기 안정도를 보였다. 누적 CO_2 플럭스와 잠열속은 관측 기간 내내 대체로 증가하여 30분-평균값은 각각 $0.38\ mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ 와 $1.20 \times 10^{-3}\ g\ m^{-2}\ s^{-1}$ 를 보였다(Figs. 7b~c). 불안정한 경우와는 달리 600s와 900s 이동평균에 의한 30분-평균 플럭스가 100s와 300s 이동평균에 의한 플럭스 보다 작은 값을 보였다.

요약하면 평균 연산자에 따른 관측값의 평균과 누적 플럭스의 시계열을 통해 30분 이내의 시간에도 플

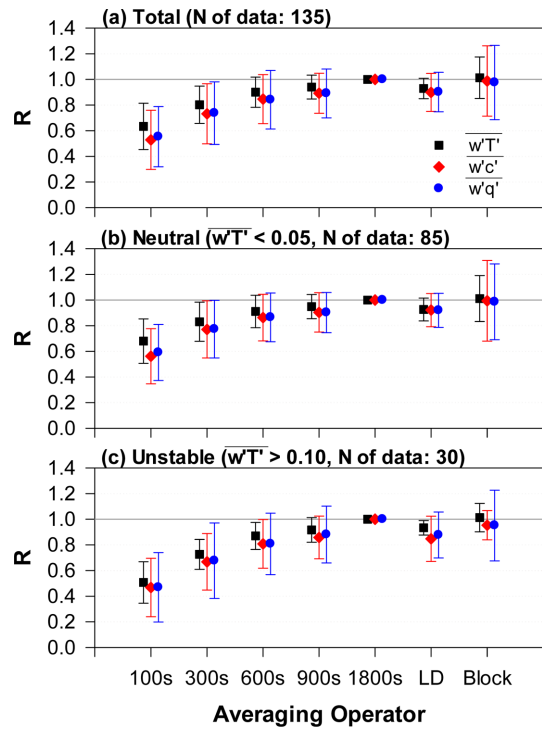


Fig. 8. Case mean and standard deviation of the ratio (R) of T , c , q fluxes computed by seven different average operators (100 s, 300 s, 600 s, 900 s, and 1800 s moving average, linear regression, and block average) to the fluxes computed by 1800 s moving average at (a) all stability, (b) neutral stability, and (c) unstable stability.

럭스가 일정하지 않으며 1분 이내의 짧은 시간 동안 매우 큰 값 또는 매우 작은 값을 포함하고 있거나, 음과 양의 값이 번갈아 가며 나타날 수 있어 특정 시각까지의 누적 플럭스는 평균 연산자에 따라 매우 큰 차를 보일 수 있음을 알 수 있었다.

4.2 안정도와 평균 연산자가 플럭스에 미치는 영향

현열속 wT' 의 값이 0.10 이상인 불안정한 대기의 자료 30개와 0.05 이하인 중립인 대기의 자료 85개를 평균하여 대기 안정도와 평균 연산자가 플럭스에 미치는 평균적인 영향을 살펴 보았다. 관측 기간 중 현열속이 0보다 작은 안정한 대기는 거의 발생하지 않았으며, 이는 도시의 전형적인 특징으로 주간 동안 건물에 저장되었던 열이 야간 동안 재방출되는 것과 주변에서의 에너지 사용으로 인한 인위적인 열배출에 기인한다(Liu *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2014).

3.2절에 제시된 7 종류의 평균 연산자로 계산된 플럭스를 1800s 이동평균으로 계산된 플럭스로 나눈 값으로 T , c , q 의 상대플럭스를

$$R_{T,k} = \frac{\overline{w'T'_k}}{\overline{w'T'_7}}, \quad (7a)$$

$$R_{c,k} = \frac{\overline{w'c'_k}}{\overline{w'c'_7}}, \quad (7b)$$

$$R_{q,k} = \frac{\overline{w'q'_k}}{\overline{w'q'_7}}, \quad (7c)$$

로 각각 정의하였다.

Figure 8은 중립, 불안정, 전체 자료에 대해 7 종류의 평균 연산자별 상대플럭스 $R_{T,k}$, $R_{c,k}$, $R_{q,k}$ 의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 이동평균 시간이 1800 s에서 100 s로 짧아지면서 모든 상대플럭스가 감소하였으며, 선형회귀로 계산된 상대플럭스는 1 이하의 값을, 그리고 단순 평균으로 계산된 상대플럭스는 거의 1의 값을 보였다. 100 s 이동평균으로 계산된 상대플럭스인 $R_{T,3}$, $R_{c,3}$, $R_{q,3}$ 의 값은 중립일 때 각각 0.70, 0.56, 0.59로 불안정할 때인 0.51, 0.47, 0.47에 비해 큰 값을 보였다. 이는 짧은 시간 동안 이동평균한 경우 긴 시간 동안 이동평균에 비해 플럭스가 작아지는데 불안정해질수록 더 많은 영향을 받았음을 의미한다. 한편, 선형회귀로 계산된 상대플럭스는 불안정한 대기에서 T , c , q 의 경우 각각 0.93, 0.85, 0.87을 보여, 중립인 대기에서의 값인 0.93, 0.92, 0.92보다 더 작은 값을 보였으며, 900 s 이동평균으로 계산된 상대플럭스와 비슷한 값을 보였다. 그리고 단순 평균으로 계산된 T 의 상대플럭스는 거의 1에 가까운 값을, c 와 q 의 상대플럭스는 0.95~0.99로 1보다 약간 작은 값을 보였는데 불안정한 경우 더 작은 값을 보였다.

상대플럭스의 표준편차는 평균시간이 짧을수록 커졌으며, T 의 경우가 c 와 q 의 경우보다 작은 값을 보였다. 그리고 단순 평균으로 구한 상대플럭스의 표준편차가 선형회귀로 구한 상대플럭스의 표준편차보다 큰 값을 보였다.

5. 요약 및 결론

서울 동부의 주거 지역에 위치한 중랑 관측소의 18.5 m 에너지수지 관측탑에서 10 Hz로 수집된 바람, 기온, CO₂ 농도, 절대습도 자료를 분석하여 대기 안정도와 평균 연산자가 현열속, 이산화탄소 플럭스, 잠열속에 미치는 영향을 살펴 보았다. 분석에는 2013년 11월 11일부터 13일까지의 자료를 사용했으며, 단순 평균, 선형회귀와 100 s, 300 s, 600 s, 900 s, 180 s 이동평균의 연산자를 적용하였다.

현열속 $w'T'$ 의 값에 따라 불안정한 대기와 중립인 대기로 구분하여 관측값의 연산자별 평균과 누적 플럭스의 시계열 분석을 하였으며, 이를 통해 30분 이

내에도 시간에 따른 플럭스가 일정하지 않으며 누적 플럭스가 순간적으로 급격하게 증가하거나 감소할 수 있어, 특정 시각까지의 누적 플럭스는 평균 연산자에 따라 매우 큰 차를 보일 수 있음을 발견하였다.

다양한 연산자로 계산된 플럭스를 1800 s 이동평균으로 계산된 플럭스로 나눈 값을 상대플럭스로 정의하고 안정도별 평균적인 상대플럭스의 특성을 조사하였다. 이동평균에 의한 플럭스의 경우 평균 시간이 짧을수록 모든 변수에 대한 상대플럭스가 작은 값을 보였고, 불안정한 경우가 중립인 경우 보다 더 작은 값을 보였다. 예를 들어, 100 s 이동평균으로 계산된 T , c , q 의 상대플럭스는 중립일 때는 각각 0.70, 0.56, 0.59를, 그리고 불안정할 때는 각각 0.51, 0.47, 0.47를 보였다. 그리고 900 s 이동평균으로 계산된 상대플럭스는 대체로 선형회귀로 계산된 상대플럭스와 비슷한 값을 보였으며, 1800 s 이동평균으로 계산된 상대플럭스는 단순 평균으로 계산된 상대플럭스와 비슷한 값을 보였다.

이상에서 평균 연산자와 평균 시간의 선정에 따라 계산된 플럭스가 매우 큰 차를 보이며, 정확한 플럭스를 산정하기 위해서 적절한 평균 연산자와 시간의 선정이 매우 중요함을 알 수 있었다. 30 m 높이에서의 플럭스는 30분의 평균 시간이면 충분하고 더 높은 위치에서 1시간 이상의 긴 평균 시간이 필요하다는 연구가 있는 반면(Berger *et al.*, 2001), 긴 시간 동안의 평균이 일정한 플럭스로 수렴되기도 하지만 자료의 분산값을 증가시켜, 평균 시간을 가변적으로 사용해야 한다는 연구도 있다(Sakai *et al.*, 2001; Finnigan *et al.*, 2003; Kanda *et al.*, 2004). 특히 매우 불규칙한 건물로 이루어진 도시에 적용할 때에는 지표의 비균질한 수평 규모를 고려하면 더 짧은 평균 시간이 필요할 수 있으며 이를 명확하게 규명하기 위해 좀 더 많은 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(153-3100-3133-302-350).

REFERENCES

- Aubinet, M., T. Vesala, and D. Papale, 2012: *Eddy covariance A practical guide to measurement and data analysis*. Springer, 438 pp.
- Baldocchi, D., and Coauthors, 2001: Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy

- flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 2415-2434.
- Batchvarova, E., S.-E. Gryning, and C. B. Hasager, 2001: Regional fluxes of momentum and sensible heat over a sub-arctic landscape during late winter. *Bound.-Layer Meteor.*, **99**, 489-507.
- Berger, B. W., J. D. Kenneth, C. Yi, P. S. Bakwin, and C. L. Zhao, 2001: Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a northern forest: flux measurement methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 529-542.
- Clement, R. J., 2004: *Mass and energy exchange of a plantation forest in Scotland using micrometeorological methods (PhD Thesis)*. University of Edinburgh, Edinburgh, 597 pp.
- Culf, A. D., 2000: Examples of the effects of different averaging methods on carbon dioxide fluxes calculated using the eddy correlation method. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **4**, 193-198.
- Finnigan, J., R. Clement, Y. Malhi, R. Leuning, and H. A. Cleugh, 2003: A re-evaluation of long-term flux measurement techniques Part I: Averaging and coordinate rotation. *Bound.-Layer Meteor.*, **107**, 1-48.
- Foken, T., and B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agri. Forest Meteor.*, **78**, 83-105.
- Gash, J. H. C., and A. D. Culf, 1996: Applying a linear detrend to eddy correlation data in real time. *Bound.-Layer Meteor.*, **107**, 1-48.
- Göckede, M., and Coauthors, 2008: Quality control of CarboEurope flux data – Part 1: coupling footprint analyses with flux data quality assessment to evaluate sites in forest ecosystems. *Biogeosciences*, **5**, 433-450.
- Grimmond, C. S. B., and T. R. Oke, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteorol.*, **38**, 1262-1292.
- Gryning, S.-E., and E. Batchvarova, 2009: Measuring meteorology in urban areas – some progress and many problems. In *Meteorological and air quality models for urban areas* (eds. by Baklanov *et al.*), 125-131.
- Hong, J., H. Kwon, J.-H. Lim, Y.-H. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing. *Korean J. Agri. Forest Meteor.*, **11**, 19-26.
- Kaimal, J. C., and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric boundary layer flows Their structure and Measurement*. Oxford University Press, 289 pp.
- Kanda, M., A. Inagaki, M. O., Letzel, S. Raasch, and T. Watanabe, 2004: LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. *Bound.-Layer Meteor.*, **110**, 381-404.
- Kwon, H., and J. Kim, 2010: KoFlux's progress: background, status and direction. *Korean J. Agri. Forest Meteor.*, **12**, 241-263.
- Lee, X., W. Massman, and B. Law, 2004: *Handbook of micrometeorology A guide for surface flux measurement and analysis*. Kluwer Academic Publishers, 250 pp.
- Lee, Y.-H., B. Lee, K. Kahng, S.-J. Kim, and S.-O. Hong, 2013: Quality control and characteristic of eddy covariance data in the region of Nakdong river. *Atmosphere*, **23**, 307-320.
- Lim, H.-J., and Y.-H. Lee, 2008: Processing and quality control of flux data at Gwangneung forest. *Korean J. Agri. Forest Meteor.*, **10**, 82-93.
- Liu, H. Z., J. W. Feng, L. Jarvi, and T. Vesala, 2012: Eddy covariance measurements of CO₂ and energy fluxes in the city of Beijing. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **12**, 7677-7704.
- Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, 1998: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Nordbo, A., L. Jarvi, and T. Vesala, 2012: Revised covariance flux calculation methodologies – effect on urban energy balance. *Tellus B*, **64**, 18184.
- Panofsky, H. A., and J. A. Dutton, 1984: *Atmospheric turbulence Models and Methods for Engineering Applications*. John Wiley & Sons, 397 pp.
- Park, M.-S., S. J. Joo, and C. S. Lee, 2013: Effects of an urban park and residential area on the atmospheric CO₂ concentration and flux in Seoul, Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 503-514.
- _____, _____, and S.-U. Park, 2014: Carbon dioxide concentration and flux at the urban residential area in Seoul, Korea. *Adv. Atmos. Sci.* (in press).
- Rannik, Ü, and T. Vesala, 1999: Autoregressive filtering versus linear detrending in estimation of fluxes by the eddy covariance method. *Bound.-Layer Meteor.*, **91**, 259-280.
- Sakai, R. K., D. R. Fitzjarrald, and K. E. Moore, 2001: Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 2178-2192.
- Song, T., Y. Sun, and Y. Wang, 2013: Multilevel measurements of fluxes and turbulence over an urban landscape in Beijing. *Tellus B*, **65**, 20421.

- Tennekes, H., and J. L. Lumley, 1972: *A first course in turbulence*. The MIT Press, 300 pp.
- Vickers, D., and L. Mahrt, 1997: Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 512-526.
- Yuan, R., M. Kang, S. Park, J. Hong, D. Lee, and J. Kim, 2007: The effects of coordinate rotation on the eddy covariance flux estimation in a hilly KoFlux forest catchment. *Korean J. Agri. Forest Meteor.*, **9**, 100-108.