

단일 높이에서 관측된 저장 플럭스를 사용할 때 발생하는 논 이산화탄소, 수증기, 현열의 순생태계교환량 오차

문민규¹ · 강민석^{1*} · 빈두 말라 타쿠리² · 이정훈³
¹국가농림기상센터, ²연세대학교 대기과학과, ³유량조사사업단
(2015년 8월 28일 접수; 2015년 9월 15일 수정; 2015년 9월 15일 수락)

Errors in Net Ecosystem Exchanges of CO₂, Water Vapor, and Heat Caused by Storage Fluxes Calculated by Single-level Scalar Measurements Over a Rice Paddy

Minkyu Moon¹, Minseok Kang^{1*}, Bindu Malla Thakuri² and Jung-Hoon Lee³

¹National Center for AgroMeteorology, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

²Department of Atmospheric Science, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

³Hydrological Survey Center, 407, Hallyu world-ro, Ilsanseo-gu, Goyang Gyeonggi 411-766, Korea

(Received August 28, 2015; Revised September 15, 2015; Accepted September 15, 2015)

ABSTRACT

Using eddy covariance method, net ecosystem exchange (NEE) of CO₂ (F_{CO_2}), H₂O (LE), and sensible heat (H) can be approximated as the sum of eddy flux (F_C) and storage flux term (F_S). Depending on strength and distribution of sink/source of scalars and magnitude of vertical turbulence mixing, the rates of changes in scalars are different with height. In order to calculate F_S accurately, the differences should be considered using scalar profile measurement. However, most of flux sites for agricultural lands in Asia do not operate profile system and estimate F_S using single-level scalars from eddy covariance system under the assumption that the rates of changes in scalars are constant regardless of the height. In this study, we measured F_C and F_S of CO₂, H₂O, and air temperature (T_a) using eddy covariance and profile system (i.e., the multi-level measurement system in scalars from eddy covariance measurement height to the land surface) at the Chengmicheon farmland site in Korea (CFK) in order to quantify the differences between F_S calculated by single-level measurements (F_{S_single} i.e., F_S from scalars measured by profile system only at eddy covariance system measurement height) and F_S calculated by profile measurements and verify the errors of NEE caused by F_{S_single} . The rate of change in CO₂, H₂O, and T_a were varied with height depending on the magnitudes and distribution of sink and source and the stability in the atmospheric boundary layer. Thus, F_{S_single} underestimated or overestimated F_S (especially 21% underestimation in F_S of CO₂ around sunrise and sunset (0430-0800 h and 1630-2000 h)). For F_{CO_2} , the errors in F_{S_single} generated 3% and 2% underestimation of F_{CO_2} during nighttime (2030-0400 h) and around sunrise and sunset, respectively. In the process of nighttime correction and partitioning of F_{CO_2} , these differences would cause an underestimation in carbon balance at the rice paddy. In contrast, there were little differences at the errors in LE and H caused by the error in F_{S_single} , irrespective of time.

Key words: Eddy covariance, Storage flux, Net ecosystem exchange, Rice paddy, CO₂ profile, H₂O profile, Air temperature profile



* Corresponding Author : Minseok Kang
(ms-kang@ncam.kr)

I. 서 론

에디 공분산 방법(eddy covariance method)을 이용한 이산화탄소(CO_2), 수증기(H_2O), 현열(sensible heat)의 순생태계교환량(net ecosystem exchange, NEE)은 에디 플럭스(eddy flux, F_C)와 저장 플럭스(storage flux, F_S)의 합으로 어렵다(Aubinet *et al.*, 2012). F_C 는 3차원 초음파 풍향풍속계와 기체 분석기로 이뤄진 에디 공분산 시스템의 관측 값을 이용하여 계산하고, F_S 는 F_C 관측 지점과 지면 사이 공간의 스칼라[예, CO_2 농도, H_2O 농도, 기온(T_a) 등]의 변화율을 이용하여 계산한다(Lee, 1998; Finnigan, 2006).

만약 F_C 관측 지점과 지면 사이에서 높이와 관계없이 스칼라 변화율이 동일하다면, 에디 공분산 시스템에서 측정하는 스칼라 변화율만으로 정확한 F_S 를 구할 수 있을 것이다(Papale *et al.*, 2006). 하지만 스칼라의 흡원과 발원의 세기와 분포, 연직 난류 혼합의 정도에 따라 스칼라의 변화율은 높이에 따라 다르게 나타난다(Stull, 1988; Leuning *et al.*, 2000). 따라서 정확한 F_S 를 얻기 위해서는 높이에 따라 달라지는 스칼라의 변화율을 고려하여야 할 것이다. 산림과 같이 식생의 키가 크고 지형이 복잡한 경우에는 높이에 따라 스칼라 변화량의 차이가 뚜렷이 나타난다(Yang *et al.*, 2007; de Araujo *et al.*, 2010).

하지만 높이별 스칼라의 변화율을 측정하기 위해서는 고비용인 층위별 스칼라 분석기(프로파일 시스템)의 도입과 지속적인 관리(보정, 필터교환 등)가 필요하기 때문에, 모든 플럭스 관측지에 해당 장비를 운용하는 것은 쉽지 않은 일이다. 또한, F_S 는 일적산 시 그 크기가 0에 가까워지기 때문에, 관측 목적에 따라서 그 중요성이 감소되기도 한다(Baldocchi *et al.*, 1997; Saito *et al.*, 2005). 실제로, 아시아의 플럭스 관측망인 AsiaFlux(www.asiaflux.net)에 등재된 플럭스 관측지 중 일부 관측지만이 프로파일 시스템을 운용 중에 있다. 그 중 산림이 아닌 식생의 키가 작은 농경지에서의 스칼라 프로파일 관측은 일본의 Mase 관측지가 유일하다(www.asiaflux.net/index.php?page_id=83). Saito *et al.* (2005)은 논에서도 CO_2 변화율이 높이에 따른 차이를 보이고 그 결과 난류 발생이 약할 때(마찰속도가 0.1 m s^{-1} 보다 작을 때), 단일 높이(F_C 관측 높이)에서 측정된 CO_2 의 농도 변화만으로 계산한 F_S 는 프로파일 관측자료를 이용해 계산한 것보다 22% 과소평

가함을 보였다.

본 연구에서는 식생의 키가 작고 지면이 평탄한 농경지에서도 정확한 NEE 산정을 위해서 에디 공분산 관측과 함께 스칼라 프로파일 관측이 추가로 필요하지 알아보았다. 본 질문에 답하기 위해 경기도 여주에 위치한 청미천 농경지 플럭스 관측지(Chengmicheon Farmland Korea, CFK)에서 에디 공분산 방법과 프로파일 시스템을 이용해 논에서 CO_2 , H_2O , T_a 의 F_C 와 F_S 를 측정하였다. 이러한 측정을 통하여 논에서의 1) CO_2 , H_2O , T_a 프로파일의 일변화, 2) 각 스칼라의 NEE 와 F_S , 그리고 NEE 에서 F_S 가 차지하는 비율, 3) 단일 높이에서 측정된 F_S (프로파일 시스템 없이 에디 공분산 시스템만 운용했을 때를 가정한 상황, $F_{S, \text{single}}$)와 프로파일 관측을 이용한 F_S 와의 차이를 정량화하고, 4) 단일 높이에서 측정된 $F_{S, \text{single}}$ 로 NEE 산정 시 발생하는 오차에 대하여 논의하였다.

II. 방법 및 재료

2.1. 연구 대상지

관측은 경기도 여주 청미천 유역 내에 위치한 논에서 실시하였다(CFK; $37^\circ 9' 35'' \text{ N}$, $127^\circ 39' 10'' \text{ E}$, 141m a.s.l., Fig. 1). 이 지역의 연평균 기온은 11.7° C , 연평균 강수량은 1,415mm이다(기상청 국가기후데이터센터, sts.kma.go.kr). 주변은 대체로 균질하며 지형은 평탄하다. 타워 주변으로 500m 반경은 대부분 논으로 구성되어 있고, 북쪽으로 약 500m 거리에 청미천이 있다. 남동쪽으로 약 500m부터 산지가 나타난다. 에디 공분산 관측 풋프린트는 거의($\sim 90\%$) 논 안에 포함된다. 관측은 2014년 8월 21일부터 9월 10일 까지, 21일 동안 이루어졌고, 관측 기간 동안 벼는 등숙기로 키는 약 0.7m(8월 20일 기준)이었다.

2.2. 스칼라의 프로파일 및 에디 플럭스 관측

CO_2 , H_2O , T_a 의 프로파일을 측정하기 위해 대기 프로파일 시스템(Model AP200, Campbell Scientific Inc., USA)를 사용하였다. 지면으로부터 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3, 5, 9m, 여덟 높이에서 측정하였다. 각 높이에서 흡입구를 통해 들어온 공기는 본체에 있는 기체 분석기(Model LI840, LI-COR Inc., USA)를 이용해 1초에 2회 농도를 측정하는데, 각 흡입구마다 15초 동안 측정하고 다음 흡입구로 넘어간다. 이

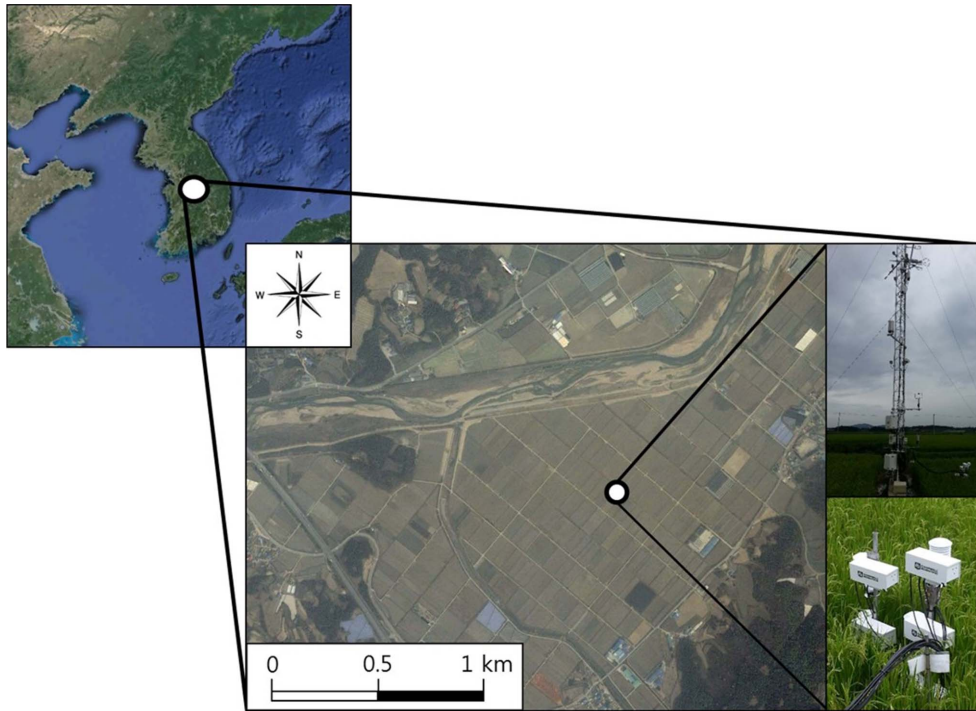


Fig. 1. Location of the Chengmicheon farmland site in Korea (CFK).

중 앞의 10초의 값은 이전 흡입구의 공기와 섞이는 것을 감안하여 무시되고, 뒤에 5초 동안 측정된 값을 이용한다. 이렇게 30분 동안 여덟 높이를 15번 순환하고 30분 평균 값을 계산하여 자료기록기(Model CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다.

에디 플럭스(F_c) 관측을 위해 지면으로부터 9m 높이에 3차원 초음파 풍향 풍속계(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 개회로 CO₂/H₂O 기체 분석기(Model EC150, Campbell Scientific Inc., USA)로 구성된 에디 공분산 시스템을 설치하였다. 에디 공분산 시스템의 샘플링 속도는 10Hz로, 관측된 원시자료는 자료기록기(Model CR3000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장되었다. 원시자료는 EddyPro®(Ver. 5.1.1, LI-COR Inc., USA)를 이용하여, 좌표 보정(Planar fit rotation; Wilczak *et al.*, 2001), 소닉 온도의 수증기 효과 보정(van Dijk *et al.*, 2004), 고역/저역 필터링 효과 보정(Moncrieff *et al.*, 1997), 공기 밀도 보정(Webb *et al.*, 1980)을 적용하여 30분 평균의 F_c 를 계산하였다. 관측자료의 품질 관리 과정으로, 정상 상태 검사와 발달된 난류 상태 검사(Mauder and Foken, 2011), 튀는 자료 제

거(Papale *et al.*, 2006)가 수행되었다. 빈 자료 채우기 방법으로는 주변 분포 표본 추출 방법(Marginal distribution sampling method, Reichstein *et al.*, 2005)을 적용하였다. CO₂ 플럭스(F_{CO_2})의 경우 야간에 약한 난류 수송으로 인해 과소평가되는 자료를 제거하기 위해, 마찰속도가 0.3m s⁻¹ 미만 일 때 자료는 걸러내었다. 생태계 호흡 추정식의 계수들을 산출하기 위한 야간의 온도 범위와 자료 수가 충분치 않아, F_{CO_2} 를 총일차생산량과 생태계호흡량으로 배분하는 작업은 수행하지 못했다. 그 밖에 광합성유효광량(Photosynthetically active radiation, PAR)이 9m 높이에서 광량자센서(Model LI190, LI-COR Inc., USA)로 관측되었다.

Fig. 2는 연구기간 동안에 F_c 관측 높이(9m)에서의 CO₂, H₂O, T_a , PAR의 시계열이다. 연구기간 동안 평균 CO₂, H₂O, T_a 은 각각 424 μ mol mol⁻¹, 21.8mmol mol⁻¹, 22.2°C였고, PAR의 평균 일적산값은 24.1mol m⁻² d⁻¹였다.

2.2. 저장 플럭스의 계산

저장 플럭스(F_s)는 아래의 식과 같이 계산한다(Papale *et al.*, 2006).

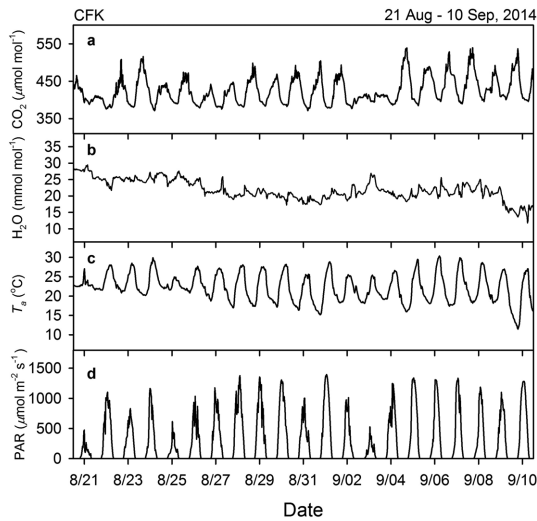


Fig. 2. Time series of (a) CO₂ and (b) H₂O concentrations, (c) air temperature (T_a), and (d) photosynthetically active radiation (PAR) at 9 m height for the study period (21 August to 10 September, 2014).

$$F_S = \int_0^h \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{x_{t,i} - x_{t-1,i}}}{dt} \times Z_i \times \left(\frac{P}{RT_a} \right) \quad (1)$$

여기서 h 는 F_C 측정 높이(m), c 는 스칼라(mol mol⁻¹ 또는 K), $\bar{\quad}$ 는 시간 평균, n 은 스칼라 측정 높이의 수, $x_{t,i}$ 와 $x_{t-1,i}$ 은 각각 시간 t 와 $t-1$ 에서 i 번째 층의 스칼라, dt 는 평균 시간(s), z_i 는 i 번째 층의 깊이 (m), P 는 기압(Pa), R 은 기체상수(8.314m³ Pa K⁻¹ mol⁻¹), T_a 는 기온(K)이다. 단 T_a 의 F_S 를 계산할 때는, 식 (1) 우변의 마지막항 $[P/(RT_a)]$ 대신 공기의 밀도 (ρ , kg m⁻³)와 비열(c_p , J kg⁻¹ K⁻¹)을 곱해준다. 스칼라의 변화율이 모든 높이에서 같다고 가정하여 단일 높이에서의 측정된 CO₂, H₂O, T_a 만으로 추정된 F_S (F_{S_single})는 프로파일 시스템 없이 에디 공분산 시스템만 운용했을 때를 가정한 상황으로서, F_C 관측 높이(9m)의 프로파일 시스템 관측값을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 이산화탄소, 수증기, 기온 프로파일의 일변화

Fig. 3는 연구 기간 동안 하루 중 CO₂, H₂O, T_a 프로파일의 평균 일변화를 보여준다. CO₂ 농도는 F_C 관측 높이인 9m에서 일 변동폭이 가장 작았다(범위: 382-478μmol mol⁻¹), 벼의 생증량이 가장 밀집한

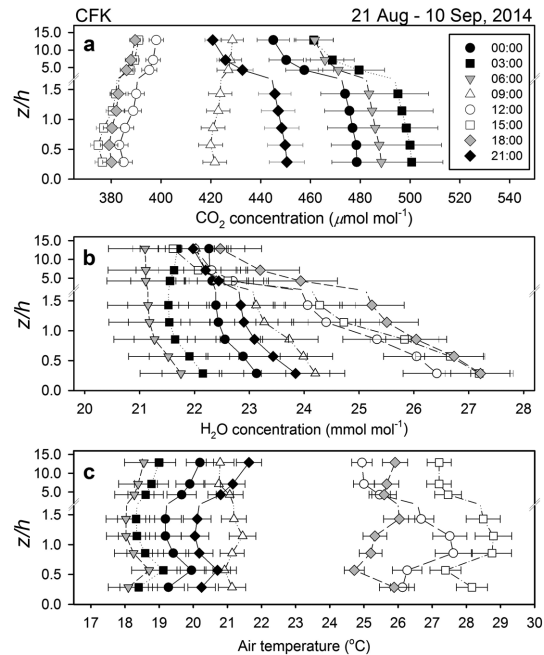


Fig. 3. The mean diurnal variation of scalar profiles for the study period. Each point and error bar represent the average and standard error for 21 days at each time and height, respectively. Y-axes represent the ratio of scalar measurement height to canopy height (z/h).

0.4m에서 가장 큰 일 변동폭을 보였는데(범위: 375-514μmol mol⁻¹), 이것은 주로 벼 잎의 생화학적 반응(광합성과 호흡)의 결과 판단된다. H₂O 농도도 가장 높은 9m에서 가장 일 변동폭이 작았다(범위: 20.5-23.4mmol mol⁻¹). 가장 낮은 높이인 0.2m에서 평균 농도와 일 변동폭 모두 다른 높이보다 컸는데(범위: 21.0-27.8mmol mol⁻¹), 이것은 연구 기간 동안 지면이 시간에 관계없이 항상 H₂O의 발원(증산과 토양 및 자유수면 증발)으로 작용하였다는 것을 의미한다.

T_a 역시 지면으로부터 가장 높은 곳의 일 변동폭이 가장 작았다(범위: 11.5-30.4°C). T_a 의 일 변동폭이 가장 크게 나타난 곳은 벼의 수관 상층부인 0.6-0.8m로 낮 시간에는 태양 복사 흡수로 인한 가열, 밤에는 장파 복사 방출로 인한 냉각이 가장 잘 일어나는 지점이다. 그 밖에 주목할 점은 생증량이 가장 밀집한 0.4m 부근인데, 이 높이에서의 온도 변화폭이 식생 내부(높이 0.2-0.8m 사이)에서 가장 작았다(범위: 18.2-27.9°C). 이것은 온도가 올라가는 낮에는 광합성, 즉 호흡반응에 의해 주변보다 더 낮은 온도를 유지하

고, 반대로 밤에 T_a 가 내려갈 때에는 호흡, 즉 발열반응을 통해 주변보다 더 높은 온도를 유지하기 때문으로 판단된다(Monteith and Unsworth, 2013).

이처럼 CO₂, H₂O, T_a 의 일 변동폭은 모두 지면으로부터 가장 높은 곳인 9m에서 가장 작게 나타나는데, 이를 바탕으로 CO₂, H₂O, T_a 의 프로파일을 사용하지 않은 F_{S_single} 이 과소평가 될 수 있음을 기대할 수 있다. 또한 프로파일의 형태는 각 스칼라의 발원/흡원의 세기와 분포, 대기 경계층의 안정도 변화에 따라 달라지는데, 이 둘은 태양복사의 일변화와 깊게 연관되어 있다(Stull, 1988). 실제 관측된 CO₂, H₂O, T_a 의 프로파일의 형태가 해 뜰 녘과 해 질 녘에 완전히 변하는데, 이 시기에 F_S 가 가장 커짐을 기대할 수 있다.

3.2. 순생태계교환량과 저장 플럭스, 그리고 순생태계교환량에서 저장 플럭스가 차지하는 비율

Fig. 4a, b와 c는 연구 기간 동안의 CO₂ 플럭스 (F_{CO_2}), 잠열 플럭스(LE), 현열 플럭스(H)의 평균 일변화를 보여준다. 연구기간 동안 CFK는 낮에는 광합성

을 통해 CO₂의 흡원(최대 $-0.9\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 내외)으로 작용하였고, 밤에는 호흡을 통한 CO₂의 발원(최대 $0.7\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 내외)으로 작용하였다(Fig. 4a). LE 는 낮과 밤 모두 양의 값(발원, 최대 250W m^{-2} 내외)을 보였다(Fig. 4b). H 는 일출 이후 증가하여 정오쯤 최댓값(50W m^{-2} 내외)을 보이고, 이후 점차 감소하기 시작하여 오후 3시 이후부터 밤까지 열의 흡원(최대 -20W m^{-2} 내외)으로 나타났다(Fig. 4c).

F_S 가 양수일 경우 에디 공분산 관측 높이 아래로 스칼라가 축적되었다는 것을 의미하고, 반대로 음수일 경우 스칼라의 방출을 의미한다. $F_{S_CO_2}$ 는 일출 직후에 급격히 감소하여 오전 8시경 하루 중 최솟값($-0.1\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 내외)을 보인다. 낮 동안에 점점 증가하여 정오쯤 $0\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 다다른다. 이후 일몰을 전후하여 급격하게 증가하여 오후 8시경 하루 중 최댓값($0.1\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 내외)을 나타낸다(Fig. 4d). F_{S_LE} 와 F_{S_H} 도 $F_{S_CO_2}$ 와 마찬가지로 일출 직후 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4e and f). F_{S_LE} 는 일출이 지나고 일정한 패턴이 없이 0W m^{-2} 근처에서 변동하다가, 일몰을 전후하여 급격히 증가하여 하루 중 최댓값(6W

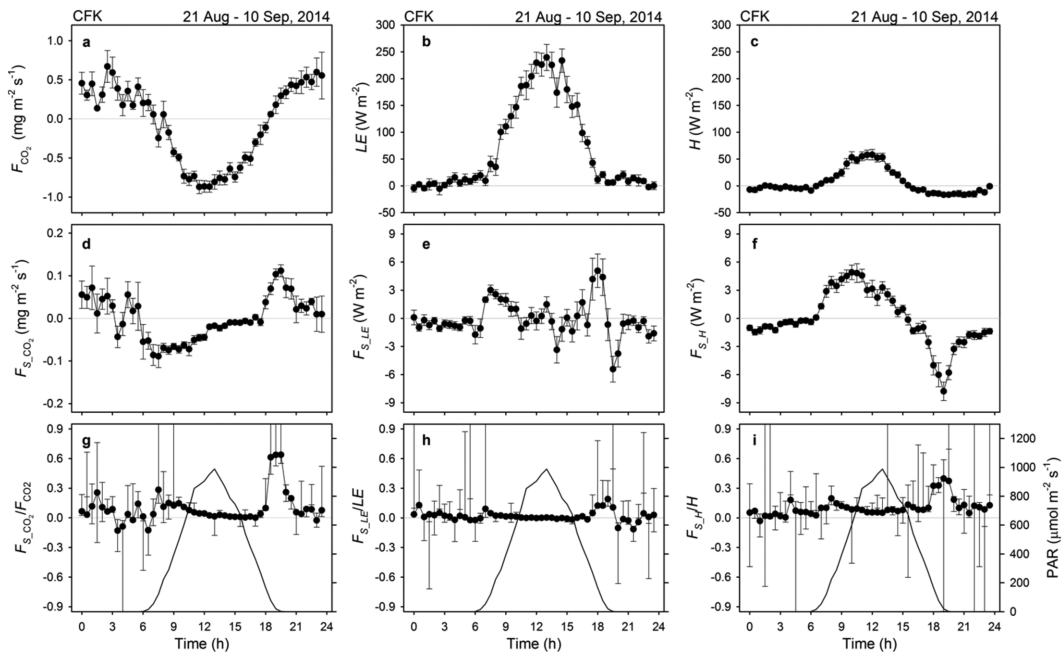


Fig. 4. The mean diurnal course of net ecosystem exchanges of (a) CO₂ (F_{CO_2}), (b) latent heat (LE), and (c) sensible heat (H), and storage fluxes of (d) CO₂ ($F_{S_CO_2}$), (e) latent heat (F_{S_LE}), and (f) sensible heat (F_{S_H}), and the ratios of storage flux to net ecosystem exchange of (g) CO₂ ($F_{S_CO_2}/F_{CO_2}$), (h) latent heat (F_{S_LE}/LE), and (i) sensible heat (F_{S_H}/H) with photosynthetically active radiation (PAR) for the average (or median for the ratios) and standard error for 21 days at each time, respectively.

m^{-2} 내외)을 보였고, 다시 급격히 감소하여 최소값 (-6W m^{-2} 내외)에 다다랐다(Fig. 4e). $F_{S,H}$ 는 일출 이후 지속적으로 증가하여 정오 부근에 최댓값(5W m^{-2} 내외)을 보였다. 이후 서서히 감소하여 약 오후 3 시경 0W m^{-2} 의 값을 보였고, 이후로도 지속적으로 감소하여 일몰 이후에 최솟값(-8W m^{-2} 내외)을 보였다(Fig. 4f).

NEE에서 F_S 가 차지하는 비율은 세 스칼라 모두 일출과 함께 그 비율이 증가하여 0보다 큰 값을 보였고, 낮 동안에는 거의 0에 가까운 값을 보였다. 이후 일몰 직후 세 스칼라 모두 하루 중 최댓값(F_{CO_2} 의 약 70%, LE의 약 20%, H의 약 40%)를 보였으나, F_{S,CO_2} 를 제외한 $F_{S,LE}$ 와 $F_{S,H}$ 는 그 크기가 각 NEE의 평균적인 크기와 비교하여 아주 작은 값이었다. 하루 동안의 NEE에서 F_S 가 차지하는 비율의 평균은 F_{CO_2} 는 8%, LE는 1%, H는 10%이었다.

3.3. 스칼라의 높이별 변화율을 고려하지 않았을 때 저장 플럭스 계산의 오차

앞에서 이야기한대로 스칼라는 높이에 따라 그 변화율이 다르고, 이러한 변화율의 차이는 단일 지점(즉, F_C 관측 지점)의 관측을 이용한 F_S 계산에 오차를 야기한다. Fig. 5는 스칼라의 높이별 변화율을 고려하여 계산한 CO_2 , H_2O , T_a 의 $F_S(F_{S,\text{CO}_2}$, $F_{S,LE}$, and $F_{S,H})$ 와 단일 높이의 스칼라를 이용해 계산한 $F_S(F_{S,\text{CO}_2,\text{single}}$, $F_{S,LE,\text{single}}$, and $F_{S,H,\text{single}})$ 를 비교한 그림이다.

$F_{S,\text{CO}_2,\text{single}}$ 은 낮(0830-1600h), 밤(2030-0400h), 해 뜰 때와 해 질 녘(0430-0800h와 1630-2000h)에 각각 평균 4%, 14%, 21%씩 과소평가하였다(Fig. 5a). $F_{S,LE,\text{single}}$ 의 경우 해 뜰 때와 해 질 녘에 평균 6% 과소평가하였고(Fig. 5b), $F_{S,H,\text{single}}$ 의 경우 낮에는 평균 6%, 해 뜰 때와 해 질 녘에 평균 15%를 과소평가하였고, 밤에는 평균 19% 과대평가 하였다(Fig. 5c).

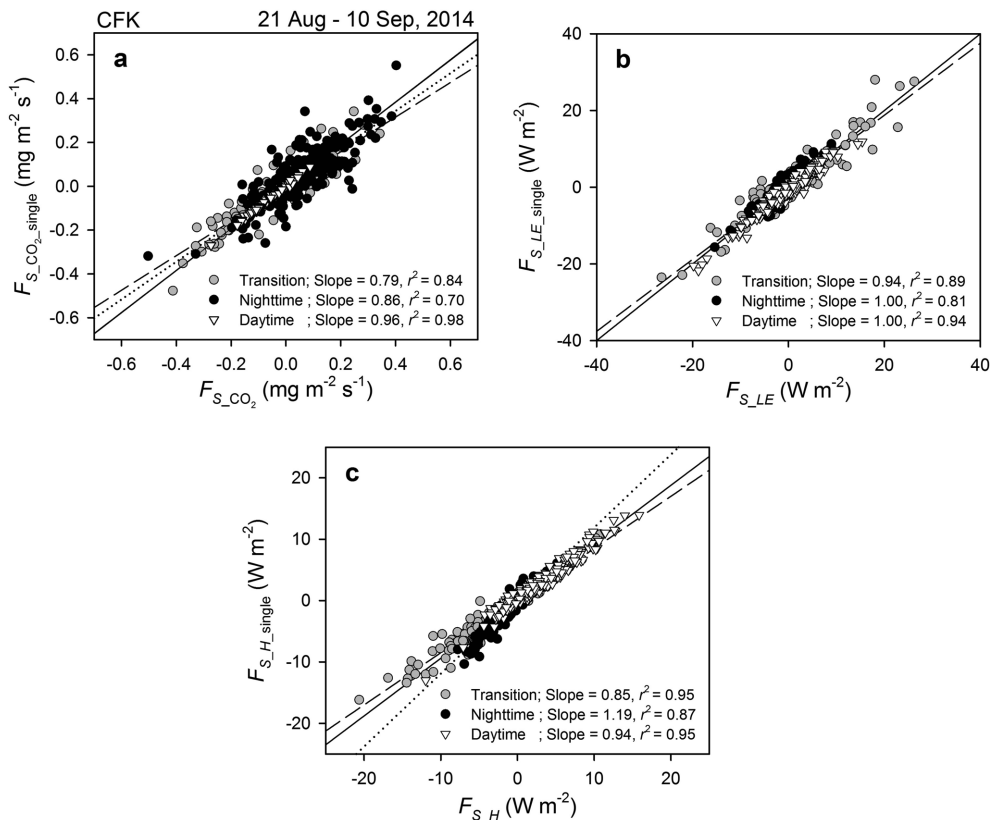


Fig. 5. The relationship between the storage fluxes of (a) CO_2 , (b) H_2O , and (c) heat calculated by single-level measurement ($F_{S,\text{CO}_2,\text{single}}$, $F_{S,LE,\text{single}}$, and $F_{S,H,\text{single}}$, respectively) and the multi-level measurement for the daytime (0830-1600 h), nighttime (2030-0400 h), and transition period (0430-0800 h and 1630-2000 h). The regression lines were forced through the origin. Solid, dotted, and dashed lines for the regressions represent daytime, nighttime, and transition period, respectively.

3.4. 순생태계교환량 산정의 오차

마지막으로 이러한 F_S 계산의 오차로 인해 발생하는 NEE 계산의 오차를 정량화하였다. 전체 연구기간(21일) 동안의 F_{CO_2} , LE , H 를 스칼라의 높이별 변화를 고려한 것(F_{CO_2} , LE , H)과 그렇지 않은 것($F_{CO_2_single}$, LE_{single} , H_{single})의 일적산을 비교하였을 때, 기대했던 대로 거의 차이를 보이지 않았다(모든 플럭스에 대하여 0.5% 미만). 이러한 이유로는 논에서 F_S 가 NEE 에 차지하는 비중이 상대적으로 작은데다가, 주간과 야간의 F_S 가 일적산시 서로 상쇄되어 0에 가까워지기 때문이다(Fig. 4d, e, and f). 실제로, 전체 연구기간 평균 일적산은 $F_{S_CO_2}$, F_{S_LE} , F_{S_H} 각각 $0.02 \pm 0.19 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $0 \pm 0.01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $0 \pm 0.02 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 매우 작았다.

하지만 30분 단위의 짧은 시간 규모의 과정을 이해하는데 NEE 자료를 사용하는 경우라면 이야기는 달라진다[예, 정보 흐름 과정망 분석(Yun *et al.*, 2014), F_{CO_2} 의 야간 자료 보정 및 배분(Kang *et al.*, 2014)]. 앞에서 본 결과와 같이 특정 시간(특히, 해 질 무렵) NEE 에서 F_S 가 차지하는 비율이 급격히 증가하는 경우(특히, CO₂)가 있으며(Fig. 4g, h, and i), 이 때 F_S 와 F_{S_single} 의 차이도 크게 나타난다.

F_{CO_2} 는 밤(2030-0400h)과 해 뜰 때와 해 질 녘(0430-0800h와 1630-2000h)에 $F_{CO_2_single}$ 은 각각 평균적으로 3%와 2%씩 F_{CO_2} 를 과소평가했다(낮 시간 차이는 0.5% 미만). 이 같은 결과는 F_{CO_2} 가 F_{CO_2} 의 야간 자료 보정 및 배분에 큰 영향을 줄 수 있다. 즉 야간에는 난류 수송이 약하기 때문에 이류에 의한 효과가 커지는데, NEE 를 총일차생산량(gross primary production, GPP)과 생태계호흡량(ecosystem respiration, R_E)으로 배분하기 위해서는 1) 이러한 이류의 효과가 작은 관측자료만 선별하여 온도와의 관계식을 이끌어내고, 2) 이류 효과에 영향을 받은 자료는 그 관계식을 이용해 추정값으로 교체함(van Gorsel *et al.*, 2009)을 생각해볼 때, 이러한 차이는 플럭스 타워에서 관측된 논의 탄소수지를 과소평가하게 할 수 있다. F_{CO_2} 와 달리 LE 와 H 는 시간에 관계없이 그 차이가 0.5% 미만 이었다. 따라서 정확한 탄소 수지를 산정하기 위해서는 프로파일 관측이 필요한 것으로 판단된다. 여건상 프로파일 관측이 어려운 경우, (1) 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO₂ 플럭스와 농도, 풍속, 마찰속도, 대기안정도 등을 활용하여 CO₂ 프로파일을

모델링(예, Campbell and Norman, 1998)하고, (2) 추정된 프로파일을 사용하여 $F_{S_CO_2}$ 를 계산하는 방안을 시도해볼 수 있다.

적 요

에디 공분산 방법(eddy covariance method)을 이용한 이산화탄소(CO₂), 수증기(H₂O), 현열(sensible heat)의 순생태계교환량[net ecosystem exchange (NEE)]은 에디 플럭스(eddy flux, F_C)와 저장 플럭스(storage flux, F_S)의 합으로 어렵한다. 스칼라의 흡원과 발원의 세기와 분포, 연직 난류 혼합의 정도에 따라 스칼라의 변화율은 높이에 따라 다르게 나타난다. 따라서 정확한 F_S 를 얻기 위해서는 프로파일 시스템을 운용하여 높이에 따라 달라지는 스칼라의 변화율을 고려하여야 한다. 하지만 아시아의 대부분의 농경지 관측지에서는 프로파일 시스템을 운용하지 않고, F_C 관측 지점과 지면 사이에서 높이와 관계없이 스칼라 변화율이 동일하다는 가정하에 에디 공분산 시스템에서 관측되는 스칼라 변화율만으로 F_S 를 산정한다. 본 연구에서는 논에서 에디 공분산 관측 높이에서 측정된 F_S (프로파일 시스템에서 관측된 단일 높이의 스칼라만을 이용한 F_S , F_{S_single})와 프로파일 관측(에디 공분산 관측 지점과 지면 사이의 여러 높이에서 스칼라 관측)을 이용한 F_S 와의 차이를 정량화하고, F_{S_single} 로 NEE 를 산정할 때 발생하는 오차를 확인하기 위해, 경기도 여주에 위치한 청미천 농경지 플럭스 관측지(Chengmicheon Farmland Korea, CFK)에서 에디 공분산 방법과 프로파일 시스템을 이용해 CO₂, H₂O, 기온(T_a)의 F_C 와 F_S 를 측정하였다. CO₂, H₂O, T_a 는 흡원과 발원의 강도와 분포, 대기 경계층의 안정도에 따라 높이별로 변화율이 달랐고, 그 결과 F_{S_single} 은 F_S 를 과소 또는 과대 평가하였다(특히, 해 질 녘과 해 뜰 녘(0430-0800h와 1630-2000h)에 CO₂의 F_S 를 평균 21% 과소평가]. F_{S_single} 로 인해 발생하는 NEE 계산의 오차는 F_{CO_2} 의 경우, 하루 중 시간에 따라 밤(2030-0400h), 해 질 녘과 해 뜰 녘에 각각 평균적으로 3%, 2%씩 F_{CO_2} 를 과소평가했다. 이러한 차이는 F_{CO_2} 의 야간 자료 보정과 분배의 과정에서 논의 탄소수지를 과소평가하게 할 수 있다. 이외는 다르게 LE , H 의 경우 시간에 관계없이 거의 차이를 보이지 않았다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(KMA-2012-0001-A). 청미천 관측지에서 관측이 이뤄질 수 있도록 협조해주신 한강홍수통제소에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Aubinet, M., T. Vesala, and D. Papale, 2012: *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science & Business Media, 10pp.
- Baldocchi, D. D., C. A. Vogel, and B. Hall, 1997: Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **83**(1-2), 147-170.
- Campbell, G. S., and J. M. Norman, 1998: *Introduction to Environmental Biophysics*. Springer Verlag, 95pp.
- de Araujo, A. C., A. J. Dolman, M. J. Waterloo, J. H. C. Gash, B. Kruijt, F. B. Zanchi, J. M. E. de Lange, R. Stoevelaar, A. O. Manzi, A. D. Nobre, R. N. Lootens, and J. Backer, 2010: The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**(2), 226-237.
- Finnigan, J., 2006: The storage term in eddy flux calculations. *Agricultural and Forest Meteorology* **136**, 108-113.
- Kang, M., J. Kim, H.-S. Kim, B. M. Thakuri, and J.-H. Chun, 2014: On nighttime correction of CO₂ flux measured by eddy covariance over temperature forests in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(3), 233-245.
- Lee, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* **91**(1), 39-49.
- Leuning, R., O. T. Denmead, A. Miyata, and J. Kim, 2000: Source/sink distributions of heat, water vapour, carbon dioxide and methane in a rice canopy estimated using Lagrangian dispersion analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* **104**(3), 233-249.
- Mauder, M., and T. Foken, 2011: *Documentation and instruction manual of the eddy-covariance software package TK3*. Univ., Abt. Mikrometeorologie.
- Moncrieff, J. B., J. Massheder, H. De Bruin, J. Elbers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Søgaard, and A. Verhoef, 1997: A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology* **188**, 589-611.
- Monteith, J., and M. Unsworth, 2013: *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. Academic Press, 298pp.
- Papale, D., M. Reichstein, M. Aubinet, E. Canfora, C. Bernhofer, W. Kutsch, B. Longdoz, S. Rambal, R. Valentini, T. Vesala, and D. Yakir, 2006: Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* **3**(4), 571-583.
- Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grunwald, K. Havrankova, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J.-M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir, and R. Valentini, 2005: On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* **11**(9), 1424-1439.
- Saito, M., A. Miyata, H. Nagai, and T. Yamada, 2005: Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology* **135**(1), 93-109.
- Stull, R. B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*: Springer Science & Business Media, 381-382pp.
- van Dijk, A., A. Moene, and H. De Bruin, 2004: *The principles of surface flux physics: theory, practice and description of the ECPACK library*. Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, 42pp.
- van Gorsel, E., N. Delapierre, R. Leuning, A. Black, J. W. Munger, S. Wofsy, M. Aubinet, C. Feigenwinter, J. Beringer, D. Bonal, B. Z. Chen, J. Q. Chen, R. Clement, K. J. Davis, A. R. Desai, D. Dragoni, S. Etzold, T. Grunwald, L. H. Gu, B. Heinesch, L. R. Hutyrá, W. W. P. Jans, W. Kutsch, B. E. Law, M. Y. Leclerc, I. Mammarella, L. Montagnani, A. Noormets, C. Rebmann, and S. Wharton, 2009: Estimating nocturnal ecosystem respiration from the vertical turbulent flux and change in storage of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**(11), 1919-1930.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **106**(447), 85-100.
- Wilczak, J. M., S. P. Oncley, and S. A. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**(1), 127-150.
- Yang, B., P. J. Hanson, J. S. Riggs, S. G. Pallardy, M. Heuer, K. P. Hosman, T. P. Meyers, S. D. Wullschlegel, and L. H. Gu, 2007: Biases of CO₂ storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO₂ density averaging. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **112**(D20).
- Yun, J., S. Kim, M. Kang, C.-H. Cho, J.-H. Chun, and J. Kim, 2014: Process networks of ecohydrological systems in

a temperate deciduous forest: A complex systems perspective. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(3), 157.
Asiaflux, www.asiaflux.net/index.php?page_id=83 (accessed in

August 2015).
National Climate Data Service System, sts.kma.go.kr (accessed in August 2015).