

단일 높이에서 관측된 저장 플럭스를 사용할 때 발생하는 논의 이산화탄소, 수증기, 현열 순생태계교환량의 오차

문민규¹, 강민석^{1*}, 빈두 말라 타쿠리²

¹국가농림기상센터, ²연세대학교 대기과학과

Errors in Net Ecosystem Exchange Caused by Storage Flux Calculated by Single-Level Scalar Measurements over a Rice Paddy

Minkyu Moon¹, Minseok Kang^{1*}, and Bindu Malla Thakuri²

¹National Center for Agro-Meteorology

²Department of Atmospheric Science, Yonsei University

I. 서 언

에디 공분산 방법을 이용한 이산화탄소(CO₂), 잠열(latent heat), 현열(sensible heat)의 순생태계 교환(net ecosystem exchange, *NEE*)은 에디 플럭스(eddy flux, F_C)와 저장 플럭스(storage flux, F_S)의 합을 어렵한다. F_C 는 삼차원 초음파 풍향풍속계와 가스 분석기의 관측값을 이용하여 계산하고, F_S 는 에디 공분산 관측 지점에서 지면 사이의 공간의 스칼라(e.g., 이산화탄소, 수증기, 기온)의 변화량을 이용하여 계산한다.

만약 에디 플럭스 관측 지점과 지면 사이에서 높이와 관계없이 스칼라 변화량이 동일하다면, 에디 공분산 시스템에서 측정하는 스칼라만으로 정확한 F_S 를 구할 수 있을 것이다. 하지만 스칼라의 흡원과 발원의 분포, 연직 난류 혼합의 정도에 따라 스칼라의 변화량은 높이에 따라 다르게 나타난다(Papale *et al.*, 2006). 따라서 정확한 F_S 를 구하기 위해서는 높이에 따른 스칼라의 변화량 고려하여야 할 것이다. 산림과 같이 식생의 키가 크고 지형이 복잡한 경우에는 높이에 따라 스칼라 변화량의 차이가 뚜렷이 나타난다(Kang *et al.*, 2014).

하지만 높이에 따른 스칼라의 변화량을 측정하기 위해서는 에디 공분산 시스템과는 별도의 값비싼 장비와 지속적인 관리가 필요하기 때문에, 모든 플럭스 사이트에 장비를 갖추는 것은 쉽지 않은 일이다. 실제로 AsiaFlux에 등재된 플럭스 사이트 중 일부 사이트만이 높이에 따른 스칼라의 변화량을 측정할 수 있는 프로파일 시스템을 갖추고 있다. 그 중 산림이 아닌 논에서의 프로파일 관측은 일본의 Mase 사이트가 유일하다(<http://asiaflux.net>). Saito *et al.*(2006)는 논처럼 식생 키가 작은 경우에도 이산화탄소 변화량이 높이에 따른 차이를 보이고, 그 결과 단일 높이(에디 공분산 관측 높이)에서 측정한 이산화탄소의 농도 변화는 F_S 를 과소평가함을 보였다.

본 연구는 경기도 여주에 위치한 청미천(Chengmicheon Farmland Korea, CFK)에서 에디 공분산 방법과 프로파일 시스템을 이용해 논에 에디 플럭스와 높이에 따른 이산화탄소와 수증기 농

5) Correspondence to : ms-kang@ncam.kr

도, 기온의 변화량 측정하였다. 이러한 측정을 통해, 1) 단일 높이(에디 공분산 관측 높이)에서 측정된 $F_S(F_{S_single})$ 와 높이에 따른 변화량을 고려한 F_S 와의 차이를 정량화하고, 2) F_S 의 측정이 NEE 산정에 미치는 영향에 대하여 논의하였다.

II. 재료 및 방법

관측은 경기도 여주 청미천 유역 내에 위치한 논에서 실시하였다(CFK; 37° 9' 35" N, 127° 39' 10"E, 141 m a.s.l.). 이 지역의 연평균 기온은 11.7 °C, 연평균 강수량은 1,415 mm이다. 실험 기간(2014년 8월 21일에서 9월 10일, 등숙기) 동안의 비의 키는 약 0.7 m 이었다. 삼차원 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)와 개회로 가스분석기(EC150, Campbell Scientific Inc.)는 지면에서 9 m 높이에 설치하였다. 프로파일 시스템(AP200, Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 이산화탄소, 수증기, 기온을 높이별로 측정하였고 설치 높이는 지면으로부터 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3, 5, 9 m 이었다(Fig. 1).

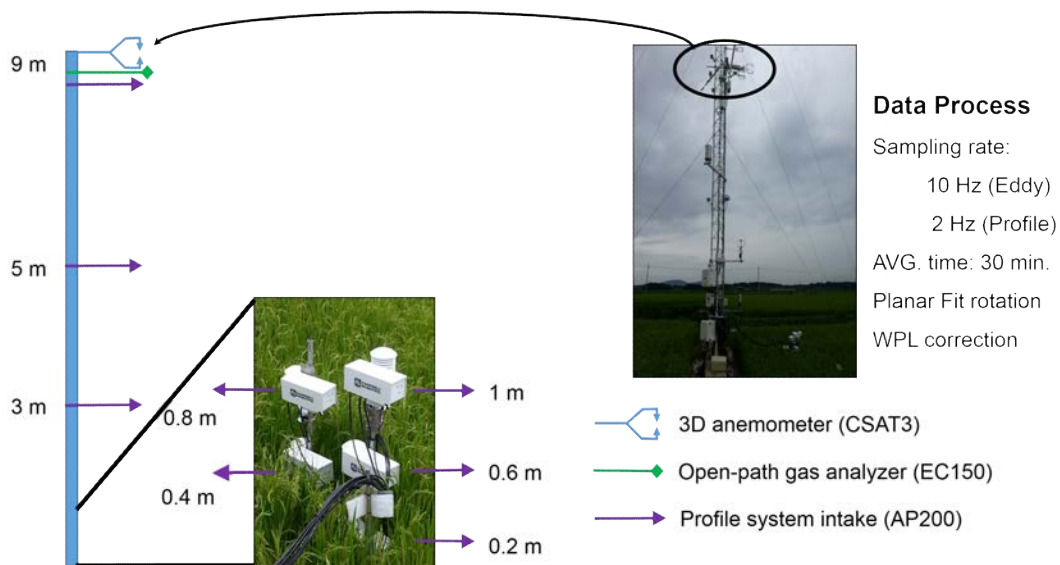


Fig. 1. Eddy covariance system (CSAT3, Campbell Scientific Inc.; EC150, Campbell Scientific Inc.) and CO₂/H₂O concentration profile system (AP200, Campbell Scientific Inc.) at the CFK site.

III. 결과

Fig. 2는 연구 기간 동안 하루 중 연직 프로파일의 평균적인 변화를 보여준다. 이산화탄소 농도는 F_C 관측 높이인 9 m에서 일 변동폭이 가장 작았고, 비의 생증량이 가장 밀집한 0.4 m에서 잎의 생화학적 반응(광합성과 호흡)의 결과로 가장 큰 변동을 보인 것으로 판단된다. 수증기 농도도 가장 높은 9 m에서 가장 일 변동폭이 작았다. 가장 낮은 높이인 지면에서 0.2 m에서 평

균 농도와 일 변동폭 모두 다른 높이보다 컸다. 기온 역시 지면에서 가장 높은 곳의 변동이 가장 작았다. 기온이 최댓값을 보이는 곳은 벼의 수관 상층부인 0.6-0.8 m에서였는데, 이곳은 식생이 낮 시간에 태양의 복사 에너지를 가장 먼저 받는 곳이기 때문이다. 주목할 점은 생중량이 가장 밀집한 0.4 m 부근인데, 이 높이에서의 온도 일 변동폭이 식생 내부(0.2-0.8 m)에서 가장 작았다. 이것은 온도가 올라가는 낮에는 광합성, 즉 흡열 반응에 의해 주변보다 더 낮은 온도를 유지하고, 반대로 밤에 기온이 내려갈 때에는 호흡, 즉 발열 반응을 통해 주변보다 더 높은 온도를 유지하기 때문인 것으로 판단된다.

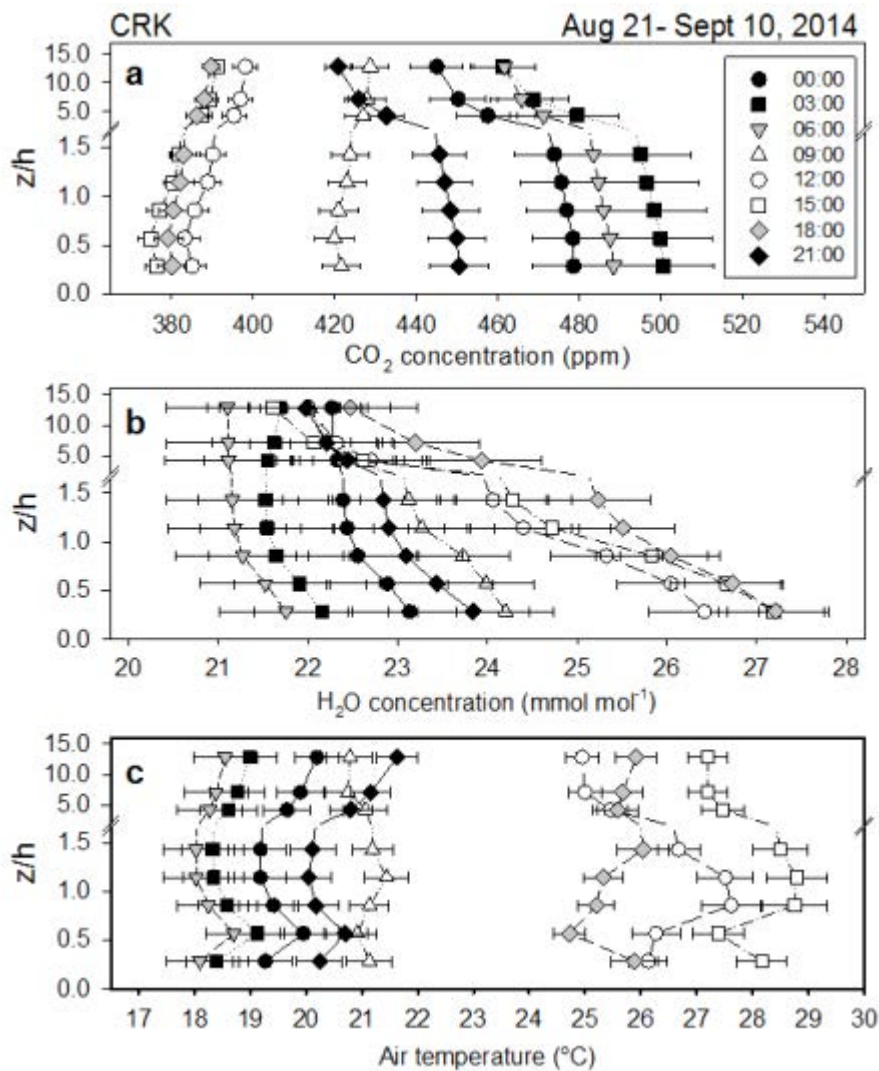


Fig. 2. The mean diurnal variation of scalar profiles for the study period (from 21 August to 10 September, 2014). Each point and error bar represent average and standard deviation for 21 days at each time and height, respectively.

이러한 높이에 따른 스칼라 변화량의 차이로, 단일 높이(에디 공분산 관측 높이, 9 m) 에서 측정된 $F_S(F_{S_single})$ 와 스칼라 프로파일을 이용해 측정된 F_S 사이에 차이가 발생하였다(Fig. 3).

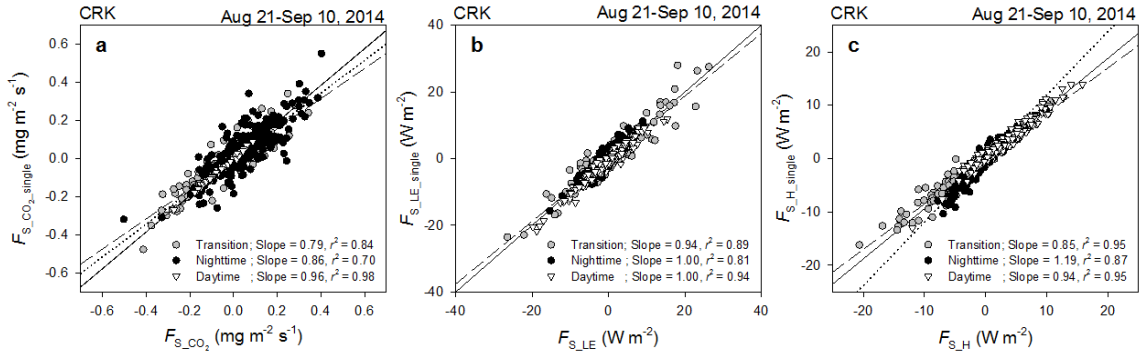


Fig. 3. The relationship between the storage flux from the single-level (F_{S_single}) and the multi-level measurement (F_S) for the daytime (0830-1600 h), nighttime (2030-0400 h), and transition period (0430-0800 h and 1630-2000 h).

이산화탄소의 F_{S_single} 은 낮(0830-1600 h), 밤(2030-0400 h), 해 뜰 녀과 해 질 녀(0430-0800 h 와 1630-2000 h)에 각각 평균 4%, 16%, 21% 씩 과소평가 하였다(Fig. 3a). 잠열 플럭스의 경우, 해 뜰 녀과 해 질 녀에 평균 6% 과소평가 하였다(Fig. 3b). 현열 플럭스의 경우, 낮에는 평균 6%, 해 뜰 녀과 해 질 녀에 평균 15%를 과소평가 하였고, 밤에는 평균 19% 과대평가 하였다(Fig. 3c).

이러한 시간대별 과소평가 혹은 과대평가에도 불구하고 전체 연구기간(21일) 동안의 이산화탄소, 잠열, 현열 플럭스의 적산 값에는 거의 영향을 미치지 않았다(이산화탄소 플럭스: -0.4%, 잠열 플럭스: 0.07%, 현열 플럭스: 0.03%). 이러한 이유로는 논에서 F_S 가 순생태계교환(NEE)에 차지하는 비중이 작은데다가 (평균적으로, 이산화탄소 플럭스: 8%, 잠열 플럭스: 1%, 현열 플럭스: 10%), 주간과 야간의 저장 플럭스 산정 오차가 서로 상쇄되기 때문이다.

하지만 특정 시간대의 생물-대기간 상호작용을 이해하기 위해서나 (예, 야간 이산화탄소 순생태계교환량(NEE) 관측자료를 사용하여, 온도-생태계 호흡 간의 관계식을 추정), 위성영상을 통해 추정한 NEE 값의 검증은 위해서는 적산 값이 아닌 시간 단위의 플럭스 자료가 요구된다. 이 경우에는, 단일 높이(에디 공분산 관측 높이)에서 측정된 F_{S_single} 의 오차를 무시할 수 없을 것이다 (특히, 해 뜰 녀과 해 질 녀를 포함한 야간).

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다.(153-3100-3133-302-350) 청미천 관측지에서 관측이 이뤄질 수 있도록 협조해주시고, 분석을 위한 기상자료를 제공해주신 유량조사사업단께 감사드립니다.

인용문헌

- Kang, M., J. Kim. , H. S. Kim, B. M. Thakuri, J. H. Chun, 2014: On the Nighttime Correction of CO₂ Flux Measured by Eddy Covariance over Temperature Forests in Complex Terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **16**(3), 231-243.
- Papale, D., M. Reichstein, M. Aubinet, E. Canfora, C. Bernhofer, W. Kutsch, B. Longdoz, S. Rambal, R. Valentini, T. Vesala, 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.
- Saito, M., A. Miyata, H. Nagai, T. Yamada, 2005: Seasonal Variation of Carbon Dioxide Exchange in Rice Paddy Field in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**(1), 93-109.
- <http://www.asiaflux.net/>(2015. 7. 25)