

표준화된 KoFlux 에디 공분산 자료 처리 방법의 변화와 개선

강민석^{1*} · 김준^{2,3,4,5} · 이승훈^{1,2} · 김종호¹ · 천정화⁶ · 조성식^{1,2}

¹국가농림기상센터, ²서울대학교 협동과정 농림기상학전공,
³서울대학교 생태조경·지역시스템공학부, ⁴서울대학교 평창캠퍼스 그린바이오과학기술연구원,
⁵서울대학교 농업생명과학연구원, ⁶국립산림과학원 산림보전부
(2018년 3월 6일 접수; 2018년 3월 29일 수정; 2018년 3월 29일 수락)

Changes and Improvements of the Standardized Eddy Covariance Data Processing in KoFlux

Minseok Kang^{1*}, Joon Kim^{2,3,4,5}, Seung-Hoon Lee^{1,2}, Jongho Kim¹,
Jung-Hwa Chun⁶ and Sungsik Cho^{1,2}

¹National Center for AgroMeteorology, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

²Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

³Department of Landscape Architecture & Rural Systems Engineering, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

⁴Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University Pyeongchang Campus,
1447, Pyeongchang-daero, Deahwa-myeon, Pyeongchang, 25354, Korea

⁵Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

⁶Division of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, 57, Hoegi-ro,
Dongdaemun-gu, Seoul, 02455, Korea

(Received March 6, 2018; Revised March 29, 2018; Accepted March 29, 2018)

ABSTRACT

The standardized eddy covariance flux data processing in KoFlux has been updated, and its database has been amended accordingly. KoFlux data users have not been informed properly regarding these changes and the likely impacts on their analyses. In this paper, we have documented how the current structure of data processing in KoFlux has been established through the changes and improvements to ensure transparency, reliability and usability of the KoFlux database. Due to increasing diversity and complexity of flux site instrumentation and organization, we have re-implemented the previously ignored or simplified procedures in data processing (e.g., frequency response correction, stationarity test), and added new methods for CH₄ flux gap-filling and CO₂ flux correction and partitioning. To evaluate the effects of the changes, we processed the data measured at a flat and homogeneous paddy field (i.e., HPK) and a deciduous forest in complex and heterogeneous topography (i.e., GDK), and quantified the differences. Based on the results from our overall assessment, it is confirmed that (1) the frequency response correction (HPK: 11~18% of biases for annually integrated values, GDK: 6~10%) and the stationarity test (HPK: 4~19% of biases for annually integrated values, GDK: 9~23%) are important for quality control and (2) the minimization of the missing



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

data and the choice of the appropriate driver (rather than the choice of the gap-filling method) are important to reduce the uncertainty in gap-filled fluxes. These results suggest the future directions for the data processing technology development to ensure the continuity of the long-term KoFlux database.

Key words: Eddy covariance, Data processing, Standardization, KoFlux, Continuity

I. 서 론

지역 및 전 지구 규모의 지면-대기간 물질, 에너지, 정보 교환에 대한 이해를 증진하기 위해, 에디 공분산 기술을 사용한 플럭스 관측지의 수가 전 세계적으로 늘어나고 있다(http://fluxnet.fluxdata.org, Baldocchi, 2014). 이에 따라, 표준화된 자료의 구축과 이를 기반으로 한 통합 연구도 활발하게 진행되고 있다(예, Saigusa *et al.*, 2013; Ichii *et al.*, 2017; Reichstein *et al.*, 2014; Chu *et al.*, 2017). 이러한 자료의 통합 과정에서 항상 주요 쟁점이 되는 부분은 (1) 자료 처리 과정에서 생기는 불확도의 크기와 (2) 오차를 최소화(참값에 가장 가까운, 혹은 가까울 것이라 예상되는)하는 자료 처리 방법에 관한 문제이다. 자료를 처리하는 방법에 따라 플럭스의 적산값이 상당한 차이를 보임을 고려할 때(예, Ueyama *et al.*, 2012), 각 관측 자료를 일관성 있게 비교할 수 있도록 모든 관측지에 동일하게 적용할 최적의 표준화된 방법을 사용하는 것이 매우 중요하다.

국내 플럭스 관측망(Korea Flux Monitoring Network, KoFlux)은 2002년 1월 공식 출범한 이후 에디 공분산 시스템으로 관측된 플럭스 자료의 처리와 개선에 관련된 논문을 지속적으로 발표해왔다. Hong and Kim (2002)은 방대한 플럭스 관측 자료를 효율적이고, 일괄적으로 처리할 수 있는 초기 KoFlux 프로그램을 구축, 문서화하였다. Yuan *et al.*(2007)은 개선된 좌표 변환 방법인 평면 맞추기 회전(planar-fit rotation, Wilczak *et al.*, 2001)을 복잡 산림 지형에 위치한 광릉 활엽수림 관측지에 적용하였다. 그 적용 가능성과 효과를 평가한 결과, 일반적인 좌표 변환 방법인 '이중 회전(double rotation)'과의 차이가 바람이 강할 때는 무시할 만 하지만 바람이 약할 때는 커짐을 보였다. Kwon *et al.*(2007)은 품질 관리 및 보정 방법을 소개하고 해당 방법을 사용하여 얻은 결과를 문서화하였다. Hong *et al.*(2009)은 전구 플럭스 관측망인 FLUXNET

에서 사용 중인 표준화된 방법들(예, 연속된 3개의 관측값의 차이를 이용하여 튀는 자료 찾기, 결측 자료를 메우기 위한 주변 분포 표본 추출법)을 사용하여 자료를 처리할 수 있도록 KoFlux 자료 처리 방법을 개선하였으며, 처리 방법이 다른 경우에 생길 수 있는 불확실성을 정량화 하였다. Kang *et al.*(2014)은 광릉의 복잡 산림지형에 위치한 두 KoFlux 관측지(비탈진 산사면 상부에 위치한 활엽수림과 하부에 위치한 침엽수림 관측지)에서 세 가지의 대표적인 야간 이산화탄소(CO₂) 플럭스 자료 보정 방법(마찰속도 방법, 광 반응 곡선 방법, 이류(advection)를 고려한 van Gorsel 방법)을 적용하였고, 그 결과를 기상학적인 관점과 생태학적인 관점에서 평가하였다. 보정 과정에서 선별된 자료 중에 이미 CO₂ 이류의 영향을 받은 자료의 유무에 따라 각 보정 방법의 결과가 차이를 보일 수 있음에 착안하여, Kang *et al.*(2017)은 새로운 방법을 제안하였다. 두 관측지의 CO₂ 농도의 연직 프로파일의 시계열 자료에 정보 이론을 적용한 과정망(process network) 분석을 수행, 두 관측지 간의 정보의 흐름을 분석하여 언제 CO₂의 이류가 발생하는지를 확인하였다. 이를 바탕으로 이류의 영향을 받은 플럭스 관측값을 제거할 수 있는 관측지에 특화된 품질관리 필터를 개발하였다. 온실가스 플럭스의 에디 공분산 관측 및 자료 처리와 관련하여, Kang *et al.*(2015)은 개회로 파장 변조 분광법을 기반으로 관측된 메탄(CH₄) 플럭스의 주요 보정 과정들(주파수 반응 보정, 공기 밀도 보정, 분광 보정)을 문서화하였고, 보정 후 메탄 플럭스의 크기가 평균 20-25% 증가함을 보여주었다.

KoFlux의 에디 공분산 자료 처리 과정은 아시아 플럭스 관측망(AsiaFlux)의 선도 연구 프로그램인 CarboEastAsia (Kim *et al.*, 2013)에서 중국(ChinaFlux)과 일본(JapanFlux)의 자료 처리 과정과 비교한 바 있다(Takagi *et al.*, 2008; Saigusa *et al.*, 2013). 그 결과, 플럭스 값의 전반적인 계절변동은 유사하게 나타났지만, 비성장기간에 관측된 음의 순생태

계교환량의 처리(제거 여부)에 따라 상당한 차이가 발생됨을 확인하였다. 이러한 상호 비교의 노력을 통해 자료 처리 과정에 따른 불확도는 어느 정도 평가되었지만, AsiaFlux가 일반적으로 공유할 수 있는 표준화된 자료 처리 방법은 아직까지 도출되지 않았으며, 각 관측망 별로 상황에 특화된 자료 처리 방법을 사용하고 있는 실정이다.

표준화된 자료 처리 과정을 통해 구축된 KoFlux 자료들은 AsiaFlux와 FLUXNET의 공식 데이터베이스에 등재되고 있다. 현재 등재된 자료들은 Hong *et al.*(2009)에 따라 처리된 결과물이다. 자료 처리 방법과 과정이 갱신되면 이에 따라 그 결과도 달라지게 되는데, 자료 사용자들은 자료 처리 결과의 차이와 이러한 차이가 자신들의 분석 결과에 미칠 수 있는 영향에 대해 제대로 인지하지 못하고 있는 실정이다. 자료 사용자는 자료의 갱신 여부를 확인하고, 자료 처리 방법 및 처리 과정의 변화에 따른 값의 차이를 감안하여 신중하게 자료를 사용하여야 한다.

본 총설에서는 국가농림기상센터의 자료획득처리시스템(National Center for AgroMeteorology - Data Acquisition and Processing System, NCAM-DAPS, <http://daps.ncam.kr>)을 통해 제공하는 KoFlux 데이터베이스 구축에 사용된 표준화된 자료 처리 방법의 개선과정을 문서화하였다. 총설의 목적은 현재는 물론 앞으로도 지속적으로 공개될 KoFlux 데이터베이스 사용자들에게 자료 처리에 대한 투명하고 구체적인 정보를 제공함으로써 자료 관리와 사용에 대한 거부감과 신뢰성을 제공하는 데에 있다. 이를 위해, 과거에 다루지 않았거나 중간에 제외된 부분들(예를 들어, 주파수 반응 보정, 정상성 점검, 난류 발달 상태 점검, 확률 불확도 등)을 보완하였다. 또한 마찰속도 문턱값 결정을 위한 수정된 동점 점검 방법, CH₄ 플럭스 결측 메우기 등의 KoFlux의 최신 연구결과를 갱신된 자료 처리

과정에 반영하였다. 이 중 많은 부분이 KoFlux의 확장 과 함께 관측 방법과 시스템이 다양해지고, 특히 봉(封)폐회로 시스템(Enclosed-path system, 기존의 개회로 시스템을 둘러 막은 형태로 개회로와 폐회로 시스템의 장점을 취한 시스템)이 도입되면서 대두되었다. 본 총설에서는 개선된 자료 처리 방법의 문서화와 더불어, 그 효과를 평가하기 위해 광릉 활엽수림(GDK)과 해남 농경지(HPK) 관측지의 자료를 사용하였고, 자료 처리 방법의 차이에 따른 플럭스 값의 차이가 관측지마다 어떻게 나타나는지를 함께 살펴 보았다.

II. 관측 자료

본 연구에서는 GDK와 HPK (Table 1)에서 2016년 6월 11일부터 2017년 6월 10일까지 1년동안 관측된 에디 공분산 플럭스 자료 및 미기상 자료를 사용하였다. 에디 공분산 관측에 적합한 지형에 위치한 HPK는 평탄하고 지표 피복이 균질한 반면, GDK는 복잡 산림 지형에 위치하고 있어서, 에디 공분산 방법을 적용하는데 요구되는 기본가정을 만족하지 못한다(Kang *et al.*, 2009). 그러나 한국의 2/3가 복잡 산림 지형임을 감안할 때, 이런 지역에서 에디 공분산 플럭스 자료를 생산하는 것은 피할 수 없는 도전이다.

GDK와 HPK 플럭스 타워에서, 지면으로부터 각각 40m와 3.5m 높이에 설치되어 있는 에디 공분산 시스템은 3차원 초음파 풍향 풍속계(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 고속반응 기체 분석기로 구성되어 있다. GDK에는 CO₂와 수증기(H₂O) 농도관측을 위한 봉폐회로 적외선 기체분석기(Model EC155, Campbell Scientific Inc.), HPK에는 CO₂와 H₂O 농도관측을 위한 개회로 적외선 기체분석기(Model LI-7500, LI-COR Inc., USA)와 메탄 농도관측을 위한 개회로 파장 변조 분광계(Model LI-7700, LI-COR Inc.)가 설치되어 있다. 이와 동시에 다른 미

Table 1. Description of the study sites

Site name (code)	Latitude / Longitude	Elevation (m)	Land cover type	Terrain type	Dominant species	Canopy height (m)	LAI _{MAX} (m ² m ⁻²)	Stand age (year)	Reference
Gwangneung Deciduous forest (GDK)	37°45' N / 127°09' E	252	Deciduous broadleaf forest	Complex, hilly	<i>Quercus</i> sp., <i>Carpinus</i> sp.	20	6	80-200	Kwon <i>et al.</i> (2009)
Haenam Paddy-field (HPK)	34°29' N / 126°29' E	3	Rice paddy	Relatively flat	<i>Oryza sativa</i>	1	6	--	Lee <i>et al.</i> (2018)

기상 변수들(순복사, 온도, 습도, 토양 온도, 토양 수분)이 함께 관측되었다. 에디 공분산 시스템의 경우, GDK는 10Hz, HPK는 20Hz의 샘플링 속도로 관측되었고, 자료의 평균 시간은 30분이며, 10/20Hz 관측자료와 30분 평균(및 공분산) 자료는 자료집록기(Model CR3000, Campbell Scientific Inc.)에 저장되었다. 관측지에 대한 자세한 정보는 Kang *et al.*(2017 for GDK)과 Lee *et al.*(2018 for HPK)에서 찾아볼 수 있다.

III. 개선된 KoFlux 표준화 자료 처리 방법

KoFlux 표준화 자료 처리의 목표는 에디 공분산 시스템에서 관측된 이산화탄소, 수증기, 메탄 등의 플럭스 자료와 상/하향 단/장파 복사, 풍속, 기압, 기온, 습도, 강수량 등의 저속반응 기기들로부터 관측된 미기상 자료의 품질관리를 수행하고, 품질관리 후 결측된 부분에 대한 자료 메우기를 실행하여, 플럭스 자료의 신뢰도와 활용도를 향상시키는 것이다. 자료 처리는 10단계로 구분하였고, 각 단계별 처리 내용은 다음과 같다.

1. **Raw data 단계:** 처리할 원자료를 모으고 정리하는 과정
2. **EddyPro[®] L0 단계:** Raw data 단계에서 정리된 10/20Hz로 관측된 3차원 풍속, 음속(sonic) 온도, CO₂/H₂O/CH₄ 농도 및 기압 자료로부터 상용화된 에디 공분산 자료처리 응용 프로그램인 EddyPro[®] (LI-COR Inc.)를 사용하여(에디) 플럭스 및 관련 통계값을 계산하고, 해당 결과물에 맞춰 전 단계에서 정리된 30분 평균 원자료들을 불러와 하나의 파일로 만드는 과정으로서 이 단계를 거친 자료를 L0로 정의함
3. **MET QC 단계:** 플럭스 자료를 제외한 나머지 미기상자료의 품질 관리 과정
4. **SF 단계:** 순생태계교환량(≈ 에디 플럭스 + 저류향) 산정을 위한 저류향 계산 과정
5. **L1 입력 단계:** 플럭스 자료의 품질 관리를 수행하기 전 과정
6. **L1 단계:** 플럭스 자료를 품질 관리하는 과정으로서, 이 단계를 마친 자료를 L1으로 정의함
7. **MET GF1 단계:** 하향 단파복사, 기온, 습도, 기압, 풍속 및 풍향 자료의 결측을 메우는 과정

8. **L2 단계:** 플럭스 자료의 결측을 메우고 배분하는 과정
9. **MET GF2 단계:** 하향단파복사 이외의 나머지 복사 성분들과 지중열 플럭스, 마찰속도, 강수량 자료의 결측을 메우는 과정이며, 이 단계를 거친 자료를 L2로 정의함
10. **FNL 단계:** 자료 처리된 결과물(L1과 L2)들을 통합하여 데이터베이스 서버에 저장할 수 있도록 정리하는 과정

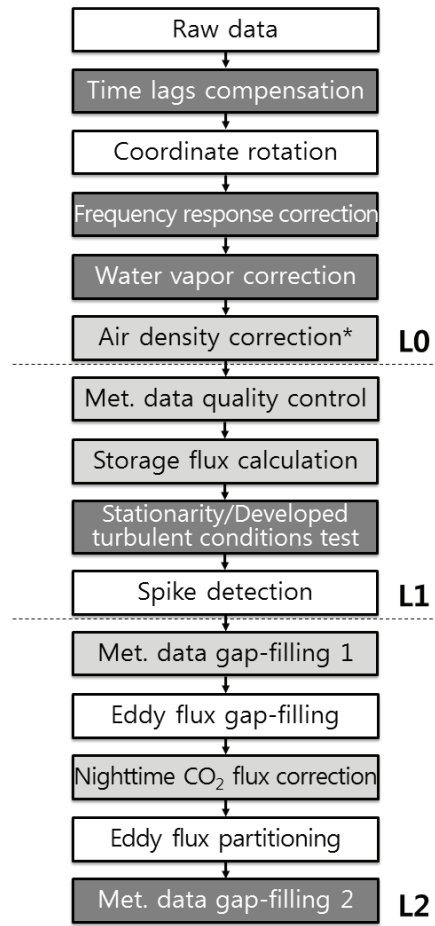


Fig. 1. Flowchart of the standardized eddy covariance data processing in KoFlux (adapted from Hong *et al.*, 2009). The dark grey color indicates the re- (or newly-) implemented procedures, while the grey color indicates the procedures with major revisions. *The air density correction includes the spectroscopic correction for LI-7700.

자료처리를 위와 같이 다단계로 분리하는 이유는 향후 자료 처리 방법의 변화에 유연하게 대처하여 자료의 갱신을 보다 수월하게 하기 위함이다. 일반적으로 자료 사용자에게 제공되는 자료는 FNL 단계의 자료이며, 원자료를 비롯한 중간 단계의 자료는 사용자가 추가로 요청할 시 제공될 수 있다. Fig. 1은 현재 사용 중인 표준화된 자료 처리 방법의 순서도로 그동안 어떤 변화와 개선이 있었는지를 보여준다. 개선된 처리 방법에 대한 구체적인 내용은 세부 항목별로 아래에 설명하였다.

3.1. EddyPro[®]를 이용한 플렉스 계산

관측 환경과 시스템이 다양해지고 변화됨에 따라 자료 처리 방법도 융통성있게 갱신되어야 한다. EddyPro[®]는 다양한 자료 처리 방법을 제공하는 무료 프로그램으로 사용자가 원하는 사양을 선택할 수 있어 사용하기가 용이하다. 본 응용 프로그램은 10 또는 20Hz로 관측된 3차원 풍속, 기온, CO₂/H₂O/CH₄ 농도, 기압으로부터 플렉스는 물론 품질 관리 및 보정에 필요한 난류 스펙트럼, 각종 통계량 등을 사용자가 정한 선택사양에 따라 계산해낸다. L0 단계에서는 1) 추세 제거(30분 블록 평균), 2) 시간 지연 보상(추정된 시간 지연 범위 내에서 공분산이 최대가 되는 시점 탐지), 3) 좌표 변환(복잡지형의 경우 풍향 별로 8개 평면의 경사를 한 달 간격으로 계산하는 평면 맞추기 회전 (Wilczak *et al.*, 2001; Yuan *et al.*, 2007) 적용; 평탄지형의 경우 이중 회전(Wesely, 1970; McMillen, 1988)

적용), 4) 소닉 온도의 수증기 보정(van Dijk *et al.*, 2004), 5) 주파수 반응 보정(추세 제거 시 발생하는 고주파 통과 필터링 효과 보정(Moncrieff *et al.*, 2004); 3차원 초음파 풍향 풍속계와 기체 분석기 간 분리 효과 보정(Horst and Lenschow, 2009, 옆바람방향과 연직방향 분리 거리만 고려); 기기 경로 길이, 튜브 감쇄 등의 이유로 발생한 저주파 통과 필터링 효과 보정 (Fratini *et al.*, 2012); Table 2 참조), 6) 공기 밀도 보정(Webb *et al.*, 1980; 폐/봉폐회로 시스템에서 혼합 비로 기체 농도 변동을 관측한 경우 적용하지 않음), 7) 분광 보정(LI-7700에 한하며 공기 밀도 보정과 동시에 수행, Li-Cor, Inc., 2013)의 과정을 거쳐 플렉스를 계산한다.

위 과정에서 함께 계산된 난류 스펙트럼과 품질 관리(정상성(stationarity) 및 발달된 난류 상태(developed turbulent conditions) 점검(Mauder and Foken, 2004))에 필요한 통계량들이 계산된다. 정상성은 30분 공분산과 30분을 6개의 세부 구간(5분씩)으로 나누어 계산한 공분산의 평균 간의 차이를 계산하며, 발달된 난류 상태는 적분 난류 특성(Integral Turbulence Characteristic, ITC)을 연직풍속의 원자료로부터 계산한 값과 난류가 잘 발달된 상태에서 모델로 추정된 값 간의 차이를 계산하는데, 두 점검 모두 계산된 차이가 100% 이상일 경우 자료를 제거한다. 단, 발달된 난류 상태 점검은, 평탄한 지역에서 개발한 모델이 복잡 지형에는 적용되기 어려울 수도 있다는 점과 거칠기아층(식생의 키가 높은 산림에서 플렉스

Table 2. Information about the sonic anemometers and gas analyzers

	GDK	HPK	
Sonic anemometers	CSAT3	CSAT3	
Path length (cm)	11.6	11.6	
North off-set (°)	220.0	217.0	
Gas analyzers	EC155	LI-7500A	LI-7700
Tube length (cm)	58.4	--	--
Tube inner diameter (mm)	2.7	--	--
Nominal tube flow rate (L min ⁻¹)	8.0	--	--
Northward separation (cm)	12.0	0.0	2.9
Eastward separation (cm)	10.0	0.0	16.0
Vertical separation (cm)	0.0	-22.0	-1.0
Path length (cm)	12.0	12.5	50.0

관측은 거칠기아층에서 주로 이뤄질 수 있음)에서 나타나는 모멘텀 및 스칼라 간의 비균질성 문제로 인해 복잡 산림 지형에 위치한 관측지의 경우 적용하지 않는다(Hong *et al.*, 2009). 그리고 원자료로부터 계산된 적분 난류의 시간규모를 기반으로 확률 오차를 추정(Finkelstein and Sims, 2001)하여 플럭스의 표본추출 오차로 인한 확률불확도를 계산하여 함께 저장한다. 각 방법에 대한 자세한 설명은 EddyPro[®] 온라인 설명서(https://www.licor.com/env/help/eddypro/topics_eddypro/EddyPro_Home.html)와 Hong *et al.*(2009)을 비롯한 인용된 문헌들을 참고하길 바란다.

3.2. CO₂/ CH₄ 플럭스의 결측 메우기와 배분

계절별 및 연별 순생태계교환량(net ecosystem exchange, NEE) 값을 정량화하기 위해서는 결측되거나 품질 관리 과정에서 제거된 빈 자료를 메워야 한다. 에디 공분산 시스템에서 관측되는 NEE는 다양한 과정에서 발생하는 플럭스들이 합성된 것으로서 각 플럭스의 조절 인자를 비롯한 발생 기작이 다르다는 점에서, 생태계 물질과 에너지의 교환을 정확히 이해하려면 관측된 플럭스의 배분이 필요하다. CO₂의 경우, NEE는 총일차생산량(gross primary production, GPP)과 생태계호흡량(ecosystem respiration, RE)의 차이를 나타낸다. CH₄의 경우, NEE는 메탄의 환원 반응과 산화 반응의 차이로 생긴 플럭스로서, 다시 확산에 의한 플럭스와 거품 분출(ebullition)에 의한 플럭스와 식물의 조직을 통해 방출되는 플럭스로 구성될 수 있다(예, Kim *et al.*, 1998; 1999). 이러한 결측 메우기와 배분이 가능한 이유는 에디 공분산 플럭스 관측의 시간 해상도가 높고 생물-대기간 상호작용의 순환 과정이 반복되면서 자료의 중복(redundancy)이 발생하기 때문이다(Papale, 2012). 에디 공분산 플럭스 관측 자료의 결측 메우기와 배분은 이러한 자료의 중복성에 기반을 둔 내삽 또는 외삽이라고 볼 수 있다.

KoFlux 표준화 결측 메우기 방법은 주변 분포 표본 추출법(marginal distribution sampling, MDS, Reichstein *et al.*, 2005)으로(주간) CO₂ 플럭스, H₂O 플럭스(잠열 플럭스), 현열 플럭스의 결측을 메우는데 사용된다. 해당 플럭스의 주요 조절 인자는 전천일사, 기온, 포차이며, 결측 주변의 유사한 기상 조건(각 인자의 분류 간격은 각각 50W m⁻², 2.5°C, 5hPa)에서 관측된 자료들의 중간값으로 결측을 메운다. 일반적인 MDS 방법은 유사한 기상 조건을 만족하는 자료들이

없을 경우 더 넓은 시간 범위(앞뒤로 일주일 시간 범위부터 일주일씩 늘려감)에서 또는 하나의 주요 인자(예, 전천일사)만을 고려하여 관측된 자료를 찾거나, 기상 조건을 무시하고 평균 일변화(mean diurnal variation) 방법을 적용하게 된다. 표준화된 KoFlux 자료 처리 방법에서는 평균 일변화 방법이 장마기간에 발생한 장기간의 결측을 메우는데 계통오차를 발생(과대평가)시킬 수 있기 때문에 사용되지 않았다(Hong *et al.*, 2009). MDS를 적용하기 전 이에 활용되는 주요 인자들의 결측이 없는 상태여야 하는데, 관측지 주변에 위치한 기상청의 종관기상관측장비(ASOS)와 방재기상관측장비(AWS)에서 관측된 자료(기상청 국가기후데이터센터, <http://sts.kma.go.kr>)와 플럭스 타워에서 관측된 자료 간의 선형회귀 관계를 이용하여 결측을 메웠다. 선형회귀 관계를 계산하기 위한 시간 창의 크기(time window size)는 28일로 하고 이를 5일 간격으로 갱신하였다.

CH₄ 플럭스의 경우, 논 관측지인 김제(GRK, http://asiaflux.net/index.php?page_id=1182), 철원(CRK, http://asiaflux.net/index.php?page_id=1392), 해남(HPK, http://asiaflux.net/index.php?page_id=1393)에서 관측이 진행되었다. 다른 플럭스들과 달리, 품질 관리(Kang *et al.*, 2015) 이후의 표준화된 결측 메우기 방법이 아직 없기 때문에, Alberto *et al.*(2014)과 마찬가지로 MDS 방법을 사용하였다. 주요 조절 인자로는 CH₄ 생성 및 산화, 그리고 수송과 관계 있는 생태계 온도, 수위 및 GPP를 사용하였다. 생태계호흡과 마찬가지로 CH₄ 플럭스는 온도와 지수함수적인 관계가 있다. 토양온도가 더 적합한 조절 인자이지만 관측된 토양온도가 대상 생태계를 대표하지 못한다고 판단하여 지면 근처에서 관측된 기온을 사용하였다. 수위는 논에 물이 차 있는 혐기성 조건에서 미생물에 의한 유기물 분해 과정에서 생성되는 CH₄와 관련지을 수 있다. 논에서 생성된 CH₄의 약 90%가 비의 통기조직을 통해 대기 중 수송되며(Meijide *et al.*, 2011), 비의 GPP가 CH₄ 플럭스 일변화의 주요 원인임(Hatala *et al.*, 2012)을 고려하였다. 분류 간격은 각각 2.5°C, 0.01m, 0.1mg CO₂ m⁻² s⁻¹를 사용하였다. MDS 방법을 이용한 CH₄ 플럭스의 결측 메우기 결과를 검증하기 위해, 기계학습법의 하나인 서포트 벡터 회귀(support vector regression, SVR) 방법과 인공신경망(artificial neural network, ANN; 예, Sturtevant *et al.*, 2015) 방법을 함께 적용하여 그 결과를 비교하였다. 사용된 주요 조

절인자는 MDS 방법에 사용한 것과 동일하며, 추가로 생태계 상태 변화(중간 낙수 전 성장기간, 중간 낙수 기간, 중간 낙수 후 성장기간, 휴면기간)를 구분하는 네 변수(해당 기간에 해당할 경우 1, 그렇지 않을 경우 0)를 입력자료로 추가하였다.

야간 CO₂ 플럭스 보정과 NEE(여기서부터 NEE는 CO₂의 순생태계교환량을 말함)의 배분은 보통 (1) 관측된 NEE 자료로부터 대상 지역에 대한 대표성을 지닌 RE 자료를 선별 (또는 산정), (2) 선별된 RE 자료를 사용하여 RE 추정식(예, Lloyd and Taylor equation, Lloyd and Taylor, 1994)의 모수들을 추정하고, (3) 이를 이용하여 난류 발생이 약한 야간에 과소평가된 NEE 자료를 추정값으로 대체하고, (4) 추정된 RE와 관측된 NEE의 차이로 GPP를 계산하는 과정을 거친다. 가용한 자료의 수와 생태계의 상태 변화를 고려하여, 모수 추정을 위한 시간 창의 크기는 30일로 하고 5일 간격으로 모수를 갱신했다. KoFlux 표준화 자료 처리 방법은 야간 CO₂ 플럭스 보정과 NEE 배분을 위한 RE 선별 및 산정을 위해, 마찰속도(friction velocity, u^*) 필터링 (FVF) 방법, 광 반응 곡선(light response curve, LRC) 방법, 이류를 고려한 van Gorsel (VGF) 방법을 지원한다(Kang *et al.*, 2014). Kang *et al.*(2017)은 광량 플럭스 관측지에서 위의 세 가지 방법으로 선별된 자료의 일부가 CO₂ 이류의 영향을 받음을 확인하였고, 이를 제거하기 위한 관측지에 특화된 품질 관리 필터를 개발하고 적용하였다. 해당 필터의 적용이 결과적으로 위 세 가지 방법을 혼성적으로 적용한 것과 같은 효과를 냄에 착안하여, FVF 방법과 VGF 방법을 결합한 수정된 동점 점검(modified moving point test, MPT_m , Kang *et al.*, 2016) 방법을 개발하였다. 이 방법은 야간을 해가 진 직후(대기가 성층화되기 전)와 그 이후의 두 개의 시간대로 나누어 동점 점검 적용함으로써, u^* 필터링 방법에 쓰일 u^* 문턱값과 이류의 영향이 지속적으로 발생하는지의 여부를 결정한다. 이 방법의 특징은 두 방법을 혼성시켜 그 적용 가능성을 향상 시켰다는 것이다.

IV. 결과 및 토의

4.1. 관측된 플럭스의 확률 불확도

Fig. 2은 GDK와 HPK에서의 각 30분 평균 플럭스와 Finkelstein and Sims (2001)의 방법으로 추정된 플럭스의 확률 불확도(σ) 간의 관계를 보여준다. 선행

연구(예, Richardson *et al.*, 2006; Lim *et al.*, 2016)에서 알려진 것처럼, σ 는 평균 플럭스(\bar{F})의 크기와 관측 높이(z)에 비례하고, 평균 풍속(\bar{u}) 및 평균 시간(T)에 반비례한다($\sigma \propto \bar{F} \sqrt{\frac{z}{\bar{u}T}}$). 따라서 관측 높이가 낮은 연 평균 풍속이 높은 HPK (1.9 m s⁻¹)의 상대 확률 불확도($\frac{\sigma}{\bar{F}}$)가 GDK (1.5 m s⁻¹)보다 작을 것임을 예상할 수 있다. 실제 HPK (GDK)의 상대 확률 불확도는, 현열 플럭스의 경우~5 (14~19)%, 잠열 플럭스의 경우 4~19 (17~22)%, CO₂ 플럭스의 경우 4~10 (17~18)%, CH₄ 플럭스의 경우 4~20 (해당없음)% 이었다. 국내 초지에 위치한 9.5m 높이의 두 플럭스 타워에서 관측된 자료로부터 직접 추정된 확률 오차(주간에 20% 내외, Lim *et al.*, 2016)와 비교해 보았을 때, GDK는 이와 비슷한 크기였으며 HPK는 1/4 수준으로 훨씬 작았다.

위의 플럭스와 확률 불확도 간의 관계를 이용하여 Richardson and Hollinger(2007)에 따라 몬테 카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 100회 수행하여 MDS 방법으로 결측을 메운 연적산 플럭스의 확률 불확도(95% 신뢰구간, 2σ)를 계산하였다. HPK (GDK)의 연적산된 플럭스의 확률 불확도는, 현열 플럭스의 경우 2.7 (12) MJ m⁻² year⁻¹, 증발산의 경우 2.4 (5.1) mm year⁻¹, NEE의 경우 12 (51) g C m⁻² year⁻¹, RE의 경우 19 (105) g C m⁻² year⁻¹, GPP의 경우 12 (65) g C m⁻² year⁻¹, CH₄ 플럭스의 경우 0.19 (해당없음) g C m⁻² year⁻¹ 이었다. 이 값들은 상대적으로 30분 평균 확률 불확도의 1/3에서 1/20 수준(NEE 제외)이다. 확률 불확도의 분포는 평균이 0인 이중 지수 분포(double exponential distribution)를 갖기 때문에, 적산된 확률 불확도는 자료의 개수(N)가 늘어날수록 감소 ($1/\sqrt{N}$)하는 특성을 지닌다(Press *et al.*, 2001).

4.2. 주파수 반응 보정, 정상성 및 발달된 난류 상태 점검

주파수 반응 보정, 정상성 점검, 발달된 난류 상태 점검의 효과를 확인하기 위해, 세 방법을 모두 적용한 결과(ALL)를 기준으로 두고 각 방법(만)을 적용하지 않았을 때(주파수 반응 보정을 적용하지 않았을 때: no FRC, 정상성 점검을 적용하지 않았을 때: no SST, 발달된 난류 상태 점검을 적용하지 않았을 때: no ITC)

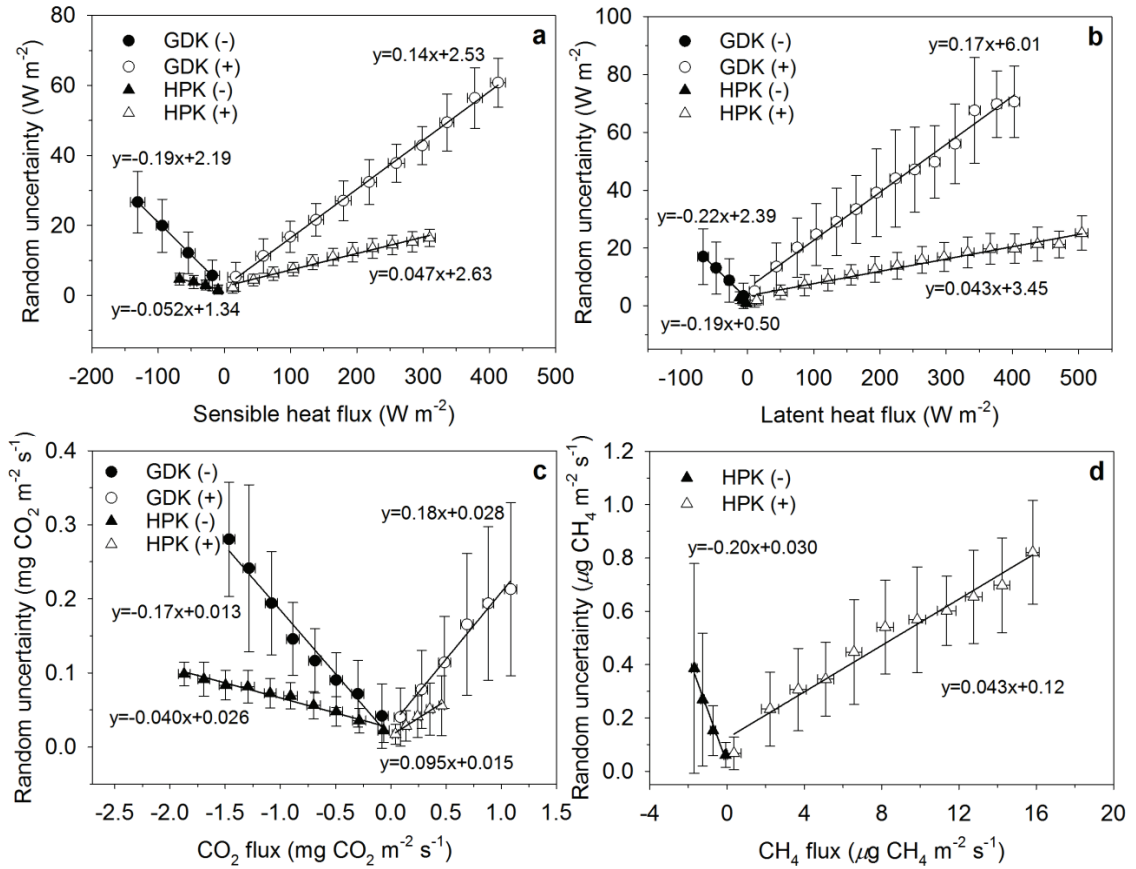


Fig. 2. Relationships between the random uncertainties of (30 min. averaged) sensible heat flux (a), latent heat flux (b), CO_2 flux (c), and CH_4 flux (d), and their magnitudes for the GDK and HPK sites. ‘+’ indicates the case of positive flux, while ‘-’ indicates the case of negative flux. Error bars indicate the standard deviation for each bin average.

와의 차이를 계산하였다(KoFlux에서 관측 초기부터 위의 보정과 점검을 수행한 CH_4 플럭스의 경우 본 분석에서 제외하였다). 정상성 점검과 발달된 난류 상태 점검의 경우 자료수득률을 변화시키므로, 이에 대한 확인이 필요하다. HPK (GDK)에서 낮 시간(전천일사가 $20 W m^{-2}$ 이상) ALL의 현열, 잠열, CO_2 플럭스 자료수득률은 각각 72 (69)%, 69 (56)%, 62 (46)% 일 때 no SST는 각각 84 (92)%, 73 (88)%, 71 (87)% 였으며, 밤 시간(전천일사가 $20 W m^{-2}$ 미만) ALL의 현열, 잠열, CO_2 플럭스 자료수득률은 각각 48 (45)%, 39 (28)%, 37 (34)% 일 때 no SST는 각각 79 (88)%, 65 (88)%, 66 (87)% 였다(ALL과 no ITC 간 자료수득률의 차이는 밤 낮 관계없이 2% 내외로 no ITC의 자료수득률은 여기선 보이지 않음). 정상성 점검 여부에

따른 자료수득률의 차이는 낮보다는 밤에, 평탄하고 균질한 관측지(HPK)보다는 복잡하고 비균질한 관측지(GDK)에서 크게 나타났다. 낮 시간에도 오후보다는 오전에 정상성 점검을 통과하지 못하는 경우가 많았다.

ALL, no FRC, no SST, no ITC 결과들을 MDS와 MPT_m 방법으로 결측을 메우고 배분한 뒤 연적산하여 그 차이를 정량화 하였다(Table 3). 현열 플럭스와 NEE는 적산할 경우 상쇄되는 부분이 상당하므로 본 분석에서 제외하였다. 여기서 GPP는 RE(야간에 관측된 CO_2 플럭스와 이를 기반으로 추정된 낮 시간 RE)와 NEE로부터 계산($GPP = RE - NEE$)되기 때문에, RE가 과소평가된 만큼 GPP도 과소평가 된다. 먼저 ALL과 no ITC는 자료수득률의 차이가 크지 않은 만큼 연적산한 결과도 그 차이가 확률불확도의 범위 이

Table 3. The annually integrated values of sensible heat flux (*H*), evapotranspiration (ET), net ecosystem exchange (NEE), gross primary production (GPP), ecosystem respiration (RE) for the experiments (i.e., ALL: applying all, no FRC: not applying frequency response correction, no SST: not applying steady state test, no ITC: not applying developed turbulent conditions test). The fluxes are gap-filled and/or partitioned using the marginal distribution sampling (MDS) and the modified moving point test (MPT_m) methods

		<i>H</i>	ET	NEE	RE	GPP
		MJ m ⁻² year ⁻¹	mm year ⁻¹	g C m ⁻² year ⁻¹		
		MDS		MDS & MPT _m		
GDK	ALL	662	374	188	1,690	1,502
	no FRC	636	346	119	1,525	1,407
	no SST	739	342	12	1,298	1,286
	no ITC	649	374	179	1,632	1,453
HPK	ALL	385	738	-470	754	1,224
	no FRC	379	654	-374	633	1,007
	no SST	452	708	-544	608	1,152
	no ITC	381	741	-456	787	1,243

내로 크지 않았다. HPK (GDK)에서 no FRC의 잠열 플럭스, RE, GPP는 ALL 보다 11 (7)%, 16 (10)%, 18 (6)% 더 작았다. 관측 높이가 GDK의 1/10 수준인 HPK에서 주된 난류 수송은 더 작은 에디들(고주파수 영역)에 의해서 일어나기 때문에 주파수 반응 보정 효과가 GDK보다 HPK에서 더 클 것을 예상할 수 있는데, 실제로 그 차이가 GDK의 봉쇄회로 시스템 사용으로 발생하는 튜브 감쇄 효과보다 더 컸음을 유추할 수 있다. HPK (GDK)에서 no SST의 잠열 플럭스, RE, GPP는 ALL 보다 4 (9)%, 19 (23)%, 6 (14)% 더 작았다. 이는 정상성 점검을 하지 않음으로써 과소평가된 저품질의 자료들이 제거되지 않았기 때문이다. 정상성 점검 여부에 따른 자료수득률의 차이는 앞서 언급한대로 낮보다는 밤에, 평탄하고 균질한 관측지보다는 복잡하고 비균질한 관측지에서 크게 나타났는데, 실제로 연적산 결과에서도 유사한 차이를 확인할 수 있었다. 이처럼 주파수 반응 보정과 정상성 점검 여부는 자료 품질에 큰 영향을 미치므로 반드시 자료 처리 과정에 포함되어야 한다.

4.3. CH₄ 플럭스 결측 메우기

Fig. 3은 MDS, SVR, ANN 방법으로 메운 중간 낙수 전까지의 CH₄ 플럭스의 일 변화와 연구기간 동안의 일적산된 CH₄ 플럭스의 계절 변화를 보여준다. 자료집록기의 오작동과 기체분석기의 거울 표면의 오염으로 인한 장기 결측 기간(6월 29일부터 7월 5일, 8일

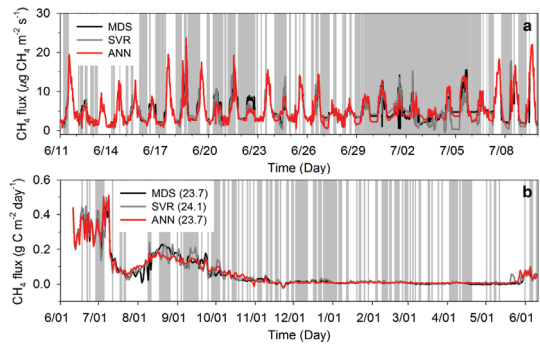


Fig. 3. Time series of the gap-filled CH₄ flux using the marginal distribution sampling (MDS), support vector regression (SVR), and artificial neuralnet work (ANN) methods for the HPK site: (1) 30 min. averaged values before the mid-season drainage (a), and (2) daily integrated values during the study period (b). The shaded area represents data missing or the day when daily data availability is less than 30%. The values in parentheses mean the annually integrated CH₄ flux (g C m⁻² year⁻¹).

21일부터 26일, 9월 6일부터 17일)을 제외하면, 세 방법에서 도출된 결과가 크게 다르지 않았다. 장기 결측 기간 동안 세 방법에 의해 메워진 값들 간의 크고 작음이 서로 상쇄되어 결과적으로 연적산한 값을 보면 약 24g C m⁻²로 연간 확률 불확도의 범위 내에서 서로 일치하였다. 이러한 사실은 (1) CH₄ 플럭스 역시 다른 현열, 잠열, CO₂ 플럭스와 마찬가지로 (장기) 결측을 최소화 하는 것이 적산된 플럭스 값의 불확실성을 줄

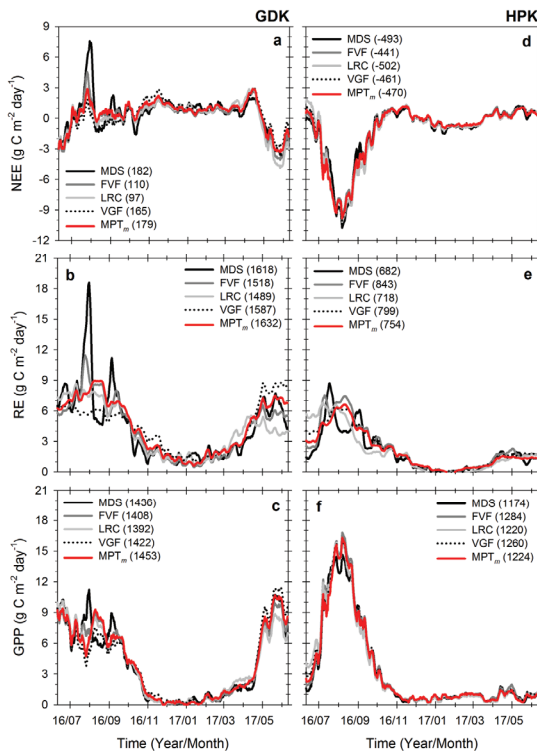


Fig. 4. Seasonal variation of daily integrated (7-day running mean) net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (RE), and gross primary production (GPP) for the GDK (a, b, c) and HPK (d, e, f) sites. MDS, FVF, LRC, VGF, and MPT_m mean the marginal distribution sampling, u^* filtering correction, light response curve, van Gorsel, and modified moving point test methods, respectively. The values in parentheses mean the annually integrated NEE, RE, and GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$).

일 수 있는 최선의 전략이며, (2) 결측 메우기에 있어서 어떤 방법(통계기반 또는 기계학습법기반)을 선택하느냐 보다는 어떤 조절 인자를 선택하느냐가 결과에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

4.4. 방법 별 CO_2 플럭스 보정과 배분 결과의 차이

Fig. 4는 MDS, FVF, LRC, VGF, MPT_m 으로 처리한 일적산 NEE, RE, GPP의 계절변동 및 연적산값을 보여준다. 여기서 MDS(결측 메우기가 아닌 배분에 사용)의 경우, 야간 CO_2 플럭스 자료를 u^* 를 이용해 필터링(u^* 문턱값으로 GDK는 0.3 m s^{-1} , HPK는 0.2 m s^{-1} 를 사용) 한 후, 조절 인자로 기온만을 사용한 MDS 방법으로 주간과 야간 RE를 추정하여 배분하였다. FVF의

경우, u^* 문턱값은 MDS의 경우와 동일한 값을 사용하였다. 복잡 산림 지형에서 관측된 CO_2 플럭스 보정과 배분 결과에서 가장 주목할만한 부분은 방법에 따른 불일치가 선행연구(Kang *et al.*, 2014)에서 보고된 것보다 훨씬 작았다는 것이다. 이러한 차이는, 기존의 품질관리(적외선 기체분석기의 진단값을 기반으로 간접적으로 정상성 점검을 수행하고, 튀는 자료를 제거함, Hong *et al.*, 2009) 후에도 남아있는, 이류의 영향을 받은 저품질의 자료들이 실제 정상성 점검을 통해 제거되었기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 자료처리 방법들 간에는 여전히 차이를 보이는데, 특히 복잡 산림 지형에서 더욱 차이를 보인다. MDS 방법의 경우, 결측 주변에 가용한 자료가 부족한 경우에 크게 편향된 값을 보였다(예, GDK: 7월 말과 9월초, HPK: 7월 중순과 9월 초). 같은 맥락에서, 방법들 간의 차이가 발생한 주요 원인도 각 방법에서 선별된 자료들의 개수나 분포가 신뢰할만한 RE와 기온 간의 관계를 이끌어내기에 충분했는지의 여부에서 찾을 수 있다. 최근에 제안된 MPT_m 방법은 FVF 방법과 VGF 방법을 혼성한 방법이니만큼 그 결과값도 대부분 두 방법에서 나온 결과값들의 중간을 보였다.

V. 요약 및 결론

KoFlux 데이터베이스를 구축하는데 사용된 표준화된 자료 처리 방법이 이전과 비교해 어떻게 변화되고 개선되었는지를 정리하였다. KoFlux 네트워크가 확장되고 다양화 됨에 따라 기존에 무시되었거나 간소화되었던 자료 처리 과정에 대한 관심과 그 변화에 대한 문서화의 중요성이 커지고 있다. 다양한 에디 공분산 자료 처리 방법의 집합체인 EddyPro[®]의 개발과 상용화는 이러한 자료 처리 과정을 보다 쉽고 융통성 있는 적용을 가능하게 해주었다. 본 연구의 결과로부터 에디 공분산 플럭스 관측 자료의 품질 관리 과정에서 주파수 반응 보정과 정상성 점검이 큰 영향을 끼치며, 결측 메우기와 배분 과정에 있어서 (장기) 결측을 최소화하는 것과 대상 플럭스의 변동을 설명할 수 있는 적절한 조절 인자의 선택이 처리 방법의 선택보다 더 중요함을 확인할 수 있었다. 여기서 가용한 자료(또는 결측)의 분포가 고르지 않기 때문에, 자료수득률의 변화에도 최소한의 편향(bias)을 보이는 방법이 무엇인지에 대한 평가가 필요하다. 실제로 이러한 평가를 수행하기 전에 예상 가능한 결과로는, 최소한의 편향을

보이는 방법이 상황에 따라 달라질 것이며, 따라서 다양한 방법에서 나오는 결과들을 앙상블 평균하는 것이 가장 적절한 결과를 도출해낼 것이라는 점이다. MPT_m 방법과 같이 여러 방법을 혼성하는 것도 대안이 될 수 있을 것이다.

과거의 원자료를 다시 처리하는데 여러 가지 제약(원자료 분실, 과거 기기 관련 정보 확보의 어려움 등)이 있으나, KoFlux 데이터베이스 개선을 위한 구체적인 자료 처리 기술 개발의 향후 방향은 다음과 같다: (1) 온전히 해석적인(Fully analytic) 방법으로 주파수 반응 보정을 수행하고(예, Moncrieff *et al.*, 1997), (2) 정상성 점검을 간접적으로 수행할 수 있는 대리 자료와 지시자를 발굴하고, (3) 동적 과정망 분석(Dynamic Process Network, 예, Ruddell and Kumar, 2009; Yun *et al.*, 2015)을 통한 플럭스 발생 조절 인자 및 시간 규모를 확인하고, (4) 장기 결측 메우기 방법을 개발한다. 이러한 노력과 지속적인 개선을 문서화하고 이를 데이터베이스에 포함시킴으로써 자료의 연속성을 확보하고 이를 기반으로 KoFlux의 장기 플럭스 관측 자료가 더욱 빠르고 유용하게, 그리고 의미 있게 사용되기를 기대한다.

적 요

KoFlux의 표준화된 에디 공분산 플럭스 자료 처리 과정이 갱신되는 과정에서 그 처리 방법에 따른 결과도 조금씩 달라져 왔다. 대부분의 자료 사용자들은 자료 처리 결과의 차이와 이러한 차이가 자신들의 분석 결과에 미칠 수 있는 영향에 대해 명확히 인지하지 못하고 자료를 사용하고 있는 실정이다. 본 총설에서는 KoFlux 데이터베이스를 사용하는 연구자들에게 자료 처리 과정을 투명하게 정리하여 자료에 대한 신뢰성과 활용성을 확보하기 위해, 과거의 자료 처리 방법이 어떻게 변화되고 개선되었는지를 평탄하고 균질한 해남 관측지(HPK)와 복잡하고 비균질한 광릉 활엽수림 관측지(GDK) 자료를 처리하고 그 차이를 확인하여 문서화하였다. 관측 대상지와 관측 장비의 다양화로 인해, 기존에 무시되거나 간소화되었던 자료 처리 과정(예, 주파수 반응 보정, 정상성 검증 등)을 다시 적용하였고, 메탄 플럭스 결측 메우기와 이산화탄소 플럭스 보정 및 배분 방법을 새롭게 개선하였다. 본 연구결과로부터 에디 공분산 플럭스 관측 자료의 품질에 주파수 반응 보정(HPK: 연적산값의 11~18%의 편향 발생, GDK: 6~10%)과 정상성 점검(HPK: 연적산값의

4~19%의 편향 발생, GDK: 9~23%)이 매우 중요하고, 결측 메우기 및 배분 과정에 있어서 우선적으로 결측을 최소화하는 것이 최선이며, 대상 플럭스의 변동을 설명할 수 있는 적절한 조절 인자의 선택이 처리 방법의 선택보다 중요함을 확인 하였다. 장기 KoFlux 관측 자료의 정확성, 투명성 및 연속성 확보를 위해 위의 결과를 반영하는 자료 처리 기술 개발과 문서화를 지속적으로 추진해 나갈 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대 도시농림 융합 스마트 기상서비스 개발(WISE)사업(KMIPA-2012-0001-2)과 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(KMIPA-2015-2023) 및 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2017099A00-1719-BB01)과 온대북부산림의 시계열 특성분석 및 기후변화 적응 관리 기법연구(S111214L020100)의 지원으로 수행되었습니다. 논문의 품위를 크게 높여 주신 세 분의 심사위원분들께 깊이 감사드립니다

REFERENCES

- Alberto, M. C. R., R. Wassmann, R. J. Buresh, J. R. Quilty, T. Q. Correa Jr, J. M. Sandro, and C. A. R. Centeno, 2014: Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. *Field Crops Research* **160**, 12-21.
- Baldocchi, D., 2014: Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology* **20**, 3600-3609.
- Chu, H., D. D. Baldocchi, R. John, S. Wolf, and M. Reichstein, 2017: Fluxes all of the time? A primer on the temporal representativeness of FLUXNET. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **122**, 289-307.
- Dragoni, D., H. Schmid, C. Grimmond, and H. Loescher, 2007: Uncertainty of annual net ecosystem productivity estimated using eddy covariance flux measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **112**, D17102, doi:10.1029/2006JD008149.
- Finkelstein, P. L., and P. F. Sims, 2001: Sampling

- error in eddy correlation flux measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **106**, 3503-3509.
- Fratini, G., A. Ibrom, N. Arriga, G. Burba, and D. Papale, 2012: Relative humidity effects on water vapour fluxes measured with closed-path eddy-covariance systems with short sampling lines. *Agricultural and Forest Meteorology* **165**, 53-63.
- Hatala, J. A., M. Detto, and D. D. Baldocchi, 2012: Gross ecosystem photosynthesis causes a diurnal pattern in methane emission from rice. *Geophysical Research Letters* **39**, L06409, DOI:10.1029/2012GL051303.
- Hong, J., and J. Kim, 2002: On processing raw data from micrometeorological field experiments. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 119-126. (in Korean with English abstract)
- Hong, J.-K., H.-J. Kwon, J.-H. Lim, Y.-H. Byun, J.-H. Lee, and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 19-26. (in Korean with English abstract)
- Horst, T., and D. Lenschow, 2009: Attenuation of scalar fluxes measured with spatially-displaced sensors. *Boundary-Layer Meteorology* **130**, 275-300.
- Ichii, K., M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, M. Alberto, J. Ardö, E. S. Euskirchen, M. Kang, and T. Hirano, 2017: New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **122**, 767-795.
- Kang, M., J. Kim, H.-S. Kim, B. M. Thakuri, and J.-H. Chun, 2014: On the Nighttime Correction of CO₂ Flux Measured by Eddy Covariance over Temperate Forests in Complex Terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**, 233-245. (in Korean with English abstract)
- Kang, M., B. Malla-Thakuri, J. Kim, J. Chun, and C. Cho, 2016: A modification of the moving point test method for nighttime eddy flux filtering on hilly and complex terrain, Abstract B41B-0404 presented at 2016 Fall Meeting, AGU, San Francisco, CA, USA.
- Kang, M., B. L. Ruddell, C. Cho, J. Chun, and J. Kim, 2017: Identifying CO₂ advection on a hill slope using information flow. *Agricultural and Forest Meteorology* **232**, 265-278.
- Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. T. Choi, Y. J. Choi, and J. Kim, 2009: Evapotranspiration from a deciduous forest in a complex terrain and a heterogeneous farmland under monsoon climate. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**, 175-191.
- Kang, N., J. Yun, M. Talucder, M. Moon, M. Kang, K.-M. Shim, and J. Kim, 2015: Corrections on CH₄ fluxes measured in a rice paddy by Eddy covariance method with an open-path wavelength modulation spectroscopy. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**, 15-24. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., S.B. Verma, D.P. Billesbach, R.J. Clement, 1998: Diel variation in methane emission from a midlatitude prairie wetland: significance of convective through flow in *Phragmites australis*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **103**, 28029-28039.
- Kim, J., S.B. Verma, D.P. Billesbach, 1999: Seasonal variation in methane emission from a temperate *Phragmites*-dominated marsh: effect of growth stage and plant-mediated transport. *Global Change Biology* **5**, 433-440.
- Kim, J., T. Hirano, G. Yu, S. Li, and K. Tamai, 2013: Lessons learned from CarboEastAsia: carbon and water cycles in East Asian terrestrial ecosystems. *Journal of Forest Research* **18**, 1-3.
- Kwon, H.-J., S.-B. Park, M.-S. Kang, J.-I. Yoo, R. Yuan, and J. Kim, 2007: Quality control and assurance of eddy covariance data at the two KoFlux sites. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**, 260-267. (in Korean with English abstract)
- LI-COR Inc., 2013: LI-7700 Open Path CH₄ Analyzer Instruction Manual. LI-COR, 4647 Superior Street, Inc. Lincoln, NE, USA.
- Lee, S.-H., M. Kang, N. Kang, and J. Kim, 2018: Haenam Paddy-field KoFlux (HPK) site with dry direct-seeding: Introduction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* in this issue. (in Korean with English abstract)
- Lim, H.-J., Y.-H. Lee, C. Cho, K. R. Kim, and B.-J. Kim, 2016: Estimation of the random error of eddy covariance data from two towers during daytime. *ATMOSPHERE-KOREA* **26**, 483-492. (in Korean with English abstract)
- Mauder, M. and T. Foken, 2006: Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. *Meteorologische Zeitschrift* **15**, 597-609.
- McMillen, R. T., 1988: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple

- terrain. *Boundary-Layer Meteorology* **43**, 231-245.
- Meijide, A., G. Manca, I. Godea, V. Magliulo, P. Di Tommasi, G. Seufert, and A. Cescatti, 2011: Seasonal trends and environmental controls of methane emissions in a rice paddy field in Northern Italy. *Biogeosciences* **8**, 3809.
- Moncrieff, J. B., R. Clement, J. Finnigan, and T. Meyers, 2004: Averaging, detrending and filtering of eddy covariance time series. *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurements* eds. Lee, X., W. J. Massman and B. E. Law. Dordrecht: Kluwer Academic, 7-31.
- Papale, D., 2012: Data gap filling. *Eddy Covariance*, Springer Netherlands, 159-172.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, 2002: Numerical recipes in C-The art of scientific computing, Cambridge Univ. Press, NY, USA.
- Reichstein, M., M. Bahn, M. D. Mahecha, J. Kattge, and D. D. Baldocchi, 2014: Linking plant and ecosystem functional biogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**, 13697-13702.
- 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**, 1424-1439.
- Richardson, A. D., and D. Y. Hollinger, 2007: A method to estimate the additional uncertainty in gap-filled NEE resulting from long gaps in the CO₂ flux record. *Agricultural and Forest Meteorology* **147**, 199-208.
- Richardson, A. D., D. Y. Hollinger, G. G. Burba, K. J. Davis, L. B. Flanagan, G. G. Katul, J. W. Munger, D. M. Ricciuto, P. C. Stoy, and A. E. Suyker, 2006: A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* **136**, 1-18.
- Saigusa, N., S.-G. Li, H. Kwon, K. Takagi, L.-M. Zhang, R. Ide, M. Ueyama, J. Asanuma, Y.-J. Choi, and J. H. Chun, 2013: Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO₂ budget evaluation caused by different data processing. *Journal of Forest Research* **18**, 41-48.
- Sturtevant, C., B. L. Ruddell, S. H. Knox, J. Verfaillie, J. H. Matthes, P. Y. Oikawa, and D. Baldocchi, 2015: Identifying scale-emergent, non-linear, asynchronous processes of wetland methane exchange. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **120**, doi:10.1002/2015JG003054.
- Takagi, K., R. Hirata, X. Wen, H. Kwon, N. Saigusa, K. Ono, and A. Miyata, 2008: Inter-comparison of eddy flux calculation and QC/QA procedures of three flux networks (ChinaFLUX, JapanFlux and KoFlux) under AsiaFlux. *AsiaFlux Newsletter* **26**, 8-11.
- Ueyama, M., R. Hirata, M. Mano, K. Hamotani, Y. Harazono, T. Hirano, A. Miyata, K. Takagi, and Y. Takahashi, 2012: Influences of various calculation options on heat, water and carbon fluxes determined by open-and closed-path eddy covariance methods. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **64**, 19048.
- van Dijk, A., A. F. Moene, and H. A. R. de Bruin, 2004: The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the EC Pack library. Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 99 pp.
- 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**, 85-100.
- Wesely, M., G. Thurtell, and C. Tanner, 1970: Eddy correlation measurements of sensible heat flux near the earth's surface. *Journal of Applied Meteorology* **9**, 45-50.
- Wilczak, J., S. Oncley, and S. Stage, 2001: Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**, 127-150.
- Yuan, R., M.-S. Kang, S.-B. Park, J.-K. Hong, D.-H. Lee, and J. Kim, 2007: The effect of coordinate rotation on the eddy covariance flux estimation in a hilly KoFlux forest catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**, 100-108.
- 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 Forest Meteorology* **17**, 15-24. (in Korean with English abstract)