

KoFlux 에디 공분산 자료 처리의 표준화

홍진규^{1,*} · 권효정¹ · 임종환² · 변영화³ · 이조한³ · 김 준¹

¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소,

²국립산림과학원 산림생태과, ³국립기상연구소 기후연구과

(2008년 12월 27일 접수; 2009년 1월 16일 수정; 2009년 1월 23일 수락)

Standardization of KoFlux Eddy-Covariance Data Processing

Jinkyu Hong^{1,*}, Hyojung Kwon¹, Jong-Hwan Lim², Young-Hwa Byun³,
Johan Lee³ and Joon Kim¹

¹Department of Atmospheric Sciences/Global Environment Lab, Yonsei University, Seoul, Korea 120-749

²Korea Forest Research Institute, Department of Forest Environment

³National Institute of Meteorological Research, Climate Research Lab

(Received December 27, 2008; Revised January 16, 2009; Accepted January 23, 2009)

ABSTRACT

The standardization of eddy-covariance data processing is essential for the analysis and synthesis of vast amount of data being accumulated through continuous observations in various flux measurement networks. End users eventually benefit from the open and transparent standardization protocol by clear understanding of final products such as evapotranspiration and gross primary productivity. In this paper, we briefly introduced KoFlux efforts to standardize data processing methodologies and then estimated uncertainties of surface fluxes due to different processing methods. Based on our scrutiny of the data observed at Gwangneung KoFlux site, net ecosystem exchange and ecosystem respiration were sensitive to the selection of different processing methods. Gross primary production, however, was consistent within errors due to cancellation of the differences in NEE and Re, emphasizing that independent observation of ecosystem respiration is required for accurate estimates of carbon exchange. Nocturnal soil evaporation was small and thus the annually integrated evapotranspiration was not sensitive to the selection of different data processing methods. The implementation of such standardized data processing protocol to AsiaFlux will enable the establishment of consistent database for validation of models of carbon cycle, dynamic vegetation, and land-atmosphere interaction at regional scale.

Key words : Eddy-covariance, Standardization, data processing, Uncertainty, KoFlux

I. 서 론

최근 들어 전세계적으로 인류가 해결해야 할 긴급한 현안으로 떠오르고 있는 기후 변화 문제와 지속 가능한 발전의 추구는 농림기상학자들에게도 커다란 도전이다. 이러한 기후 변화 문제를 과학적으로 연구하는데 있어서 가장 기본적이며 중요한 것이 실측을 통한

지속적인 생태계의 감시라고 할 수 있다. 에디 공분산 방법은 지면과 대기 사이에 교환되는 에너지 및 다양한 물질(수증기, 이산화탄소, 메탄, 에어로졸 등)을 정량화하는 가장 대표적인 미기상학 방법으로서, 전구 타워 플럭스 관측망인 'FLUXNET'에 적용되어 다양한 분야의 연구자들에게 유용한 정보를 제공해오고 있다. 국내 플럭스 관측망인 'KoFlux'(<http://koflux.org>)

* Corresponding Author : Jinkyu Hong (jkhong@yonsei.kr, hong.jinkyu@gmail.com)

에서도 아시아 대륙의 생태계 감시 네트워크인 'AsiaFlux'의 핵심 허부구조로서 한반도의 주요 육상생태계와 극지 생태계의 상태를 지속적으로 감시해오고 있다.

적용 조건을 만족하는 환경에서 에디 공분산 방법을 사용할 경우, 대상 생태계를 손상시키지 않고 에너지, 물 및 탄소 순환에 관한 중요한 정보들을 직접 관측하여 얻을 수 있다. 이때 관측된 시계열 자료의 불확실성을 초래할 수 있는 몇 가지 요인들 중에서 상당 부분은 자료의 처리와 품질 관리의 다양성과 주관성에 기인한다. 일반적으로 연구자들이 개별적으로 만들어 사용하는 특별한 자료 처리 및 품질 관리 방법에 따라 모형 개발자나 정책 연구자들이 원하는 최종 결과물의 값이 크게 달라질 수 있다. 따라서 자료 처리 과정을 투명하게 공개하거나 표준화함으로써 자료의 독점에서 생길 수 있는 문제점을 예방할 뿐만 아니라 최종 사용자들이 자료 처리에 보내야 하는 시간을 줄임으로써 보다 효과적으로 다양한 분야의 연구자들과의 협력을 가능하게 하고 최종 사용자들이 올바른 정보 해석을 할 수 있도록 도울 수 있다.

이러한 자료 처리의 표준화는 FLUXNET를 중심으로 다양한 연구 그룹에서 진행되어 오면서, 모형과 자료의 새로운 융합의 장을 여는데 크게 기여하였다 (Papale *et al.*, 2006). 국내에서도 KoFlux의 경우, 오래 전부터 자료 처리 과정을 공개하고 자료 처리에 관련된 불확실성을 정량화 해왔다(Hong and Kim 2002; Kwon *et al.*, 2007; Yuan *et al.*, 2007). 본 연구에서는 그 동안의 연구 결과를 종합하여 관측자료의 품질 관리와 결측 자료 메우기 과정을 문서화하고 개별 자료 처리 과정에서 생기는 오차에 관해서 언급하고자 한다. 따라서 이 논문에서는 1) 기존의 자료 처리 방법에 대한 간단한 요약과; 2) KoFlux에서 사용하는 품질 관리, 튀는 자료 제거, 야간 자료 보정 및 결측 자료 메우기 방법을 설명하고; 3) 마지막으로 자료 처리에 따른 결과의 불확실성에 대해서 논의한다.

II. 관측 자료

본 연구에서는 KoFlux의 관측지중의 하나인 경기도 광릉의 40m 타워에서 에디 공분산 방법으로 관측된 자료를 이용하였다. 광릉에 설치된 타워는 10도 정도의 평균 경사도를 가진 활엽수림 지역에 위치하고 있

으며 군락의 높이는 18m 정도이다. 에디 공분산 방법을 적용하기 위해서 3차원 초음파 풍향 풍속계 (CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan, Utha, USA)와 적외선 기체 분석기(LI7500, LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA)가 사용되었으며, 동시에 다른 기상 및 토양 변수들(복사, 온습도, 토양온도, 토양수분)도 함께 측정되었다. 고속 반응 기기는 10Hz의 속도로 자료를 집록하였고 평균 시간은 30분 이었다. 자세한 정보는 Yuan *et al.*(2007)과 Kwon *et al.*(2007)에서 찾아볼 수 있다.

III. KoFlux 표준화 방법

KoFlux에서는 관측된 에디 공분산 자료로부터 원하는 최종 결과물인 증발산량, 순생태계교환량, 총일차생산량 및 생태호흡량을 추정하기 위하여 Fig. 1에 설명된 순서대로 자료 처리가 이루어진다. 개별 처리 과정에 대한 간략한 설명은 다음과 같다.

3.1. 좌표 변환 및 밀도 효과 보정

에디 공분산 방법을 사용하여 관측된 자료로부터 난류 플럭스를 산출하려면 우선 좌표 회전 과정이 필요하다. 이러한 좌표 변환은 서로 다른 시공간에서 관측된 자료를 일관성 있게 처리 분석하여 그 물리적 의미를 찾는 데 필수적이다. 좌표 변환을 위해 여러 가지 다른 방법들이 제시되었는데, 복잡 지형에서는 지형의

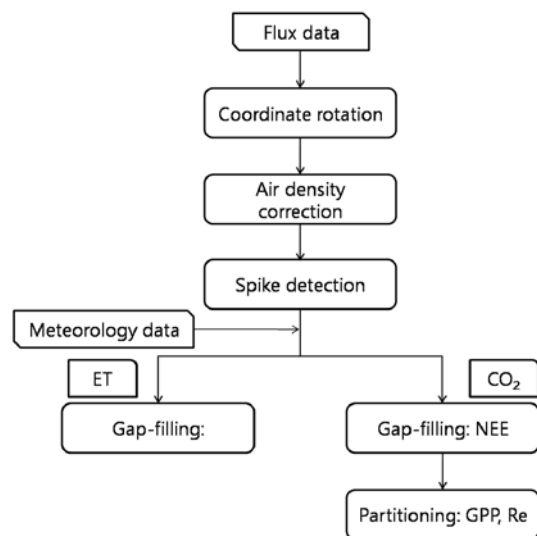


Fig. 1. Flowchart of data processing in KoFlux.

변화에 따른 공기 흐름의 변화를 고려하는 평면 맞추기 회전(planar fit rotation: PFR) 방법이 권장되고 있다(Lee *et al.*, 2004). KoFlux 자료 처리 프로그램에서는 복잡지형으로 인해 풍향에 따라 달라지는 경사도의 차이를 고려하기 위하여 Wilczak *et al.*(2001)이 제시한 PFR을 풍향에 따라 독립적으로 적용하여 좌표 변환 계수를 계산한다(Hong and Kim 2002; Yuan *et al.*, 2007). 이와 함께 식생의 성장에 따른 지표면 경사의 변화를 고려하기 위하여 28일 주기로 PFR을 적용하여 새로운 좌표 변환 계수를 계산한다. 아울러 PFR 뿐만 아니라 Wesely(1970)에 의해 제시된 평균류의 방향으로 x 축을 정렬하는 기존의 좌표 변환 방법도 함께 FORTRAN90으로 프로그램화하여 선택적으로 사용할 수 있어서 좌표 변환에 따른 자료의 불확실성을 정량화하는데 유용하게 사용될 수 있다.

잠열과 현열의 동시 수송으로 인한 공기의 밀도 변화에 따른 플럭스 보정은 Webb *et al.*(1980)에 의해서 처음 제시 되었는데, 이산화탄소와 같이 농도가 낮은 온실기체나 미량기체(메탄, 이산화질소 등)의 플럭스를 산출하는데 있어서 매우 중요하다. 최근에 Burba *et al.*(2006)과 Grell and Burba(2007)는 에디 공분산 방법에 사용되는 개회로(open-path) 적외선 기체분석기의 자체 온도에 의한 공기 밀도 보정 효과의 오차를 보고하였다. 그러나 KoFlux 자료를 분석해 본 결과, 이러한 추가적인 보정이 큰 효과를 보이지 않았다. 따라서 KoFlux에서는 Webb *et al.*(1980)과 Kaimal and Finnigan(1994)에 제시된 식들을 사용하여 프로그램화 하였다.

3.2. 튀는 자료 제거

자료 처리에서 불확실성을 증가시키는 중요한 이유 중의 다른 하나는 여러 가지 원인으로 인해서 발생하는 튀는 자료들이다. 이러한 자료들을 제거하기 위해서는 비정상적으로 튀는 값들을 찾아낼 수 있는 알고리즘이 필요하다. KoFlux에서는 Matlab을 이용하여 FLUXNET의 표준 방법인 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용한 튀는 자료 찾기 방법을 사용한다. 구체적으로 이 방법에서는 3개의 연속된 자료의 차이로부터 d 지수를 아래와 같이 계산한다(Papale *et al.*, 2006).

$$d_i = (NEE_i - NEE_{i-1}) - (NEE_{i+1} - NEE_i) \quad (1)$$

계산된 d 지수가 이 값의 절대값의 중앙값(median)

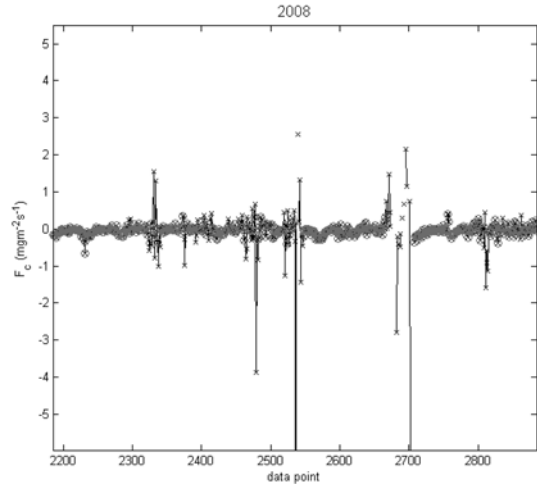


Fig. 2. Examples of spike detection and removal in CO₂ fluxes (F_c) observed at Gwangneung KoFlux site in 2008. Cross with black line and red circle are CO₂ flux before and after spike removal, respectively.

으로부터 벌어진 정도를 가지고 튀는 자료를 판단하게 된다. 이 때 중앙값으로부터 어느 정도 벌어나야 튀는 자료로 분류될 것인가에 대한 기준을 프로그램 내에서 사용자가 원하는 대로 설정할 수 있게 되어 있는데, KoFlux에서는 4를 사용한다.

Papale *et al.*(2006)의 경우, 이 방법을 NEE자료에만 적용하여 튀는 자료를 제거하였다. 그러나 이 방법은 3개의 연속된 자료를 활용하기 때문에 튀는 자료가 연속적으로 지속되는 경우에는 적절한 결과를 얻지 못할 수 있다. 따라서 KoFlux에서는 이 점을 보완하기 위하여 난류 편차에 직접 영향을 주는 이산화탄소나 수증기 농도뿐만 아니라 개회로 적외선 기체 분석기에서 나오는 AGC(automatic gain control)의 값을 함께 활용하여 튀는 자료를 제거하였다(Fig. 2). 이러한 경우에 농도의 급격한 변화를 찾아내게 됨으로써 간접적으로 비정상성(nonstationarity) 점검을 함께 수행한 것이 된다.

여기서 주목할 것은 적분 난류 특성(integral turbulence characteristics: ITC)이 KoFlux 자료처리 프로그램에서는 사용되지 않은 점이다. 그 이유는 1) 복잡 지형에서 ITC가 기존의 수평적으로 균질한 지형에서 관측된 이론적 결과와 같아야 하는지에 대한 의문점과; 2) 거칠기이층(roughness sublayer)에서 Monin-Obukhov 상사 이론을 적용하는데 있어서 운동량 및 서로 다른 스칼라(예, 온도, 수증기, 이산화탄소)의 비

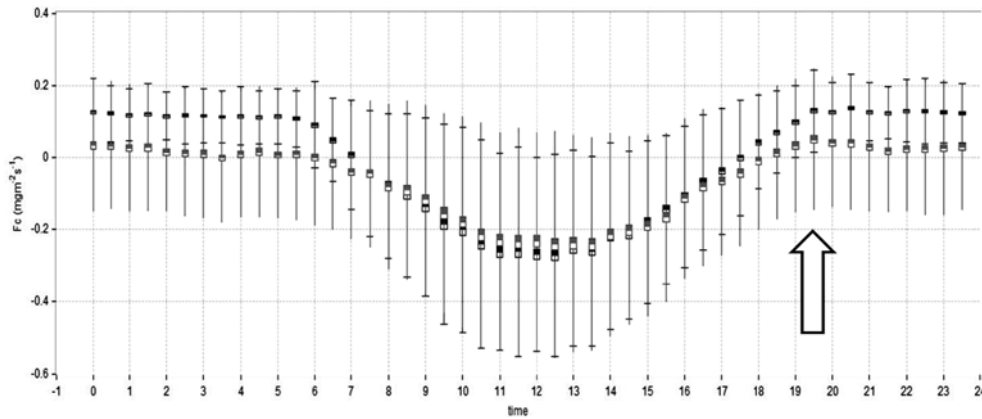


Fig. 3. Mean diurnal variation of CO₂ fluxes (F_c). Vertical horizontal line and vertical box imply standard deviation and standard error, respectively. Black arrow indicates the time of maximum CO₂ fluxes. Red and blue colors are O₂ fluxes before and after the nighttime correction.

균질성 문제 때문이다.

3.3. 결측 자료 메우기

3.3.1. 야간 이산화탄소 플럭스의 보정

야간에 난류 강도가 약할 때는 저류항이나 이류항이 난류 플럭스항보다 더 큰 기여를 하게 된다. 이러한 경우에는 에디 공분산 방법을 사용할 수 있는 조건이 위배되면서 관측 값이 과소 평가되는 계통 오차를 초래한다. 이러한 과소 평가를 보정하려면 1) 온도나 토양 수분의 함수로 주어지는 기준 함수에 대해서 관측된 야간 생태호흡량, Re 의 과소 평가를 정량화하여 과소평가되는 난류 강도의 기준이 되는 마찰 속도(u_*)를 찾아내고; 2) 이렇게 정해진 기준 마찰속도보다 관측된 마찰 속도가 작을 경우에는 위에 제시된 Re 의 기준 함수값으로 대체하게 된다. 이러한 방법을 '마찰 속도 보정'이라고 하고 많은 연구에 사용되어 오고 있다. 그러나 객관적으로 어떻게 기준이 되는 마찰 속도를 정할 것인가에 관한 문제와 균락 상부의 마찰 속도가 균락 하부의 난류 강도를 과연 제대로 표현할 수 있는가에 대한 의문점들이 꾸준히 제시되고 있다 (Gu *et al.*, 2005; Acevedo *et al.*, 2009).

최근에 이러한 문제들을 피해갈 수 있는 새로운 방법이 van Gorsel *et al.*(2007)에 의해 제시되었다. 이 방법은 에디 공분산 방법으로 관측된 NEE와 저류항의 합의 최대값이 야간 이류효과가 아직 발현되기 전인 해질녘 무렵에 나타나며, 따라서 이 때의 값만을 사용해서 Re 에 대한 기준 함수를 계산한다. 이 방법

으로 계산된 Re 값은 독립적으로 다르게 계산된 Re 값과 비교했을 때 거의 완벽한 일치율을 보였다(van Gorsel *et al.*, 2006).

KoFlux 자료의 경우에도 해질녘 부근인 오후 6시에서 8시 사이에 최대값이 나타났으며, 이 값을 이용하여 대기 온도로 Re 를 표현하였을 때가 모든 자료를 사용했을 때 보다 상관관계가 크게 증가하였다. 이에 따라 KoFlux에서는 Matlab을 활용하여 이 과정을 프로그래밍화 하였으며, 관측된 야간 난류 플럭스 값이 이렇게 얻어진 기준 함수의 95% 신뢰 구간을 벗어나 과소 평가될 경우에 보정을 수행하였다. 이러한 보정을 적용한 경우에는 해질녘에 나타나는 NEE의 최대값이 사라짐을 알 수 있다(Fig. 3). 이러한 야간 이산화탄소의 플럭스 보정은 야간에 플럭스의 결측이 있을 때에도 사용되었다. 이때 기준이 되는 생태계 호흡량 함수는 다음의 식을 사용하였다(Llyod and Taylor, 1994):

$$Re = R_{ref} \exp\left(E_0 \left[\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right]\right) \quad (2)$$

여기서 R_{ref} 는 기준 생태호흡량, T_{ref} 는 기준 온도 (=10°C), E_0 는 활성화 에너지, T_0 는 -46.02°C, 그리고 T_a 는 기온이다. R_{ref} 와 E_0 는 기온과의 회귀 과정을 통하여 얻게 되는데, 연간 자료를 처리하는데 있어서 이 두 회귀 모수들을 상수로 결정할 때 생기는 문제가 제기된 바 있어(Reichstein *et al.*, 2005), FLUXNET에서는 R_{ref} 와 E_0 를 토양 수분 등의 시간의 함수로 결정하도록 자료를 처리하였다. 이러한 고려가 물리적으로

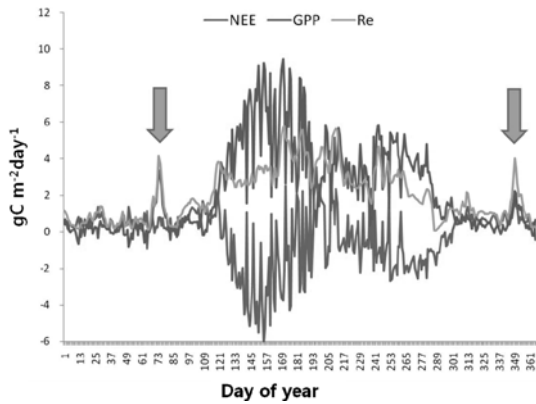


Fig. 4. Annual variation of NEE, GPP and Re processed by the FLUXNET standardized data processing methods at Gwangnung KoFlux site in 2006 (Adapted from Kwon *et al.*, 2009). Abrupt increases in early spring and winter (indicated by two arrows) were the artifact from the nocturnal data processing methods.

보다 나은 결과를 만들어낼 수도 있지만, 자료의 결측 기간이 길거나 또는 자료의 급격한 변화가 있을 때에는 물리적으로 불가능한 큰 값들을 만들어내는 단점이 있다(Fig. 4). 따라서 KoFlux에서는 Matlab을 사용하여 R_{re} 는 단기간의 변화를 고려하는 반면에 E_0 는 장기간의 자료로부터 얻어진 자료를 사용하였다.

3.3.2. 주간 이산화탄소 플럭스 결측 자료 메우기

주간 이산화탄소 플럭스의 결측은 FLUXNET의 표준화 방법인 수정된 색인 목록 방법(modified lookup table method: MLTM)을 사용하였다(Reichstein *et al.*, 2005). 이때 사용되는 색인 목록은 복사, 기온, 포차를 각각 $30Wm^{-2}$, $2.5^{\circ}C$, $5hPa$ 간격으로 분류하였다. 평균 일변화(mean diurnal variation) 방법을 사용하는 경우, 장마로 인한 장기간의 결측이 있는 우리나라 기후의 특성상 NEE를 과대평가하는 계통 오차가 발생할 수 있기 때문에 프로그램화하지 않았다. 또한 NEE의 빛에 대한 반응 관계식을 이용하는 방법의 경우도 NEE에 영향을 주는 다른 인자들(예, 온도, 습도)의 효과가 고려되지 않았기 때문에 고려하지 않았다. Fig. 5는 위에서 제시한 야간 및 주간 이산화탄소 플럭스의 결측자료 메우기 방법을 적용하여 얻은 광릉 산림에서의 NEE, GPP, Re의 연변화를 나타낸다.

3.3.3. 증발산 결측 자료 메우기

KoFlux에서는 증발산 자료의 결측을 메우기 위하여

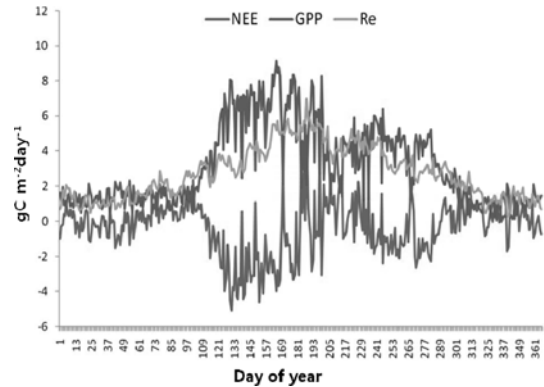


Fig. 5. Annual variation of NEE, GPP and Re processed by the KoFlux standardized processing method at Gwangnung KoFlux site in 2008.

1) 이산화탄소 플럭스 결측 자료를 메우는데 사용된 수정된 색인 목록 방법(Reichstein *et al.*, 2005)과 2) Penman-Monteith 복합 방정식에 칼만 필터(Kalman filter)를 적용하는 두 가지 방법을 Matlab을 이용하여 프로그램화 하였다. 구체적으로 칼만 필터 방법을 적용하기 위해 잠열 플럭스(LE)를 Penman-Monteith 복합 방정식으로 표현하고 평형증발과 부과 증발의 기여를 나타내는 각각의 전도도 함수를 시간의 함수 $a(t)$ 와 $b(t)$ 로 다음과 같이 표현한다.

$$LE = a(t)(Rn - G) + b(t)\delta e + \xi(t) \tag{3}$$

여기서 백색 잡음(white noise)인 $x(t)$ 의 범위 안에서 순복사(Rn), 지중열 플럭스(G), 그리고 포차(de)를 LE 에 동적 선형 회귀(dynamic linear regression: DLR) 방법을 적용하여 시간 t 의 함수인 계수 $a(t)$ 와 $b(t)$ 를 구할 수 있다(Young *et al.*, 2004). 본 연구에서는 Young *et al.*(2004)의 ‘Captain toolbox’를 사용하였다.

IV. 결 과

Figs. 6~8은 서로 다른 자료 처리 방법들로부터 산출된 연간 총 NEE, GPP 및 Re 값의 불확실성을 정량화한 결과를 보여준다. 이 그림에 제시된 표준 방법은 PFR 좌표 변환 방법, 윈도우 크기는 13일, 튀는 자료 제거를 위한 기준값은 4를 사용하였다. 이 결과에서 서로 다른 자료 처리 방법으로부터 얻어진 NEE가 음수로서 관측지인 광릉 활엽수림이 탄소의 흡원의 역할을 하고 있음을 알 수 있다. NEE와 Re 결

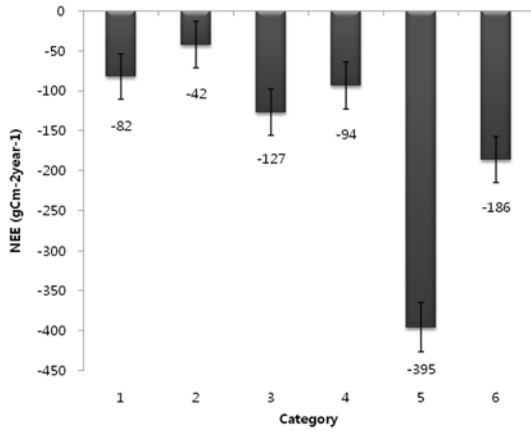


Fig. 6. Annual NEEs with standard error at Gwangneung KoFlux site in 2008 processed by different conditions and methods. Category 1: double rotation by Wesely (1970) with spike detection threshold of 4.0 and window size of 13 days; Category 2: double rotation by Wesely (1970) with spike detection threshold of 7.0 and window size of 13 days; Category 3: PFR with spike detection threshold of 4.0 and window size of 13 days; Category 4: PFR with spike detection threshold of 7.0 and window size of 13 days; Category 5: PFR with spike detection threshold of 4.0 window size of 13 days but different nighttime flux correction (typical u_* correction with critical u_* of 0.1); Category 6: PFR with spike detection threshold of 4.0 window size of 13 days but different nighttime flux correction (typical u_* correction with critical u_* of 0.5). From category 1 to 4, modified lookup table method and the Llyod and Taylor equation were used to permit short-term variation of reference ecosystem respiration for gap filling.

과는 자료 처리 방법에 매우 민감하였다. NEE의 경우는 $-395 \sim -42 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 의 범위를 가지고 변화였으며, Re의 경우에는 $747 \sim 1075 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 의 범위의 값을 보였다. 특히 주관적으로 결정될 수 있는 마찰 속도 보정방법에서 기준 마찰 속도 값에 따라서 결과가 매우 다를 수 있음에 주목할 필요가 있다.

여기서 흥미로운 사실 하나는, GPP의 경우 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이가 불과 4%이며, 모두 표준 오차의 범위 안에 포함된다는 것이다. 이러한 결과는, 상대적으로 NEE의 절대값을 크게 산출해 내는 방법의 경우 동시에 Re 값을 다른 방법에 비해 상대적으로 작게 산출해 내기 때문이다. 결국 다른 자료 처리 방법을 사용하더라도 구성 성분인 NEE와 Re 값은 다르게 나오지만 서로 상쇄되어 결과적으로 GPP는 오차 범위 내에서 일치하는 경향을 보인다는 것이다. 이산화탄소 플럭스의 경우, 이렇게 야간 자료의 처리 방법에 따라 민감도가 크게 나타나는 이유는 낮

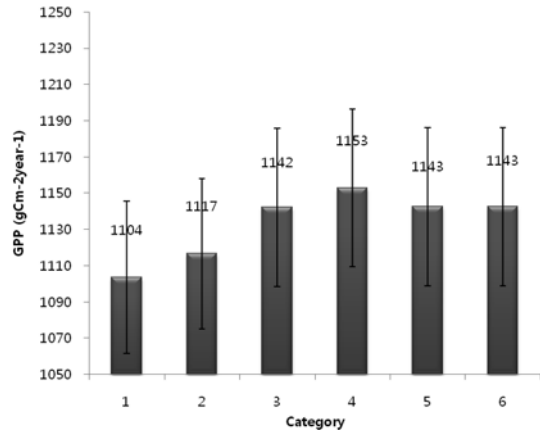


Fig. 7. Same with Fig. 6 except for GPP.

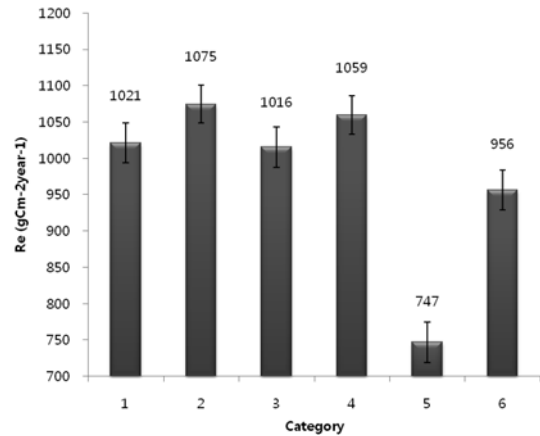


Fig. 8. Same with Fig. 6 except for Re.

에 광합성에 의한 이산화탄소의 흡수와 밤에 호흡에 의한 방출이 거의 균형을 이룰 때 자료 처리 방법의 차이에 따라 결과가 달라지기 때문이다. 또한 토양 또는 생태계 호흡에 대한 독립적인 관측 결과가 있을 경우, 보다 정확하게 탄소 순환을 진단하고 이해할 수 있음을 시사한다. 한편 표준 방법으로 자료를 처리한 경우의 연변화 양상을 보면, 4월에 잎이 나오면서 GPP가 급격히 증가하였다가 여름 장마 기간인 6월 말에서 7월 중순까지 감소하는 모습을 보인다(Fig. 5). 이때 Re는 상대적으로 덜 감소하여 전체적으로 NEE는 거의 0에 근접하게 된다(Kwon *et al.*, 2009).

한편 분석이 이루어진 광릉 산림의 경우, 야간의 토양 증발량이 상대적으로 매우 작기 때문에 관측지의 불균질성에 따른 이류 효과가 상대적으로 적을 것이며 이에 따라 연간 총 증발산량도 다른 자료 처리 방법

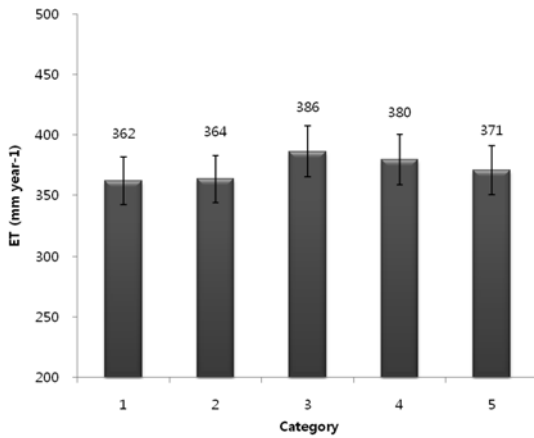


Fig. 9. Annual evapotranspiration (ET) with standard error at Gwangneung KoFlux site in 2008 processed by different conditions and methods. Category 1: double rotation by Wesely (1970) with spike detection threshold of 4.0, window size of 13 days and MLTM for gap-filling; Category 2: double rotation by Wesely (1970) with spike detection threshold of 7.0, window size of 13 days and MLTM for gap-filling; Category 3: PFR with spike detection threshold of 4.0, window size of 13 days and DLR for gap-filling; Category 4: PFR with spike detection threshold of 7.0, window size of 13 days and DLR for gap-filling; Category 5: PFR with spike detection threshold of 4.0 window size of 13 days and MLTM for gap-filling.

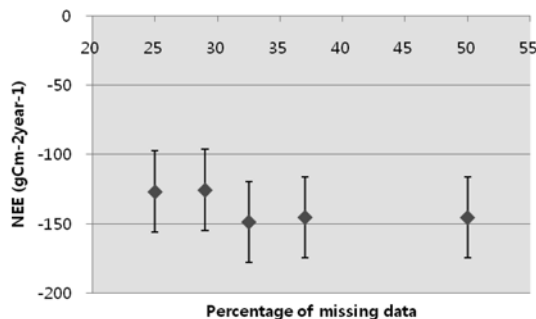


Fig. 10. Annual NEE with different amount of artificially generated missing data.

을 사용하더라도 큰 차이를 보이지 않고 오차 범위 안에서 일치된 결과를 보였다(Fig. 9). Fig. 10은 관측자료에서 결측 자료를 인위적으로 무작위로 제거하면서 증가시켰을 때 표준화된 자료 처리 방법(Fig. 6의 category 3)으로 부터 계산된 NEE의 값을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 결측자료가 증가하여도 표준화된 방법으로부터 계산된 NEE값은 오차 범위 안에서 일치하였고 대략 $20 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 의 오차를 가질 수 있음을 보여준다.

V. 요약

KoFlux에서는 현재 사용되고 있는 다양한 자료 처리 방법들을 검토하고 장단점을 파악하여 보다 정확한 자료 처리와 관련 불확실성을 줄일 수 있는 표준화된 자료 처리 프로그램을 제시하였다. 본 연구에서 구축된 표준화된 방법은 좌표 변환과 공기 밀도 보정 후에 튀는 자료를 제거하고, 이산화탄소 플럭스와 증발산량에 대해서 각기 다른 결측 자료 채우기 방법을 적용하였다. 표준화된 방법을 사용할 경우, 기존의 방법을 사용할 때 지적되었던 갑작스런 Re의 증가가 없어졌으며, 결측 자료가 증가하는 경우에도 일관된 결과를 생산하였다. 광릉 활엽수림 자료의 처리에 적용한 결과 확인된 사실을 요약하면 (1) 야간의 호흡과 주간 광합성량이 균형을 이루는 경우, 선택한 자료 처리 방법에 따라 NEE와 Re가 큰 차이를 보였으나 서로 상쇄되어 GPP는 자료 처리 방법에 상관없이 오차 범위 내에서 결과가 같았고, (2) 토양 증발이 적어 이류 효과가 상대적으로 적은 경우, 총 증발량 또한 자료 처리 방법에 상관없이 오차 범위 안에서 결과가 일치하였다. 본 연구 결과는 자료 처리 방법의 선택이 자료의 분석과 해석에 중요한 영향을 미치며, 투명하고 명확한 물리적 근거를 가진 자료 처리 방법의 중요성을 잘 보여주었다.

적요

연속적인 지표 플럭스 관측으로부터 측정되는 엄청난 양의 자료를 체계적으로 처리분석하고 종합하여 일관성 있는 결과를 도출해 내려면 에디 공분산 자료 처리 방법의 표준화가 우선되어야 한다. 이 논문에서는 국내 타워 플럭스 관측 네트워크인 KoFlux의 표준화된 자료 처리 방법을 소개하고, 처리 방법이 다른 경우에 생길 수 있는 지표 플럭스의 불확실성을 평가하였다. 광릉 활엽수림에서 관측된 탄소 플럭스의 경우, 순생태계교환량(net ecosystem exchange, NEE)과 생태계호흡량(ecosystem respiration, Re)은 각각 자료 처리 방법의 차이에 따라 민감한 반응을 보였다. 그러나 두 양이 서로 상쇄되어, 총일차생산량(gross primary productivity, $GPP = NEE + Re$)은 자료 처리 방법이 다른 경우에도 불구하고 오차 범위 내에서 일치하였다. 이러한 결과는 GPP를 산출할 때에 Re를 독립적으로

관측하는 것이 중요함을 시사한다. 반면 수증기 플럭스(증발산)의 경우, 야간 토양 증발이 작아서 연 적산 증발산량은 자료 처리 방법에 민감하지 않았다. 이렇게 표준화된 자료처리 프로토콜을 아시아 타워 플럭스 네트워크인 AsiaFlux에 적용할 경우, 지역 규모 탄소 순환, 역학 식생 및 지면과정 모형의 검증을 위한 일관성 있는 데이터베이스의 구축이 가능해 질 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호: 1-8-3)과 국립산림과학원 “지구환경변화에 대응한 장기생태연구”와 기상청 국립기상연구소 주요사업 “신진기상기술개발(NIMR-2009-C-1)”의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

- Acevedo, O. C., O. L. L. Mores, G. A. Degrazia, D. R. Fitzjarrald, A. O. Manzi, and J. G. Campos, 2009: Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 1-10.
- Burba G. G., D. J. Anderson, L. Xu, and D. K. McDermitt, 2006: Additional term in the Webb-Pearman-Leuning correction due to surface heating from an open-path gas analyzer, EOS Trans. *AGU*, **87**(52), *Fall Meeting Supplementary*, Abstract C12A-03.
- Grelle, A., and G. Burba, 2007: Fine-wire thermometer to correct CO₂ fluxes by open-path analyzers for artificial density fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology* **147**, 48-57.
- Gu, L., E. M. Falge, T. Boden, D. D. Baldocchi, T. A. Black, S. R. Saleska, T. Suni, B. Verma, T. Vesala, S. C. Wofsy, and L. Xu, 2005: Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. *Agricultural and Forest Meteorology* **128**, 179-197.
- 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)
- Kaimal J. C., and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their structure and measurement*. Oxford University Press, 289pp.
- Kang, M., H. Kwon, J. Hong, and J. Kim, 2009: Estimation of soil evaporation by low level eddy covariance system in deciduous and coniferous forests. Preprints, *CarboEastAsia Workshop*, Tsukuba, Japan.
- Kwon, H., S. Park, M. Kang, J. 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)
- Lee, X., W. Massman, and B. Law, 2004: *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 250pp.
- 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. *Biogeoscience* **3**, 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**, 1424-1439.
- van Gorsel, E., R. Leuning, H. Cleugh, H. Keith, and T. Suni, 2007: Nocturnal carbon efflux: reconciliation of eddy covariance and chamber measurements using an alternative to the u_* -threshold filtering. *Tellus* **59B**, 397-403.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* **106**, 85-100.
- Wesely, M., 1970: Eddy correlation measurements in the atmospheric surface layer over agricultural crops, Ph. D. Dissertation, University Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA.
- Wilczak, J. M., S. P. Oncley, and S. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**, 127-150.
- Young, P. C., C. J. Taylor, W. Tych, D. J. Pedregal, and P. G. McKenna, 2004: The Captain toolbox, Center for Research on Environmental Systems and Statistics, Lancaster University.
- Yuan, R., M. Kang, S. Park, J. Hong, D. 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.