

장기 관측 에디 플럭스 자료의 연속성 확보에 대하여: 개회로 및 봉폐회로 기체분석기의 야외 상호 비교

강민석^{1*} · 김준^{2,3,4,5,6} · 양현영^{2,5} · 임종환⁷ · 천정화⁸ · 문민규⁹

¹국가농림기상센터, ²서울대학교 협동과정 농림기상학전공,

³서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공, ⁴서울대학교 농업생명과학연구원,

⁵서울대학교 아시아연구소 미래지구 프로그램, ⁶서울대학교 평창캠퍼스 그린바이오과학기술연구원,

⁷국립산림과학원 기후변화생태과, ⁸국립산림과학원 연구기획과, ⁹보스턴대학교 지구환경학부

(2019년 9월 16일 접수; 2019년 9월 25일 수정; 2019년 9월 27일 수락)

On Securing Continuity of Long-Term Observational Eddy Flux Data: Field Intercomparison between Open- and Enclosed-Path Gas Analyzers

Minseok Kang^{1*}, Joon Kim^{2,3,4,5,6}, Hyunyoung Yang^{2,5},
Jong-Hwan Lim⁷, Jung-Hwa Chun⁸ and Minkyu Moon⁹

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

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

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

⁴Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1, Gwanak-ro,
Gwanak-gu, Seoul, 08826, South Korea

⁵Future Earth Program, Asia Center, Seoul National University, 1, Gwanak-ro,
Gwanak-gu, Seoul 08826, South Korea

⁶Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University Pyeongchang
Campus, 1447, Pyeongchang-daero, Deahwa-myeon, Pyeongchang, 25354, South Korea

⁷Forest Ecology & Climate Change Division, National Institute of Forest Science, 57,
Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, South Korea

⁸Research Planning & Coordination Division, National Institute of Forest Science, 57,
Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, South Korea

⁹Department of Earth and Environment, Boston University, 685 Commonwealth Ave., Boston, MA 02215, USA
(Received September 16, 2019; Revised September 25, 2019; Accepted September 27, 2019)

ABSTRACT

Analysis of a long cycle or a trend of time series data based on a long-term observation would require comparability between data observed in the past and the present. In the present study, we proposed an approach to ensure the compatibility among the instruments used for the long-term observation, which would allow to secure continuity of the data. An open-path gas analyzer (Model LI-7500, LI-COR, Inc., USA) has been used for eddy



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

covariance flux measurement in the Gwangneung deciduous forest for more than 10 years. The open-path gas analyzer was replaced by an enclosed-path gas analyzer (Model EC155, Campbell Scientific, Inc., USA) in July 2015. Before completely replacing the gas analyzer, the carbon dioxide (CO₂) and latent heat fluxes were collected using both gas analyzers simultaneously during a five-month period from August to December in 2015. It was found that the CO₂ fluxes were not significantly different between the gas analyzers under the condition that the daily mean temperature was higher than 0°C. However, the CO₂ flux measured by the open-path gas analyzer was negatively biased (from positive sign, i.e., carbon source, to 0 or negative sign, i.e., carbon neutral or sink) due to the instrument surface heating under the condition that the daily mean temperature was lower than 0°C. Despite applying the frequency response correction associated with tube attenuation of water vapor, the latent heat flux measured by the enclosed-path gas analyzer was on average 9% smaller than that measured by the open-path gas analyzer, which resulted in >20% difference of the sums over the study period. These results indicated that application of the additional air density correction would be needed due to the instrument heat and analysis of the long-term observational flux data would be facilitated by understanding the underestimation tendency of latent heat flux measurements by an enclosed-path gas analyzer.

Key words: Eddy covariance, Long-term observation, Continuity, Gas analyzer, Compatibility, Gwangneung deciduous forest

I. 서론: 광릉 활엽수림 플럭스 관측지의 역사

국내 에디 공분산(Eddy covariance, EC) 플럭스 관측망인 KoFlux가 2002년 1월 공식 출범한 이래, 플럭스 관측지의 수뿐만 아니라 관측기간의 길이도 꾸준히 늘어나고 있다. 광릉 활엽수림 관측지(Gwangneung deciduous forest, GDK, previously named Kwangneung and DK)는 국가장기생태연구사업의 연구대상지로서, 2000년 4월부터 현재까지 관측이 이루어져 오고 있는, 명실공히 국내 최장의 관측역사를 가지고 있다. 초기에는 현재의 생태타워 위치(현재 플럭스 타워 위치에서 서쪽으로 약 70m 정도 떨어짐)에서 관측이 진행되었다가, 2004년 10월부터 현재 플럭스 타워 위치로 옮겨졌다. 현재 아시아와 전지구 플럭스 관측망인 AsiaFlux (<https://db.cger.nies.go.jp/asiafluxdb/>) 및 FLUXNET 데이터베이스(<https://fluxnet.fluxdata.org/data/la-thuile-dataset/>)에 등재된 자료들은 타워 이전 후에 관측된 자료들이다. 이후, 비교적 최근인 2015년 7월부터 같은 위치에 새로운 플럭스 타워가 세워져 현재까지 관측이 지속되고 있다. 장기간 플럭스 관측에 EC 시스템을 구성하는 3차원 초음파 풍향 풍속 온도계(Sonic anemometer and thermometer, SAT)와 적외선 또는 자외선 분광학 기반의 고속반응 기체분석기

(Fast response gas analyzer, FRGA)로 다양한 모델들(e.g., SAT: Models CSAT3, 81000, FRGA: Models LI-7500, EC155, KH20)이 이용되었다. 많은 연구자들이 지난 20년에 가까운 기간 동안 GDK에서 관측을 수행해 오면서 EC 플럭스 관측 분야에 족적을 남겼다(Kim and Rho, 2003; Kim, 2005; 2007; Kim *et al.*, 2009; Kwon and Lee, 2010; Kang *et al.*, 2018c).

장기간 이산화탄소(CO₂) 플럭스 관측을 통해, 550여 년 동안 잘 보존된 성숙한 산림인 광릉 활엽수림이 CO₂를 연간 얼마나 흡수하며, 그 계절 및 경년변동이 아시아 몬순기후에서 어떻게 일어나는지 확인할 수 있었다. Choi *et al.*(2003)은 지면이 평평하고 균질해야 한다는 EC 플럭스 관측의 기본가정에서 벗어난 복잡 산림지형에 위치한 GDK 관측지에서 관측된 CO₂ 플럭스를 최초로 보고하였다. 자료수득률은 낮았으나 수집된 자료들의 품질이 이상적인 장소에서 관측된 것과는 크게 다르지 않음을 밝혔다. Kwon *et al.*(2009)은 광릉 활엽수림이 탄소 중립에 가까운 약한 흡원이고, 여름철 장마 기간 동안 일사량의 감소가 광합성량 감소로 이어져 순생태계교환량(Net ecosystem exchange, NEE)이 음의 값(CO₂ 흡원)에서 양의 값(발원)으로 전환됨(Mid-season depression)을 보고하였다. 이러한 NEE의 Mid-season depression은 해마다 반복적으로 일어나지만 장마기간과 세기에 따라 달라진다(Kwon

et al., 2010). Hong and Kim (2011)은 아시아 몬순으로 인한 장마, 태풍이 일사, 풍속과 같은 기후조건뿐만 아니라 엽면적지수(Leaf area index, LAI) 감소와 같이 산림생태계 자체에도 영향을 주며, 이로 인해 NEE가 달리짐을 파엽(Wavelet)분석과 생태계 모델링을 통해 밝혔다.

이러한 아시아 몬순의 영향은 NEE뿐만 아니라 증발산(Evapotranspiration, ET)에서도 확인되었다. Park (2001)은 GDK에서 관측된 ET 및 이를 Penman-Monteith 복합방정식을 이용해 분석한 연구를 최초로 보고하였는데, 정확한 ET의 측정과 계절적인 변화 특성, 그리고 이를 조절하는 기작의 이해를 위해서는 토양 증발량 및 LAI의 연속적인 측정이 필수적임을 강조하였다. Kang *et al.*(2009b)은 장마기간에 NEE와 유사하게 ET의 Mid-season depression이 일어남을 확인하였다. 산림생태계의 ET는 식생으로부터의 증산(T), 토양(E_s) 및 차단 강수로부터의 증발(E_{wc})로 나눌 수 있는데, GDK의 전체 ET의 중에 E_s 의 기여를 확인하고자 Kang *et al.*(2009a)은 군락 내에 저층 EC 시스템을 설치하여 하부 군락의 ET ($\sim E_s$)를 관측하였다. E_s 는 총 ET의 15.6%를 차지하였으며, 전반적으로 LAI가 최대인 여름을 제외하고는 그 기여를 무시할 수 없음을 보였다. 강우 발생 시 개회로(Open-path) FRGA가 제대로 동작하지 않아 이때 발생하는 E_{wc} 가 상당부분 결측 되는데, Kang *et al.*(2012)은 군락 젖음을 고려하지 않은 기존의 결측 메우기 방법을 통해 추정된 값은 상당히 과소평가되며, 이를 대신해 지면 모델에 사용되는 E_{wc} 알고리즘을 이용하여 적절하게 결측을 메울 수 있음을 보였다. 해당 결측 메우기 방법은 ET에서 E_{wc} 를 배분할 수 있도록 수정되었으며 위의 결과들을 통합한 결과, GDK에서 관측된 ET(약 380 mm year^{-1})에 대한 T , E_s , E_{wc} 의 기여는 각각 69.9%, 15.6%, 14.5%이었다(Kang *et al.*, 2018a).

산림생태계와 대기 간의 CO_2 플럭스 및 ET를 정확히 관측하기 위해서는, 연직난류수송을 관측하는 EC 시스템뿐만 아니라 EC 시스템과 지면 사이의 대기에 저장되어 있는 CO_2 및 수증기의 변화량인 저류량을 측정하고 연직/수평이류량을 추정할 수 있는 프로파일 시스템이 요구된다. GDK에서는 2005년부터 현재까지 총 8 높이에서 CO_2 및 수증기의 농도 변화를 측정해오고 있다. Yoo *et al.*(2009)는 샘플링 시스템, 기체 분석기, 보정 및 기체유동 조절 시스템 등으로 구성된 프로파일 시스템의 원리에 대한 설명과 함께 저류/이

류량이 산림생태계의 NEE 및 ET 관측에 미치는 영향을 비롯한 프로파일 자료 활용의 예를 제시하였고, Lee *et al.*(2010)은 이러한 프로파일 시스템의 용도를 보다 확장하여 안정동위원소 분석을 위한 공기시료 채취에 활용하였다. Hong *et al.*(2008)은 두 높이에서 관측된 EC 플럭스 자료와 프로파일 자료를 활용하여 GDK의 연직 및 수평이류량을 추정, 이 둘이 서로 상쇄됨을 보였다. Kang *et al.*(2017)은 GDK와 GDK가 위치한 소유역에서 부는 산곡풍의 유선방향에 따라 위치한 광릉 침엽수림(Gwangneung coniferous forest, GCK) 관측지 두 곳에서 관측된 CO_2 농도의 연직 프로파일의 시계열 자료에 정보 이론을 적용한 과정망(Process network) 분석을 수행, 두 관측지 간의 정보의 흐름을 분석하여 언제 CO_2 의 이류가 발생하는지를 확인하였고, 이를 이용해 GDK에 특화된 야간 CO_2 플럭스 품질관리 필터를 개발하였다.

이렇게 장기간 관측되고 분석된 결과물들을 하나로 통합해 어떠한 지식을 이끌어내기 위한 필요조건은 과거에 관측된 자료와 현재에 관측된 자료가 비교 가능해야 한다는 점이다. 관측된 자료를 위성영상 및 생지화학/생태수문 모델링과 서로 다른 시공간 규모를 넘어 연계하여, 광릉 소유역의 물과 탄소순환을 밝히려는 시도들은 꾸준히 있어왔다(Hong *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2007). 관측된 자료들이 쌓이기 시작하면서 보다 긴 주기의 순환과정에 대한 이해가 가능해졌는데, 이를 위해서는 관측된 자료들의 비교가능성이 확보되어야 한다. Park *et al.*(2000)은 크립톤 습도계(Krypton hygrometer, Model KH20, Campbell Scientific, Inc., USA)의 경우 매 3개월마다 보정이 필요함을 보였고, Choi *et al.* (2002)은 개회로 적외선 FRGA (Model OP-2, Data Design Group, USA)의 경우 한 달 마다 보정해줄 것을 권하였다. Moon *et al.*(2003)은 두 종류의 순복사계(Model Q-7.1, Campbell Scientific, Inc., Model CNR1, Kipp & Zonen B.V., The Netherlands) 간의 상호비교를 통해, 비용적으로 훨씬 저렴한 Q-7.1이 4-6개월마다 보정할 경우 CNR1을 대체해 장기 관측에 사용될 수 있음을 보였다. 또한 장비 간의 호환성 외에도 자료처리 방법의 표준화를 통해 자료의 일관성과 연속성을 확보하고자 했다(e.g., Hong *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2018b).

2015년 7월 과거 십수년간 관측에 이용된 개회로 적외선 FRGA (Model LI-7500, LI-COR, Inc., USA)

가 봉폐회로(Enclosed-path) 적외선 FRGA (Model EC155, Campbell Scientific, Inc.)로 교체되었다. 기체농도를 분석하는 샘플링 셀(Sampling cell)이 외부에 노출되어 있는 개회로 시스템과 기체를 내부에 위치한 샘플링 셀까지 빨아들여 분석하는 (봉)폐회로 시스템은 관측 방식은 물론 이에 따른 자료 처리 방법에도 차이를 보인다. 본 논문에서는 FRGA가 완전히 교체되기 전 두 FRGA로 동시에 관측되었던 2015년 8월부터 12월까지 5개월의 기간 동안 모든 CO₂와 수증기(잠열) 플럭스를 서로 비교한 결과에 대한 보고와 함께, GDK에서 관측된 자료의 연속성 확보를 위한 해결 방안을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측지

광릉 활엽수림 플럭스 타워는 경기도 포천시 소흘읍 소재 국립수목원의 광릉 소유역에 위치한다(37°44'56"N, 127°08'57"E, 252 m a.s.l.). 복잡지형에 위치한 다양한 식생이 혼재 되어 있는 자연림으로 주 식생은 졸참나무(*Quercus serrata*)와 서어나무(*Carpinus laxiflora*)이고, 임령은 80-200년, 평균 수고는 약 20m, 최대 식생면적지수(Plant area index, PAI)는 여름에 약 6m² m² 이다. 연구지역의 임목 밀도는 1,473trees ha⁻¹, 기저면적은 28m² ha⁻¹ 이며(Lim *et al.*, 2003), 평년 기온은 10.1°C, 평년 강수량은 1,472mm 이다(Kang *et al.*, 2018a). GDK에 대한 보다 자세한 내용은 Lim *et al.*(2003) 과 Kim *et al.*(2006)에서 찾아볼 수 있다.

2.2. 플럭스 관측 및 자료처리

플럭스 타워의 지상 40m 높이에 위치한 EC 시스템은 하나의 SAT (Model CSAT3A, Campbell Scientific, Inc.)와 두 적외선 FRGA (Models LI-7500 and EC155)로 구성되었다(Fig. 1). 두 FRGA와 SAT 간의 거리는 거의 일치하도록 설치하였다(Table 1). 해당 시스템을 통해 두 종류(개회로 및 봉폐회로 시스템에서 관측된 값)의 CO₂ 및 수증기 플럭스를 2015년 8월부터 12월까지 5개월 동안 수집하였다. EC 시스템의 샘플링 속도는 10Hz, 플럭스 평균시간은 30분이며, 10Hz 관측 및 30분 평균 자료는 자료 집록기(Model CR3000, Campbell Scientific, Inc.)에 저장하였다. 저

장된 자료는 개선한 표준화된 KoFlux 자료처리 방법에 따라 에디 공분산 자료처리 응용 프로그램인 EddyPro[®] (LI-COR, Inc.)와 MATLAB[®] (The MathWorks, Inc., USA)으로 작성된 KoFlux 자료처리 프로그램으로 처리하였다(Kang *et al.*, 2018b). 개선한 표준화된 KoFlux 자료처리 방법은 추세 제거(30분 블록 평균), 시간 지연 보정(추정된 시간 지연 범위 내에서 공분산이 최대가 되는 시점 탐지), 좌표 변환(평면 맞추기 회전(Wilczak *et al.*, 2001; Yuan *et al.*, 2007), 풍향 별로 8개 평면의 경사를 한 달 간격으로 계산하여 적용), SAT 온도의 수증기 보정(Van Dijk *et al.*, 2004), 주파수 반응 보정(추세 제거 시 발생하는 고주파수 필터링 효과 보정(Moncrieff *et al.*, 2004), SAT와 FRGA 간 분리 효과 보정(Horst and Lenschow, 2009, 옆바람방향과 연직방향 기기분리만 고려), 기기 경로 길이, 튜브 감쇄 등의 이유로 발생한 저주파수 필터링 효과 보정(Fratini *et al.*, 2012)), 공기 밀도 보정(Webb *et al.*, 1980; (봉)폐회로 시스템에서 혼합비로 기체 농도 변동을 관측한 경우 적용하지 않음), 난류 스펙트럼과 품질 관리(정상 상태 (Steady state) 및 난류 발달 상태(Developed turbulent conditions) 점검(Mauder and Foken, 2006)), 프로파일 관측자료를 이용한 저류항 계산 및 튀는 자료 제거(Papale *et al.*, 2006), 결측 자료 메우기(주변 분포 표본 추출법)와 (야간) CO₂ 플럭스 자료 보정 및 배분(마찰

Table 1. Information about the sonic anemometer and gas analyzers

	GDK	
Sonic anemometer	CSAT3A	
Path length (cm)	11.6	
North off-set (°)	220.0	
Gas analyzers	EC155	LI-7500
Tube length (cm)	58.4	--
Tube inner diameter (mm)	2.7	--
Nominal tube flow rate (L min ⁻¹)	7.0	--
Northward separation (cm)	12.0	12.0
Eastward separation (cm)	10.0	10.0
Vertical separation (cm)	0.0	0.0
Path length (cm)	12.0	12.5

* The Reynold's number of EC155 is about 4000 at 10 °C and 1 atm.

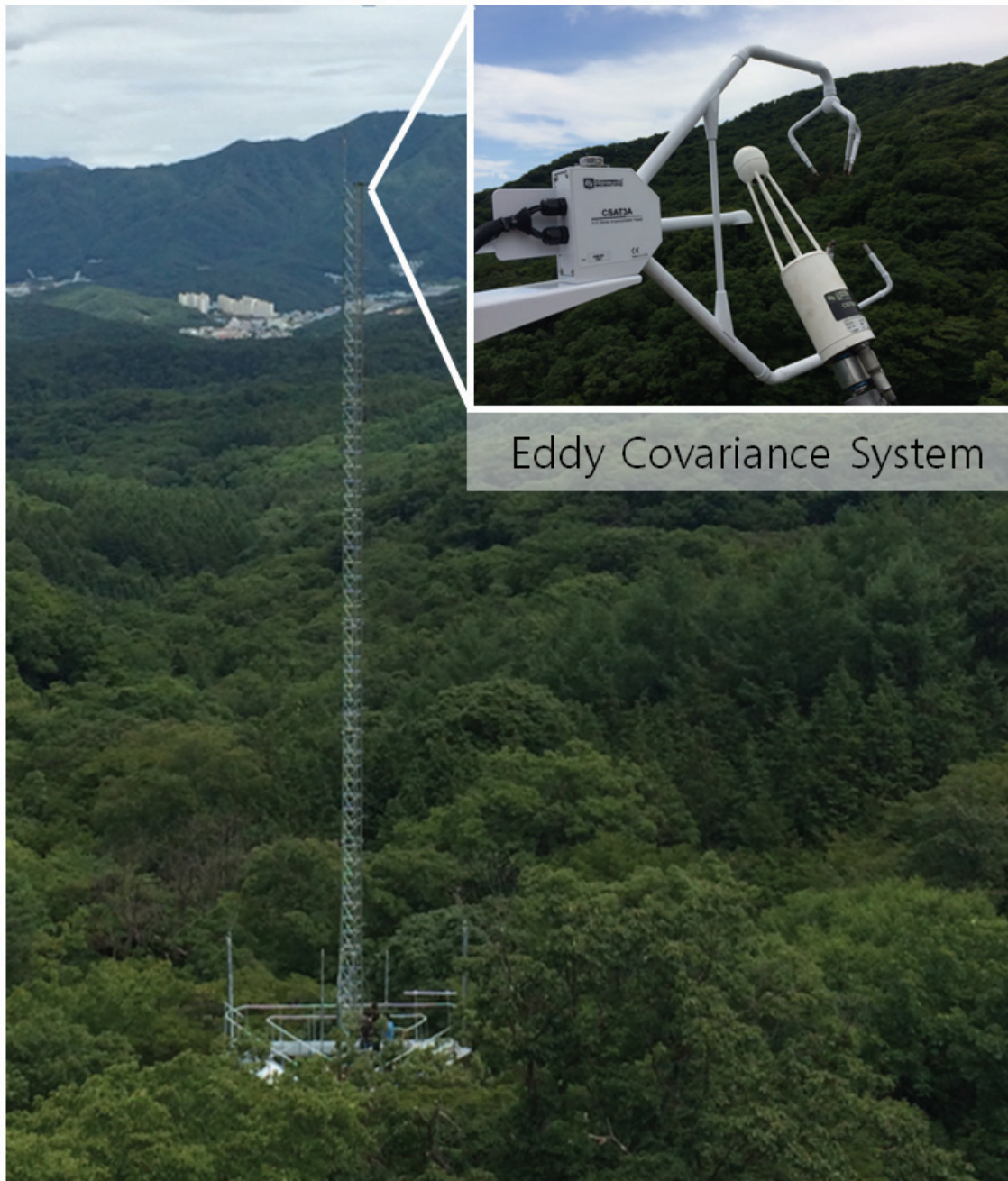


Fig. 1. Eddy covariance flux tower at the Gwangneung deciduous forest site.

속도 필터링 방법, Reichstein *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2019)을 포함한다. 공기 밀도 보정을 제외한 나머지 자료 처리 과정은 시스템에 관계없이 동일하게 적용된다.

III. 결과 및 토의

기체를 빨아들일 때 발생하는 튜브 감쇄(Tube attenuation) 효과는 개회로 시스템과 (봉)폐회로 시스템에서 관측된 플럭스 자료 간에 차이를 발생시킬 수

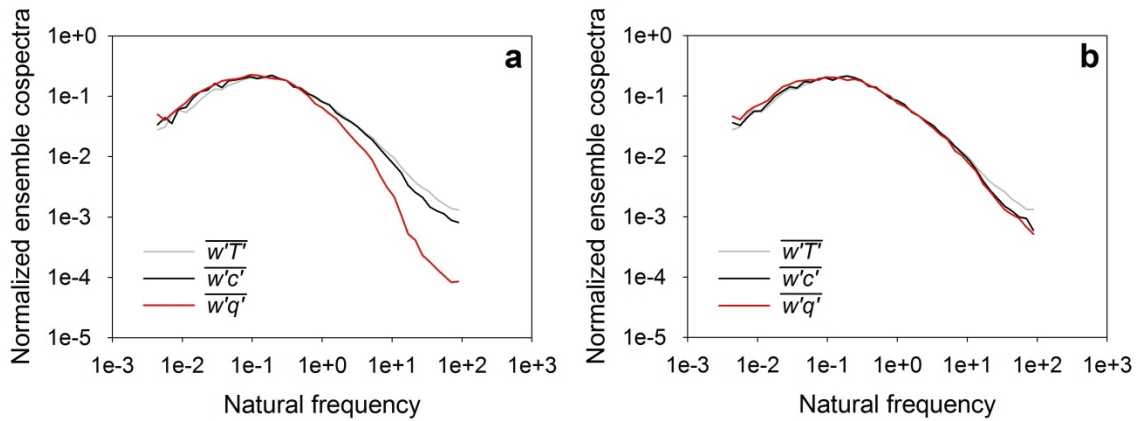


Fig. 2. Normalized ensemble cospectra of the sensible heat ($\overline{w'T'}$), CO₂ ($\overline{w'c'}$), and latent heat ($\overline{w'q'}$) fluxes measured by the enclosed-path eddy covariance (EC) system (a) and the open-path EC system (b) in September under the unstable condition ($-650 < \text{Obukhov length} < 0$). Natural frequency is a frequency normalized by the observation height and the average longitudinal wind speed.

있는 주요 원인들 중에 하나이다(Fratini *et al.*, 2012). Fig. 2는 9월 한 달간 두 시스템에서 관측된 현열 (Sensible heat flux, H), 잠열(Latent heat flux, LE), CO₂ 플럭스(F_{CO_2})의 정규화된 양상불 코스펙트럼을 보여준다. 먼저 봉폐회로 시스템의 경우, SAT와 FRGA 간 분리 효과 및 튜브 감쇄 효과로 인해 F_{CO_2} 의 코스펙트럼은 고유주파수 10 근처부터, LE 의 코스펙트럼은 고유주파수 1 근처부터 H 의 코스펙트럼에 비해 두드러지게 작아지는 것을 확인할 수 있다. 개회로 시스템의 경우 역시, 기기 분리 효과로 인한 고유주파수 영역의 코스펙트럼 감소를 확인할 수 있다. 여기서 주목해야 할 부분은 수증기가 CO₂ 보다 훨씬 끈적이기

때문에 튜브 감쇄 효과가 훨씬 더 크게 나타난다는 점이며, 이는 봉폐회로 시스템을 이용해 과소평가 없이 LE 를 관측하려면 적절한 저주파수 통과 필터링 효과 보정이 요구됨을 보여준다. 이러한 수증기의 상당한 튜브 감쇄 효과는 계절과 대기안정도에 관계없이 확인할 수 있었다.

Fig. 3는 두 시스템에서 연구기간 동안 관측된 F_{CO_2} 와 LE 를 품질관리 후 서로 비교한 결과이다. 하나의 SAT를 공유하고 두 FRGA를 거의 동일한 곳에 위치시켰기에, 두 시스템에서 나온 F_{CO_2} 와 LE 는 높은 선형성을 보였다(선형회귀분석 시 F_{CO_2} 는 r^2 가 0.97, LE 는 0.98). 플럭스의 크기를 보면 F_{CO_2} 의 경우 개회로 시스

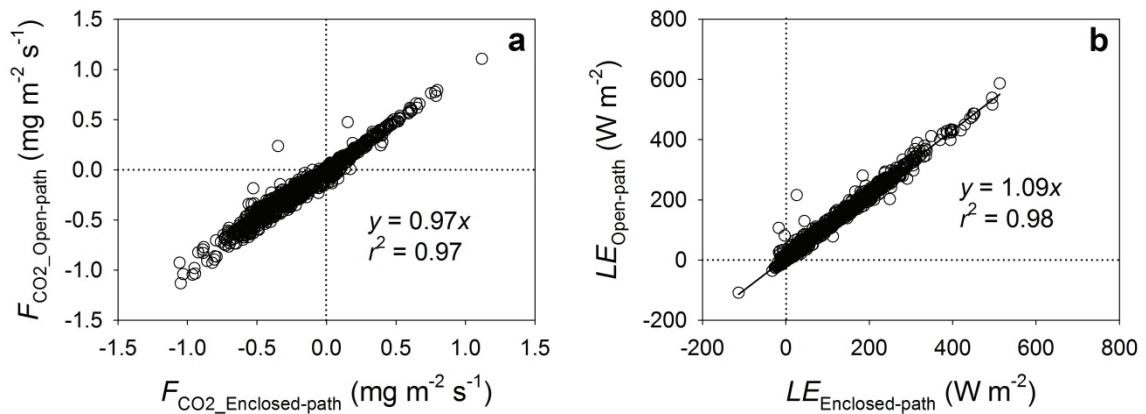


Fig. 3. Comparison of CO₂ flux (F_{CO_2} , a) and latent heat flux (LE , b) between the enclosed-path and the open-path EC systems.

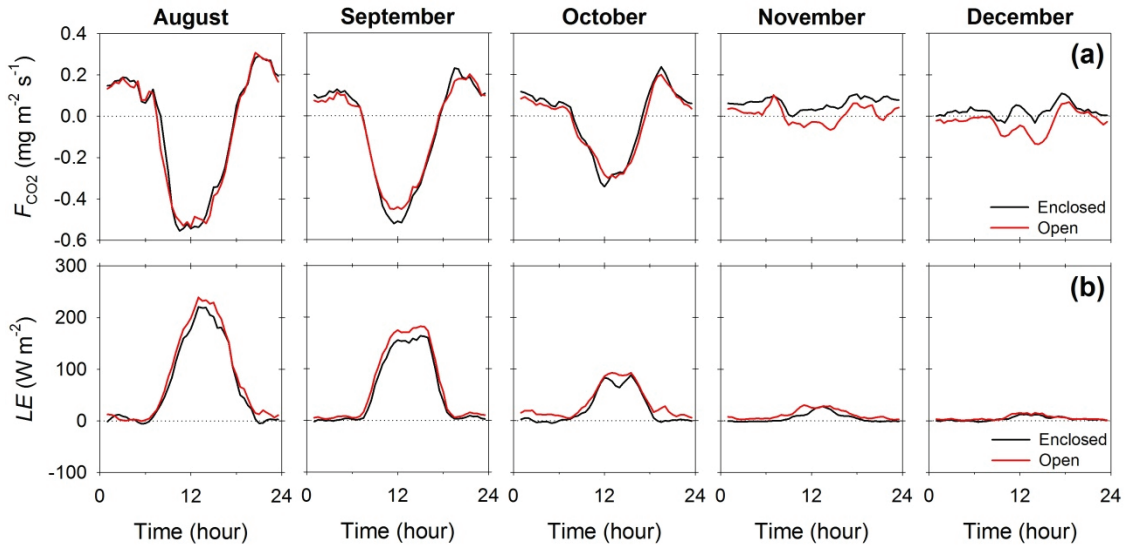


Fig. 4. Median diurnal variations of CO₂ flux (F_{CO_2} , a) and latent heat flux (LE , b) measured by the enclosed-path and the open-path EC systems.

탐이 연구기간 동안 평균적으로 3%정도 과소평가하고, LE 의 경우 봉폐회로 시스템이 9%정도 과소평가하는 것으로 보였다. LE 의 경우 저주파수 필터링 효과 보정을 수행했음에도 불구하고 9% 정도 과소평가된 것이 확인되었는데, 이러한 차이는 선행연구결과에서 보고된 차이와 유사하다(Fratini et al., 2012). 두 시스템 간의 차이는 선행연구에서 보고된 GDK에서 EC 관측의 정확도 불확도(F_{CO_2} 는 17-18%, LE 는 17-22%)보다는 훨씬 작은 값이다. 다만 두 시스템 간의 차이 (F_{CO_2} : ~3%, LE : ~9%)가 평균적인 차이인 만큼 적산 시 서로 상쇄되는 정확도 오차 라기보다는 누적되는 계통 오차로 보는 편이 타당하며, 이는 플럭스 관측 자료의 연속성에 영향을 줄 수 있다.

실제로 이러한 차이가 언제 얼마만큼 발생하는지 확인하기 위해, 월별로 각 시간대에 관측된 품질관리 후 모든 값들의 중위값(Median)을 사용해 평균적인 일변동을 계산하였다(Fig. 4). 먼저 F_{CO_2} 의 경우, 두 시스템 간의 차이가 8, 9, 10월에 크지 않은 반면에 11월과 12월에는 개회로 시스템에서 관측된 값이 음의 방향(CO_2 흡원 쪽)으로 편향되어 있음을 확인하였다. 8월부터 10월 사이에 나타나는 작은 차이는 품질관리 후 자료들의 분포가 강우 시 개회로 시스템 오작동, 정상성 점검 결과의 차이 등에 따라 발생하는 불일치함에 대부분 기인한 것으로 생각될 수 있으나, 11월과 12월의 나타나는 차이는 이러한 이유보다는 다른 이유에

있다. 개회로 FRGA가 일사에 의해서 가열되거나 기기 내부의 광선 단속 장치 모터에 의해 가열될 경우, 기기 주변의 공기가 데워져 팽창하고 이로 인해 개회로 FRGA에서 측정되는 CO_2 및 수증기 밀도에 영향을 줄 수 있다(e.g., Kwon et al., 2007). 기체분석기 가열에 따른 오차는 겨울철에 뚜렷이 나타난다고 알려져 있다(e.g., Burba et al., 2008). 실제로 GDK에서도 이러한 차이는 일평균기온이 영하로 떨어지기 시작하면서 눈에 띄게 나타났다. 일평균기온이 영하로 떨어지는 11월 26일부터 12월 31일까지 두 시스템에서 관측된 F_{CO_2} 를 선형회귀 분석해보면, $-0.05 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 음의 절편과 함께 기울기도 0.89로 개회로 시스템의 음의 편향이 명확히 드러났다(r^2 도 0.66으로 떨어짐). 이러한 차이는 월적산 값의 차이로 이어지는데, 특히 12월의 월적산 NEE는 봉폐회로 시스템에서 관측된 값이 43 g C m^{-2} 개회로 시스템에서 관측된 값이 -1 g C m^{-2} 로 큰 차이를 보였다(Table 2). 반면에 LE 의 경우, 두 시스템 간의 차이가 계절에 관계없이 나타났다. 5개월 간 적산 시 봉폐회로 시스템에서 관측된 ET는 166mm, 개회로 시스템에서 관측된 ET는 211mm로 20% 이상 차이 났다. 그 외 주목할만한 점으로는, 샘플링 셀이 내부에 위치한 봉폐회로 시스템이 오염(예, 강우)에 강해 더 좋은 자료수득률을 보여줄 것으로 기대했으나 개회로와 봉폐회로 시스템의 연구기간동안 자료수득률이 45% 내외로 그 차이가 크지 않았다는

Table 2. The monthly sums of net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (RE), gross primary production (GPP), and evapotranspiration (ET) and the retrieval rate after quality control of CO₂ flux (F_{CO_2}) and latent heat flux (LE) measured by the enclosed-path eddy covariance (EC) system and the open-path EC system

	Enclosed-path system						Open-path system					
	Monthly sum			Retrieval rate			Monthly sum			Retrieval rate		
	NEE	RE	GPP	ET	F_{CO_2}	LE	NEE	RE	GPP	ET	F_{CO_2}	LE
	g C m ⁻²	g C m ⁻²	g C m ⁻²	mm	%	%	g C m ⁻²	g C m ⁻²	g C m ⁻²	mm	%	%
Aug.	9	220	211	75	50	48	7	222	215	89	46	50
Sep.	-12	166	179	56	56	50	-11	170	182	66	56	52
Oct.	16	113	97	25	47	44	3	108	104	36	49	44
Nov.	51	76	25	6	43	38	31	65	34	13	35	34
Dec.	43	67	24	4	33	29	-1	22	22	6	39	35
Aug. to Dec.	108	642	535	166	46	42	29	586	558	211	45	43

점이다. 이러한 원인으로는 강우 시 SAT의 오동작, 정상 상태 및 난류 발달 상태 불만족 등이 두 관측에서 동시에 일어나기 때문인 것으로 예상된다.

구에서 밝혀진 두 장비 간의 차이를 최소화 시킴과 동시에 생략된 자료처리 절차를 보완함으로써 GDK 장기 플럭스 자료의 연속성을 확보할 수 있을 것이다.

IV. 결론 및 제언

지금까지 비교 실험 결과를 통해, 기기에서 발생하는 열 때문에 개회로 기체분석기에서 관측된 F_{CO_2} 가 특히 기온이 낮을 때(일평균기온이 0°C 이하) 양의 값(이산화탄소 발원)에서 0 또는 음의 값(이산화탄소 증립 또는 흡원)으로 편향되고, 봉폐회로 기체분석기에서 관측된 LE 는 주파수 반응 보정을 통해 수증기의 튜브 감쇄 효과를 보정하였음에도 불구하고 개회로 기체분석기에서 관측된 값보다 평균적으로 9% 정도 작음을 확인하였다. 이러한 차이는 적산 시 더 명확하게 나타났다. 본 연구결과는 광릉 활엽수림에서 관측된 장기 플럭스 자료 분석 시, 개회로 기체분석기의 겨울철 가열 효과에 대한 추가적인 공기 밀도 보정(Burba *et al.*, 2008)의 필요성과 함께 봉폐회로 기체분석기에서 나타나는 잠열 플럭스의 과소평가에 대한 이해가 수반되어야 함을 시사한다.

관측된 자료들의 비교가능성을 확보하기 위해서는 장비뿐만 아니라 자료처리 방법에 대한 호환성도 보장되어야 한다. Kang *et al.*(2018b)은 에디 공분산 플럭스 관측 자료 품질에 주파수 반응 보정과 정상성 점검이 큰 영향을 끼침을 보고하였다. 과거에 GDK에서 관측된 자료들을 처리할 때 위의 두 자료처리 절차가 생략되거나 부분적으로 고려되었음을 생각하면, 본 연

적 요

장기간 관측된 자료를 기반으로 그 시계열의 장주기나 경향을 분석할 때 선행되어야 할 조건은 과거에 관측된 자료와 현재에 관측된 자료가 비교 가능해야 한다는 점이다. 이러한 자료의 연속성을 확보하기 위해서는 장기 관측에 사용된 기기들 간에 호환성이 보장되어야 한다. 우리나라에서 가장 긴 에디 공분산 플럭스 관측 역사를 가지고 있는 광릉 활엽수림에서 다양한 기체분석기가 플럭스 관측에 사용된 가운데, 2015년 7월 과거 10년 이상 사용되었던 개회로 기체분석기(Model LI-7500, LI-COR, Inc.)에서 봉폐회로 기체분석기(Model EC155, Campbell Scientific, Inc.)로 교체되었다. 기체분석기가 완전히 교체되기 전 두 기체분석기로 동시에 관측되었던 2015년 8월부터 12월까지 5개월의 기간 동안 모은 이산화탄소와 수증기(잠열) 플럭스를 서로 비교해보았다. 이산화탄소 플럭스는 일평균기온이 영상이었던 시기에 기체분석기 간의 큰 차이는 없었으나, 영하로 떨어지면서 개회로 기체분석기의 경우 기기에서 발생하는 열 때문에 이산화탄소 플럭스가 양의 값(이산화탄소 발원)에서 0 또는 음의 값(이산화탄소 증립 또는 흡원)으로 편향됨이 확인되었다. 잠열 플럭스는 봉폐회로 기체분석기에서 관측된 값이 주파수 반응 보정을 통해 수증기의 튜브

감쇄 효과를 보정하였음에도 불구하고, 개회로 기체분석기에서 관측된 값보다 평균적으로 9% 정도 작았으며, 5개월 동안 적산 시 20% 이상 차이(봉폐회로: 166 mm, 개회로 211 mm)났다. 본 연구결과는 광릉 활엽수림에서 관측된 장기 플럭스 자료 분석 시, 개회로 기체분석기의 겨울철 가열 효과에 대한 추가적인 공기 밀도 보정의 필요성과 함께 봉폐회로 기체분석기에서 나타나는 잠열 플럭스의 과소평가 경향에 대한 이해가 수반되어야 함을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술연구개발사업(2017099A00-1719-BB01)의 지원으로 수행되었습니다. GDK 관측지 관리 및 지속적인 데이터 수집을 위해 헌신하고 아낌없이 지원해주신 모든 분들께 감사드립니다. 논문의 품위를 높여 주신 두 분의 심사위원분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Burba, G. G., D. K. McDermitt, A. Grelle, D. J. Anderson, and L. Xu, 2008: Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers. *Global Change Biology* **14**, 1854-1876.
- Choi, T., J. Kim, and J. Lim, 2003: CO₂ Exchange in Kwangneung broadleaf deciduous forest in a hilly terrain in the summer of 2002. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 70-80.
- Choi, T., J. I. Yun, J.-H. Lim, E.-W. Park, and J. Kim, 2002: Variability of calibration factors for open-path CO₂/H₂O infrared gas analyzer and its effect on long-term flux measurement. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 103-113.
- Frattini, 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.
- Hong, J., and J. Kim, 2011: Impact of the Asian monsoon climate on ecosystem carbon and water exchanges: a wavelet analysis and its ecosystem modeling implications. *Global change biology* **17**, 1900-1916.
- Hong, J., D. Lee, and J. Kim, 2005: Lessons from FIFE on scaling of surface fluxes at Gwangneung forest site. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**, 4-14.
- Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J. H. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H₂O and CO₂ exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research* **44**, W01426.
- Horst, T., and D. Lenschow, 2009: Attenuation of scalar fluxes measured with spatially-displaced sensors. *Boundary-Layer Meteorology* **130**, 275-300.
- Kang, M., H. Kwon, J.-H. Lim, and J. Kim, 2009a: Understory evapotranspiration measured by eddy-covariance in Gwangneung deciduous and coniferous forests. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 233-246.
- Kang, M., H. Kwon, J. H. Cheon, and J. Kim, 2012: On estimating wet canopy evaporation from deciduous and coniferous forests in the Asian monsoon climate. *Journal of Hydrometeorology* **13**, 950-965.
- 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., J. Kim, B. Malla Thakuri, J. Chun, and C. Cho, 2018a: New gap-filling and partitioning technique for H₂O eddy fluxes measured over forests. *Biogeosciences* **15**, 631-647.
- Kang, M., J. Kim, S.-H. Lee, J. Kim, J.-H. Chun, and S. Cho, 2018b: Changes and improvements of the standardized eddy covariance data processing in KoFlux. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**, 5-17.
- Kang, M., J. Kim, B. M. Thakuri, J. Chun, and C. Cho, 2019: Modification of the moving point test method for nighttime eddy CO₂ flux filtering on hilly and complex terrains. *MethodsX* **6**, 1207-1217.
- Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. T. Choi, Y.-J. Choi, and J. Kim, 2009b: 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, M., H. Kwon, J. Kim, H. S. Kim, Y. Ryu, S.-J. Lee, and T. Choi 2018c: Korean flux monitoring network's past, present, and future. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**, 1-4.

- Kim, J., 2005: KoFlux 2004 synthesis: Coping with climate change protocols by understanding carbon and water cycles in Korean ecosystems - Foreword. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**, 1-3.
- Kim, J., 2007: KoFlux 2006 synthesis: HydroKorea and CarboKorea - Foreword. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**, 71-74.
- Kim, J., F. Chen, and S. Kim, 2009: Foreword. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**, 109-111.
- Kim, J., and C.-S. Rho, 2003: Foreword. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 49-50.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S. J. Kim, S. K. Moon, J. H. Lim, Y. Son, J. Lee, and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research* **21**, 881-889.
- Kwon, H., and B.-L. Lee, 2010: KoFlux 2010: Domestic surface flux measurement-model fusion. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 238-240.
- Kwon, H., J. Kim, J. Hong, and J.-H. Lim, 2010: Influence of the Asian monsoon on net ecosystem carbon exchange in two major ecosystems in Korea. *Biogeosciences* **7**, 1493-1504.
- Kwon, H., T. Y. Park, J. Hong, J. H. Lim, and J. Kim, 2009: Seasonality of net ecosystem carbon exchange in two major plant functional types in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**, 149-163.
- 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.
- Lee, D., S.-J. Kim, J.-H. Cheon, and J. Kim, 2010: Air sampling and isotope analyses of water vapor and CO₂ using multi-level profile system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 277-288.
- Lee, D., J. Kim, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J.-S. Lee, J. Lim, Y. Son, S. Kang, S. H. Kim, K. Kim, N. C. Woo, B.-Y. Lee, and S. Kim, 2007: Lessons from cross-scale studies of water and carbon cycles in the Gwangneung forest catchment in a complex landscape of monsoon Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**, 149-160.
- Lim, J. H., J. H. Shin, G. T. Kim, J. H. Chun, and J. S. Oh, 2003: Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 101-109.
- 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.
- 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.
- Moon, B.-K., S.-B. Ryoo, Y.-H. Youn, J. Lim, and J. Kim, 2003: Field intercomparison and calibration of net radiometers. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 128-137.
- 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**, 571-583.
- Park, Y., 2001: Evapotranspiration and its controlling factors in the two adjacent forests in Kwangneung Arboretum. Master Thesis, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, South Korea.
- Park, Y., J. Kim, H. Lee, J. Lim, and W. Kwon, 2000: Changes in absorption coefficient of krypton hygrometer in long-term monitoring of evapotranspiration and its calibration using a dew point generator. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**, 75-79.
- 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 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, 99pp.
- 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.
- Wilczak, J., S. Oncley, and S. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**, 127-150.
- Yoo, J.-I., D.-H. Lee, J.-K. Hong, and J. Kim, 2009: Principles and applications of multi-level H₂O/CO₂ profile measurement system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 27-38.
- 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.