

개회로 파장 변조 분광법과 에디 공분산 방법으로 논에서 관측된 CH₄ 플럭스 자료의 보정

강남구¹ · 윤주열² · 아산 탈루더³ · 문민규⁴ · 강민석⁴ · 심교문⁵ · 김 준^{2,3,4*}

¹한국표준과학연구원, ²서울대학교 생태조경지역시스템공학부,
³서울대학교 협동과정 농림기상학전공, ⁴국가농림기상센터, ⁵국립농업과학원
(2014년 10월 28일 접수; 2014년 11월 24일 수정; 2014년 12월 1일 수락)

Corrections on CH₄ Fluxes Measured in a Rice Paddy by Eddy Covariance Method with an Open-path Wavelength Modulation Spectroscopy

Namgoo Kang¹, Juyeol Yun², M. S. A. Talucder³, Minkyu Moon⁴,
Minseok Kang⁴, Kyo-Moon Shim⁵ and Joon Kim^{2,3,4*}

¹Korea research Institute of Standards and Science, Korea

²Complex Systems Science Lab., Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering,
Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea

³Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University, 1, Gwanak-ro,
Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea

⁴National Center for AgroMeteorology, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

⁵National Academy of Agricultural Science, 166, Nongsaeangmyeong-ro, Wanju 565-851, Korea

(Received October 28, 2014; Revised November 24, 2014; Accepted December 1, 2014)

ABSTRACT

CH₄ is a trace gas and one of the key greenhouse gases, which requires continuous and systematic monitoring. The application of eddy covariance technique for CH₄ flux measurement requires a fast-response, laser-based spectroscopy. The eddy covariance measurements have been used to monitor CO₂ fluxes and their data processing procedures have been standardized and well documented. However, such processes for CH₄ fluxes are still lacking. In this note, we report the first measurement of CH₄ flux in a rice paddy by employing the eddy covariance technique with a recently commercialized wavelength modulation spectroscopy. CH₄ fluxes were measured for five consecutive days before and after the rice transplanting at the Gimje flux monitoring site in 2012. The commercially available EddyProTM program was used to process these data, following the KoFlux protocol for data-processing. In this process, we quantified and documented the effects of three key corrections: (1) frequency response correction, (2) air density correction, and (3) spectroscopic correction. The effects of these corrections were different between daytime and nighttime, and their magnitudes were greater with larger CH₄ fluxes. Overall, the magnitude of CH₄ flux increased on average by 20-25% after the corrections. The National Center for AgroMeteorology (www.ncam.kr) will soon release an updated KoFlux program to public users, which includes the spectroscopic correction and the gap-filling of CH₄ flux.

Key words: Methane, Eddy Covariance, Flux correction, Laser spectroscopy, Rice paddy



* Corresponding Author : Joon Kim
(joon@snu.ac.kr)

I. 서 론

메탄(CH₄)은 이산화탄소(CO₂)와 함께 대표적인 온실 가스로서 그 영향력은 이산화탄소의 25배 이상이다(Forster *et al.*, 2007). 대기 중 CH₄ 농도는 산업화 이전과 비교하여 두 배 이상 증가하였고, 한동안 그 증가 추세가 멈추었다가 최근 들어서 다시 증가하고 있으나, 그 흡원(sink), 발원(source) 및 시간에 따른 가변성의 원인이 불분명하다(Bousquet *et al.*, 2006). 따라서 CH₄ 농도 및 플럭스의 지속적이고도 체계적인 감시 관측이 요구된다(Baldocchi *et al.*, 2012). 관측된 논문은 습지 및 축사와 함께 주요한 CH₄의 발원으로서(Wassmann *et al.*, 2000; IPCC, 2013), 국내 메탄 가스 배출량의 약 23%가 벼 재배에 의한 것으로 보고되어 있다(GIR, 2013).

에디 공분산(eddy covariance) 방법은 식생을 포함한 지표-대기간에 교환되는 물리량의 연직 플럭스를 정량화하고 그 교환 과정에 중요한 역할을 담당하는 난류의 구조를 이해하는데 사용된다(Baldocchi *et al.*, 2001). 이러한 에디 공분산 방법은 비교적 넓은 면적(10¹~10⁵m²)을 대변할 뿐 아니라 관측 대상에 피해를 주지 않으면서도 지속적인 연속 관측을 가능하게 한다(Baldocchi *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2006). 국내에서도 파장가변 다이오드를 활용한 레이저 기반의 고속반응 폐회로(closed-path) 분광기를 활용하여 CH₄ 농도의 프로파일을 관측하거나, 이를 에디 공분산 방법과 접목하여 논, 축사, 또는 매립지에서 CH₄ 플럭스를 관측한 연구들이 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2000). 본 연구에서는 실온에서 사용 가능한 개회로(open-path) 파장 변조(wavelength modulation) 분광계와 에디 공분산 방법을 함께 사용하여 관측된 논에서 방출되는 CH₄ 플럭스 관측을 수행하였다. 개회로 기체분석기를 사용하여 에디 플럭스를 관측할 경우, 자료의 후 처리 과정에서 현열 및 잠열 플럭스의 동시 관측과 더불어 사용 기기의 특성에 따른 보정 과정이 수반된다. 국내에서 플럭스 자료의 후 처리에 사용되고 있는 KoFlux 표준화 프로토콜(Hong *et al.*, 2009)은 현열, 잠열 및 CO₂ 플럭스 자료만을 다루고 있으며, CH₄ 플럭스는 현재 포함되어 있지 않다.

본 논문에서는 개회로 CH₄ 분석기를 이용한 메탄 플럭스 관측을 소개하고, 관측된 자료의 후 처리 과정을 단계별로 요약하여 제시함으로써 CH₄ 플럭스 자료

처리의 표준화에 기여하고자 하였다. 이를 위해서 전라남도 김제의 논에 위치한 국립농업과학원에서 운영하고 있는 에디 공분산 타워에 고속반응 개회로 CH₄ 분석기를 설치하여 관측이 이루어진 모내기 전과 직후에 관측된 CH₄ 플럭스 자료를 사용하였다.

II. 방법 및 재료

2.1. 에디 공분산 관측

논에서 방출되는 CH₄ 플럭스를 측정하기 위해 3차원 초음파 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 파장 변조 분광법을 이용한 고속반응 개회로 CH₄ 분석기(LI-7700, LI-COR Inc., USA)를 지면으로부터 5.2m 높이에 설치하였다. CSAT3에서 관측되는 현열 플럭스와 더불어 메탄 플럭스 보정을 위해 필요한 잠열 플럭스를 관측하기 위해 고속반응 개회로 H₂O/CO₂ 분석기(LI-7500, LI-COR Inc., USA)를 같은 높이에 설치하였다. CSAT3의 관측 경로 길이(path length)는 0.116m이며, 설치 방향은 주풍향인 서쪽(정북을 기준으로 시계방향 285°)을 향하도록 하였다. 개회로 메탄 분석기인 LI-7700의 물리적인 경로 길이는 0.5m이나, 그 광학 경로 길이는 30m이다. CSAT3과 LI-7700의 수직적인 분리를 최소화하기 위해 각 관측 경로의 중심이 같은 높이에 위치하도록 설치하였다. 두 기기간의 수평적인 분리 거리는 주파수 보정과 공기 흐름의 일그러짐이 모두 최소화될 수 있도록 관측 높이의 약 1/10인 0.52m로 설정하였다. 개회로 H₂O/CO₂ 분석기는 경로 길이가 0.125m로서, CSAT3과의 분리 거리는 0.43m 이었다. 모든 난류 자료의 샘플링 속도는 10 Hz로 관측되었고, 원시자료(raw data)와 30분 평균 자료를 함께 자료집록기(CR3000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다.

미기상 자료의 수집을 위해 순복사계(CNR1, Kipp & Zonen B.V., Netherlands)와 우량계(52203 Tipping Bucket Rain Gauge, R. M. Young Company, USA)를 각각 지면에서 2.7m와 1m 높이에 설치하였다. 또한 토양 온도 센서(TCAV, Campbell Scientific Inc., USA)를 지표에서 0.05m 깊이에 설치하였다. 저속반응 미기상 관측자료들은 5초 간격으로 측정하였고, 30분 평균된 자료를 자료집록기(CR5000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다.

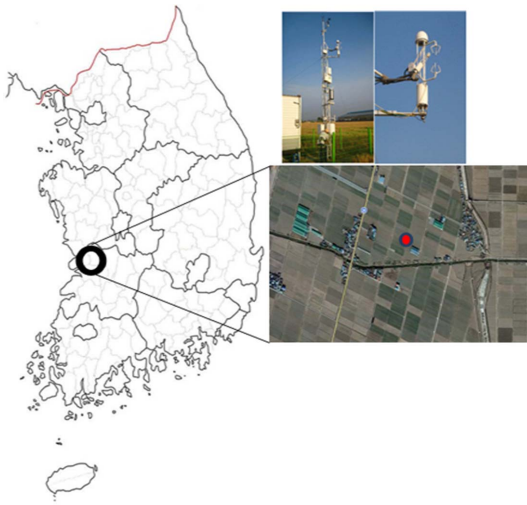


Fig. 1. The rice paddy site with the eddy covariance system in Gimje, Korea.

2.2. 실험 장소

CH₄ 플럭스 관측을 수행한 실험 장소(35°44'42"N, 126°51'8.8"E, 해발고도 4.1m)는 전라북도 김제시 부량면 신용리에 위치한 논으로서 벼와 보리의 이모작이 이루어지는 곳이다(Fig. 1). 관측지 주변은 대부분 논으로 이루어져 있어서 균질하며 평탄한 지형이다. AsiaFlux 플럭스 관측망(www.asiaflux.net)에 'GRK' 사이트로 등재되어 있는 플럭스 타워는 논 사이에 구축되어 있다. 플럭스 관측에 영향을 미치는 풍상측 취주거리는 풍향에 따라 다소 차이를 보이나 최소 10m에서 최대 300m정도이다. 관측 타워로부터 남서쪽 방향으로 400m 떨어진 곳에 소규모 농촌 마을과 지방도로가 위치해 있고 북동쪽으로 300m 떨어진 곳에 소형 축사가 위치해 있다. 토양층은 물이 잘 빠지는 미사질양토의 전북통이다(Min *et al.*, 2013).

벼 이앙을 위해 2012년 6월 9일에 논에 물대기를 실시하였으며, 이어서 6월 10일에는 논갈이를 실시하였다(Fig. 2). 6월 16일경 맞춤 16호(남해화학)를 헥타르당 500kg(질소기준 110kg ha⁻¹)을 시비하였다. 어린 모는 6월 21일에 기계이앙방식으로 이앙하였다. 영농활동에 대한 보다 자세한 정보는 Min *et al.* (2013)에서 찾을 수 있다.

2.3. 자료 분석

2.3.1. 자료 처리 과정

에디 공분산 방법으로 관측된 플럭스 자료는 관측지



(a)



(b)

Fig. 2. The surface conditions of the rice paddy site: (a) before transplanting (13 June 2012) and (2) after transplanting (28 June 2012).

의 특성, 기상 조건, 그리고 관측 기기의 설치 구조(관측 높이, 기기간의 분리 거리, 설치 방향 등)에 따라 이상적인 관측 조건에서 벗어날 수 있다. 따라서 이러한 부분들에 대해 여러 단계의 보정을 필요로 한다. 본 연구에서는 KoFlux 표준화 프로토콜(Hong *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2014)에 제시된 순서대로 관측된 자료를 후처리(post-processing)하였고, 계산 프로그램은 에디 프로(EddyPro™ 5.0, LI-COR Inc., USA)를 사용하였다. 10 Hz 자료로부터 30분 평균된 공분산 자료를 계산하기 전에, 먼저 모든 풍속 자료에 대해 평균 연직 이류(\bar{v})와 평균 연직 풍속(\bar{w})을 0으로 만들어 주기 위해 좌표 회전(coordinate rotation)을 실시하였다. 좌표 회전 방법은 이중 회전(double rotation)을 사용하였다. 이어서 CSAT3에서 관측된 음속 온도에 대해서 수증기 보정을 적용한 후에 10Hz 자료에서 30분 평균된 공분산 자료를 계산하였다. 이렇게 계산된 30분 평균 공분산 자료에 대해서 '주파수 반응 보정'과 '공기 밀도 보정'을 차례대로 적용하

였다. 마지막으로 파장 변조 분광기인 LI-7700을 사용함에 따라 요구되는 '분광 보정'을 적용하였다(Burba, 2013). KoFlux 표준화 과정에 대해 보다 자세한 설명은 Hong *et al.*(2002)와 Kang *et al.*(2014)에 문서화되어 있기 때문에, 여기서는 주파수 반응 보정, 공기 밀도 보정, 그리고 분광 보정에 대해서만 간략하게 요약하였다.

2.3.2. 주파수 반응 보정

고속반응 기기를 이용한 난류 플럭스의 집록과 분석은 (1) 기기 자체의 경로 길이와 (2) 초음파 풍향 풍속계와 스칼라 관측기기간의 물리적인 분리 거리로 인해서 충분한 영역의 주파수 반응(Frequency response)을 반영하지 못하게 되어 특정 주파수 영역에서 플럭스의 손실이 생길 수 있다(Choi *et al.*, 1999). 이러한 기기 고유의 특성과 관측 장비의 설치 구조에 따른 불충분한 주파수 반응으로 인해 과소평가되는 플럭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Moncrieff *et al.*, 1997)

$$\frac{\Delta F_m}{F_m} = 1 = \frac{\int_0^\infty CO_{F_m}(n) \cdot T_{all}(n) dn}{\int_0^\infty CO_{F_m}(n) dn} \quad (1)$$

여기서 ΔF_m 는 H_4 플럭스 F_m 의 손실량, $CO_{F_m}(n)$ 은 CH_4 플럭스의 각 자연 주파수($n:s^{-1}$)에 해당되는 코스펙트럼, $T_{all}(n)$ 은 코스펙트럼의 전달 함수이다. $T_{all}(n)$ 은 주파수 손실의 원인에 따라 달라지게 되는데 주요 원인으로서는 반응 시간, 스칼라 경로 평균, 기기 분리, 저주파 통과 필터링(low pass filtering)과 고주파 통과 필터링(high pass filtering)이 있다. 이러한 원인들을 고려한 $T_{all}(n)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Burba, 2013)

$$T_{all}(n) = T_{tm}(n) \cdot T_{tw}(n) \cdot T_s(n) \cdot [T_{hi}(n) \cdot T_{lo}(n)]^2 \cdot \sqrt{T_{sp}(n)} \quad (2)$$

여기서 T_{tm} 와 T_{tw} 는 각각 두 신호(즉 메탄 농도와 연직 풍속)의 반응 시간에 대한 전달함수, T_s 는 기기 분리에 따른 전달함수, T_{hi} 와 T_{lo} 는 각각 저주파 및 고주파 통과 필터링에 대한 전달함수이며, T_{sp} 는 스칼라 경로에 대한 전달함수이다. 각 전달함수의 구체적인 관계식은 Burba(2013)에서 찾아 볼 수 있다. 이 중에서 특별히 관측 기기를 설치할 때에 유의해야 하는 기기간 분리에 대한 전달함수, T_s 를 살펴보면,

$$T_s(n) = e^{-9.9(n \cdot p_{xy} \bar{u})^{1.5}} \quad (3)$$

여기서 p_{xy} 는 기기간 분리 거리(m)이며, \bar{u} 는 평균 수평 풍속(ms^{-1})이다. 식 (3)에 의하면 같은 조건에서 주파수 영역이 낮아질수록, 기기간 분리 거리가 커질수록, 그리고 풍속이 낮아질수록 주파수 반응 손실이 증가함을 알 수 있다. 예를 들어, 1Hz의 주파수 영역에서 풍속이 $2m s^{-1}$ 일때, 기기간 분리 거리가 0.1m에서 0.5m로 늘어나게 되면 전달 함수는 0.591에서 0.003으로 빠르게 지수적으로 감소하여 식 (1)과 (2)에서 ΔF_m , 즉 CH_4 플럭스의 손실량이 증가하게 된다. 또는 기기간의 분리 거리가 0.5m일 때, 풍속이 $1m s^{-1}$ 에서 $3s m^{-1}$ 로 증가하면 전달 함수는 0.03에서 0.51로 지수적으로 증가하여 손실량은 반대로 감소하게 된다. 따라서 에디 공분산 기기를 타워에 설치할 때에는 이러한 보정 과정을 고려하여 설치 높이와 기기간 분리 거리를 미리 최적화함으로써 자료의 후처리 과정에서 보정량을 사전에 최소화시키는 것이 바람직하다.

2.3.3. 공기 밀도 보정

관측된 메탄 플럭스의 경우, 현열 및 잠열 플럭스의 동시 수송으로 인한 공기 밀도(air density)의 변동이 발생한다. 이러한 밀도 변동은 미세한 평균 연직 풍속(즉, $\bar{w} \neq 0$)을 만들어내어 이에 수반되는 추가적인 플럭스를 고려해 주어야 한다. 이에 대한 보정식은 아래와 같다(Webb *et al.*, 1980):

$$F_{mc} = \overline{w'm'} + \mu \frac{\bar{m}}{\rho_d} \overline{w'q'} + (1 + \mu\sigma) \frac{\bar{m}}{T} \overline{w'T'} \quad (4)$$

여기서 F_{mc} 는 보정된 메탄 플럭스($mg m^{-2}h^{-1}$), $\overline{w'm'}$ 는 주파수 보정까지만 적용된 메탄 플럭스($mg m^{-2}h^{-1}$), μ 는 건조 공기 대 수증기의 몰 질량비, \bar{m} 는 메탄의 평균 밀도(mgm^{-3}), ρ_d 는 건조 공기의 평균 밀도($g m^{-3}$), $\overline{w'q'}$ 는 수증기 플럭스($g m^{-2}h^{-1}$), σ 는 수증기 대 건조 공기의 밀도비, \bar{T} 는 평균 기온(K), $\overline{w'T'}$ 는 열 플럭스($Km h^{-1}$)이다. 여기서는 정압의 변동에 의한 효과(Massman and Tuovinen, 2006; LICOR Inc., 2013)는 고려하지 않았다(Iwata *et al.*, 2013). 식 (4)에 따르면 기온과 메탄 농도가 일정할 때 공기 밀도 변동에 따른 보정은 잠열보다 현열에 민감하게 반응한다. 예를 들어, 잠열 플럭스가 $600W m^{-2}$ 이고 현열 플럭스가 $100W m^{-2}$ 인 경우 잠열 보정과 현

열 보정이 크기가 비슷해 지지만, 반대로 잠열이 100W m⁻²이고 현열이 600W m⁻²인 경우 잠열 보정보다 현열 보정이 약 6배정도 크다. 또한 공기 밀도 보정은 잠열과 현열의 크기뿐 아니라 수송 방향에도 영향을 받는다. 예를 들어 잠열이 100W m⁻²이고 현열이 -50W m⁻²이면 메탄 플럭스는 보정에 의해 감소한다.

2.3.4. 분광 보정

분광(spectroscopic) 효과란 기온, 수증기, 기압에 따라 기체의 흡수선이 변화하는 것을 말한다. 레이저를 이용하는 개회로 가스 분석기인 LI-7700은 분광효과를 보정해주어야 정확한 플럭스 측정이 가능하다(LI-COR Inc., 2013). 분광효과를 고려한 보정 식은 아래와 같이 공기 밀도 보정 식 (4)에 세 개의 계수들을 추가하여 나타낼 수 있다(LI-COR Inc., 2013).

$$F_{MC} = A \left\{ \overline{w' m'} + B \mu \frac{\overline{m}}{\rho_d} \overline{w' q'} + C (1 + \mu \sigma) \frac{\overline{m}}{T} \overline{w' T'} \right\} \quad (5)$$

여기서 F_{MC} 는 분광 보정이 포함된 최종 CH₄ 플럭스이며, 계수 A, B, C 는 다음과 같다(LI-COR Inc., 2013)

$$A = \overline{\kappa} \quad (6)$$

$$B = 1 + (1 - 1.46 \overline{x_v}) a_v \overline{P_e} \frac{\kappa_{p_e}}{\overline{\kappa}} \quad (7)$$

$$C = 1 + (1 - \overline{x_v}) \overline{T} \frac{\kappa_T}{\overline{\kappa}} + \overline{x_v} (B - 1) \quad (8)$$

여기서 $\kappa (=A)$ 는 기온, 수증기, 기압의 함수이고, x_v 는 수증기의 몰분율, $a_v (=0.46)$ 는 CH₄에 대한 수증기의 증가 계수, P_e 는 등가 압력(kPa), κ_{p_e} 는 일정한 온도에서 등가 압력에 따른 κ 의 변화율, κ_T 는 일정한 등가 압력에서 기온에 따른 κ 의 변화율이다. 일반적으로 A 는 기온, 수증기, 기압이 증가함에 따라 증가한다. 이때 A 와 B 는 음의 상관관계를 가지는 반면, A 와 C 는 양의 상관관계를 갖는다. 이러한 관계의 따라 A, B, C 는 기온 5~40°C, 수증기 몰분율 0.01~0.05, 기압 95~115kPa 범위에서 각각 0.94~1.17, 1.35~1.51, 1.14~1.41의 값을 가진다(LI-COR Inc., 2013).

III. 결과 및 고찰

3.1. 미기상학적 환경

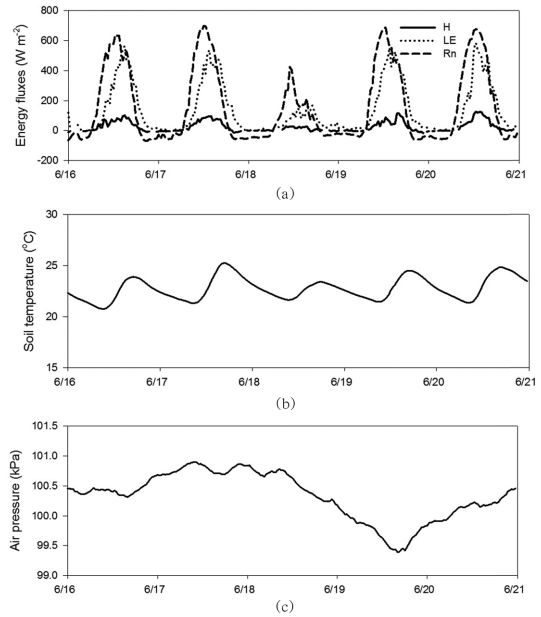


Fig. 3. Daily variations of (a) surface energy fluxes, (b) soil temperature and (c) atmospheric pressure in Gimje rice paddy site before transplanting in June 2012.

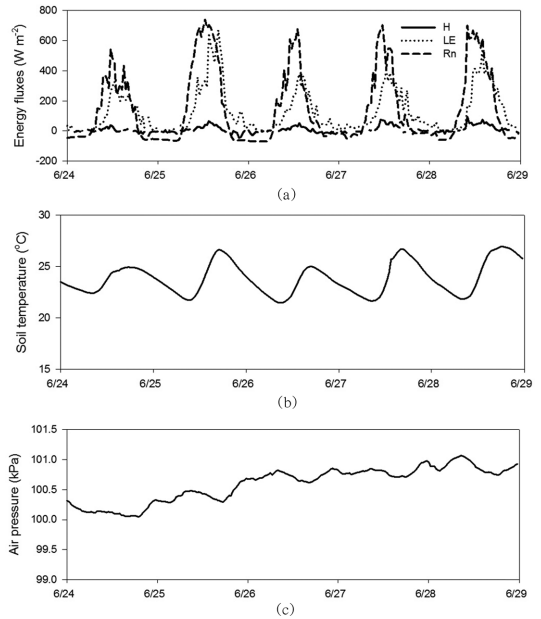


Fig. 4. Same as in Fig. 3 after transplanting in June 2012.

관측자료는 2012년도 모내기(6월 21일) 전인 6월 16일부터 20일까지를 기간 I, 모내기 후인 6월 24일부터 28일까지를 기간 II로 나누어서 분석하였다. 두 기간 동안 모두 논에는 물이 관개되어 있었다. Figs.

3와 4는 두 기간에 대한 에너지 수지(순복사, 현열 및 잠열 플럭스), 토양 온도, 기압을 시계열로 나타낸 그림이다. 강수는 전체 기간 중 마지막 날인 6월 28일에 0.5mm가 유일하게 관측되었고, 두 기간의 보웬 비는

각각 0.27과 0.19 였다. 순복사는 한낮(11:00-15:00hrs)에 기간 I에서 최대 679W m^{-2} , 평균 $528\pm 170\text{W m}^{-2}$, 기간 II에서 최대 740W m^{-2} , 평균 $520\pm 150\text{W m}^{-2}$ 이었다. 토양온도는 기간 I에서 평균 $22.8\pm 1.1^\circ\text{C}$, 기간 II

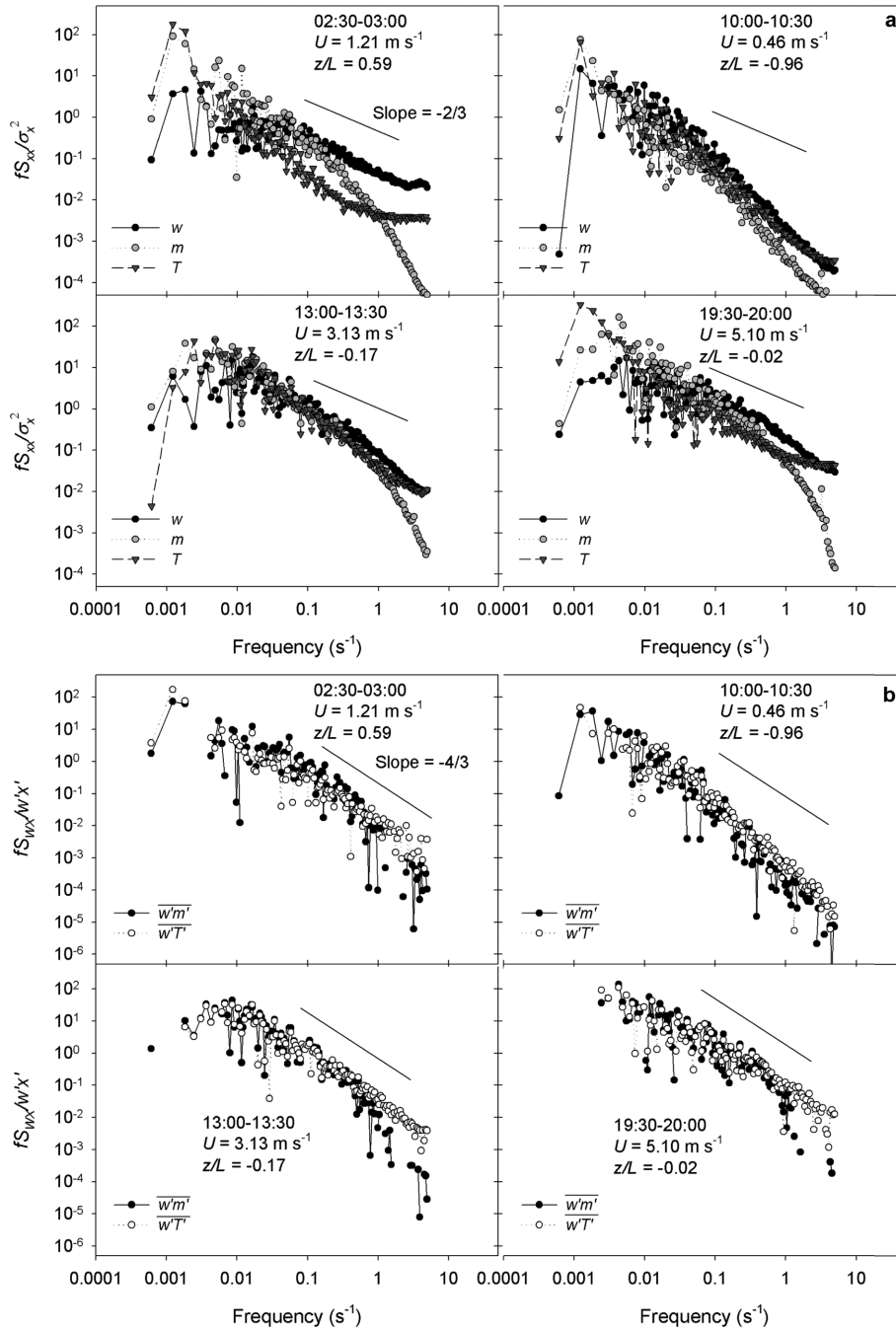


Fig. 5. (a) Normalized power spectra of vertical wind velocity (w), methane density (m), and temperature (T) and (b) normalized cospectra of covariances, $\overline{w'c'}$ and $\overline{w'T'}$ on 28 June 2012.

에서 23.8±1.6°C였다. 기압은 6월 18일부터 꾸준히 감소하다가 6월 19일 저녁에 최저기압 99.4kPa를 기점으로 회복되는 경향을 보였다. 기간 II의 경우 기압은 6월 25일 자정 이후 꾸준히 증가(100.0-101.1kPa)하였다.

3.2. 렉스펙트럼 분석

LI-7700과 CSAT3에서 관측된 분산 및 공분산 자료의 품질을 확인 하기 위하여 안정도와 풍속이 다양했던 6월 28일중 4개의 시간에 대해 연직 풍속(*w*), 메탄 농도(*m*), 기온(*T*)의 렉스펙트럼(power spectrum)과 메탄 플럭스($\overline{w'm'}$) 및 열 플럭스($\overline{w'T'}$)의 코스펙트럼(cospectrum)을 분석하였다(Fig. 5). 변수들간의 상사성을 가정하면, CSAT3에서 독립적으로 관측되는 *w*와 *T*의 스펙트럼 및 $\overline{w'T'}$ 코스펙트럼을 기준으로 메탄 자료를 비교해 볼 수 있다. 따라서 CH₄ 농도 *m*의 스펙트럼과 CH₄ 플럭스 $\overline{w'm'}$ 의 코스펙트럼이 보이는 차이는 곧 LI-7700의 경로 길이 및 분리 거리에 의한 효과로 해석할 수 있다.

먼저 *w*, *T*, 그리고 $\overline{w'T'}$ 의 스펙트럼은 풍속이 매우 약했던(0.5m s⁻¹) 10:00-10:30hrs자료를 제외하고, 관성 아범위(inertial subrange)에서 그 기울기가 각각 -2/3(렉스펙트럼)와 -4/3(코스펙트럼)으로 렉법칙(power law)을 만족한다. 따라서 선택된 자료의 품질에 큰 문제가 없음을 보여준다. 그러나 이와는 달리 *m*과 $\overline{w'm'}$ 의 스펙트럼은 고주파수 영역(>0.1Hz)에서 스펙트럼 밀도가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 풍속이 매우 약했던 10:00-10:30hrs의 경우, 경로 길이와 기기간 분리 거리에 상관없이 모든 변수의 스펙트럼 밀도가 떨어져, 관성 아범위에서 렉법칙을 만족하지 못하였다. 풍속 관측에 사용된 CSAT3 기기의 경우 연직 풍속의 정확도가 0.5mm s⁻¹로 매우 높기 때문에 기기적 오차가 발생했을 가능성은 없다고 판단된다. 이러한 결과는 난류가 매우 약하게 발달되어 해당 관측지에서 주파수 반응 보정이 메탄 플럭스 자료의 품질 관리에 있어 중요하며, 풍속이 약할 때 관측된 플럭스 자료를 면밀히 검토할 필요가 있음을 보여준다.

3.3. 메탄 농도 및 플럭스 시계열

Fig. 6는 두 기간의 CH₄ 농도의 시계열을 보여준다. 기간 I과 기간 II 동안의 평균 CH₄ 농도는 각각

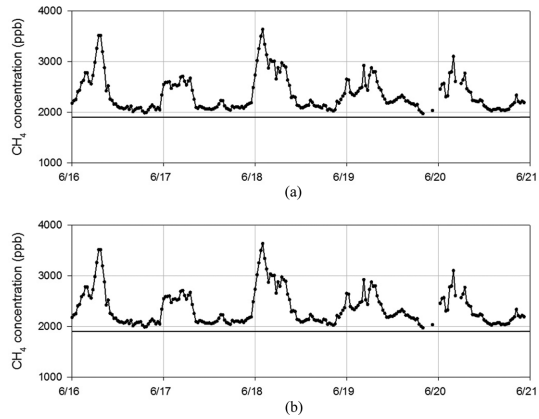


Fig. 6. Daily variation of CH₄ concentration (a) prior to transplanting and (b) after transplanting. The Bottom solid line represents the background concentration (~1,938 ppb) measured by Korea Meteorological Administration.

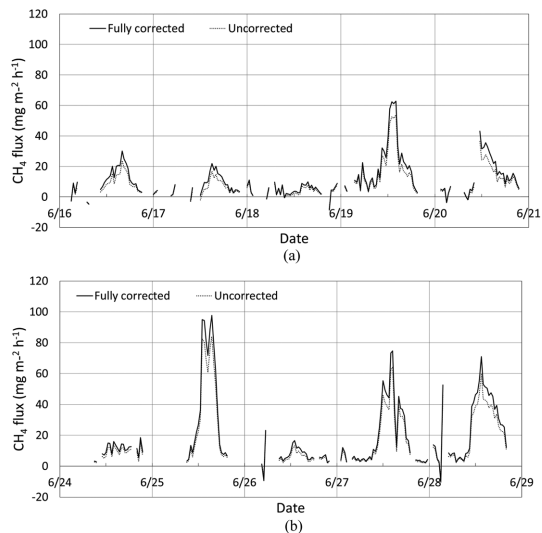


Fig. 7. Daily variation of CH₄ flux (a) prior to transplanting and (b) after transplanting. The solid and dotted lines represent the fully corrected and uncorrected fluxes, respectively.

2,355ppb, 2,347ppb로 2012년 배경대기 메탄 농도인 1,938ppb에 비해 높았다(GAW, 2012). 각 기간 별로 최대 CH₄ 농도는 기간 I에서 3,643ppb, 기간 II에서 3,724ppb였고 최대값이 관측된 시간은 6월 18일 새벽 2시와 6월 28일 새벽 4시경이었다.

벼가 이앙되지 않은 기간 I의 경우, 최종 CH₄ 플럭스는 보정 전 플럭스에 비해 주간(07:00-19:00)에는 평균 29%, 야간(19:00-07:00)에는 평균 17%, 모내기 후인 기간 II는, 그 차이가 주간에는 평균 20%, 야간에

는 평균 18% 이었다(Fig. 7). 최종 보정된 CH_4 플럭스는 음의 값을 제외하면 기간 I에서 $0.1\sim 62.8\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$, 기간 II에서 $1.4\sim 97.7\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 관측 기간 중에 일부 음의 CH_4 플럭스가 관측되었는데, 이는 관측 기간 동안 대부분 늦은 저녁과 새벽 시간으로 바람이 매우 약한 환경에서 나타났다.

3.4. 메탄 플럭스의 단계별 보정 결과

보정의 각 단계가 최종 플럭스 값에 기여하는 상대적인 영향을 알아보았다. 기간 I과 기간 II에서 비가 오지 않으며, 매우 맑은 날(최대전천일사 900W m^{-2}), 하루씩(6월 19일과 6월 27일)을 택하여 보정 단계별로 메탄 플럭스의 24 시간 시계열을 Figs. 8과 9에 나타내었다.

3.4.1. 주파수 반응 보정

전체 보정단계에서 주파수 반응 보정이 가장 컸다(Figs. 8b-c and 9b-c, solid lines). 그 효과는 주간과 야간으로 나누었을 때, 최종 플럭스의 평균 10%와 15% 이었다. 이러한 패턴은 기간 I과 II 사이에 큰 차

이를 보이지 않았다. 앞서 언급된 바와 같이, 식 (3)에 따라 주파수 보정은 기기간의 분리 거리, 풍속에 의해 영향을 받으며 주파수 영역에 따라 다르게 나타난다. 따라서 주간과 야간의 보정 효과의 차이는 야간의 약한 풍속에 기인함을 알 수 있다.

3.4.2. 공기 밀도 보정

공기 밀도 보정은 현열과 잠열에 의해 영향을 받기 때문에 야간보다 주간에 그 영향이 크다(Webb *et al.*, 1980). 주간의 경우 최종 플럭스 대비 최대 10%의 보정효과를 보이는 반면, 야간에는 $-1\sim 1\%$ 의 효과를 보였다(Figs. 8(b)-c) and 9(b)-c), dash-dot lines). 야간의 경우 현열 플럭스와 잠열 플럭스가 상대적으로 주간에 비해 작아 보정효과가 작은 것으로 판단된다. 보정량을 곱해주는 주파수 반응 보정과는 달리, 보정량을 더해주는 공기 밀도 보정은 메탄 플럭스가 커질수록 보정 효과가 작아진다. 따라서 메탄 방출이 훨씬 컸던 기간 II의 경우 보정의 효과는 상대적으로 작게 나타난다. 마찬가지로 메탄 플럭스가 상대적으로 작을 때에 보정 효과가 커짐을 예상할 수 있다. 예를 들어, 기간 I의 6월 19일과 기간 II의 6월 27일 15:00 경에 메탄 플럭스가 빠르게 감소할 때 공기 밀도 보정

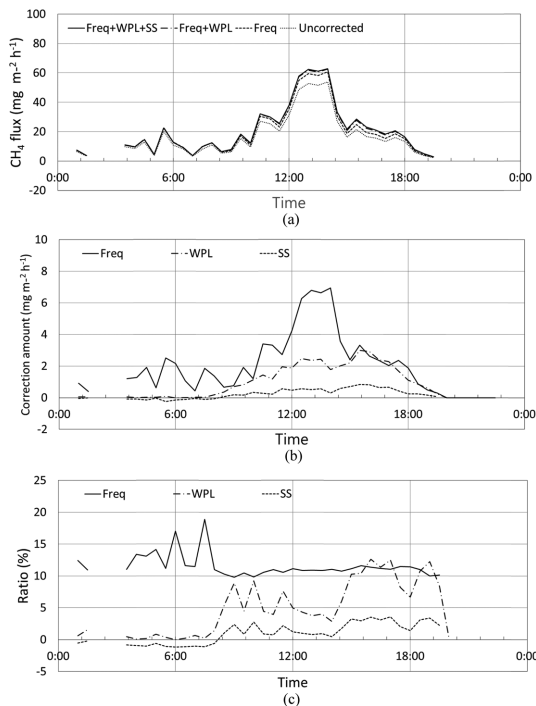


Fig. 8. Diurnal variations of (a) CH_4 flux, (b) the amount of corrections, and (c) the ratio of individual correction to total flux prior to transplanting (19 Jun 2012).

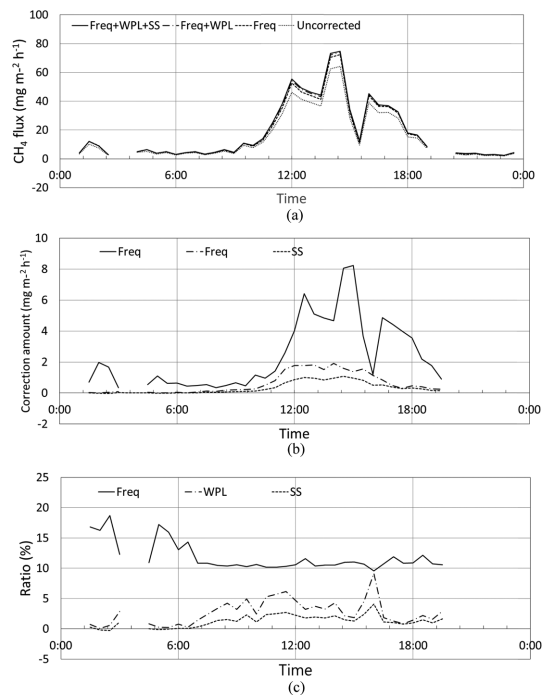


Fig. 9. Same as in Fig. 8 after transplanting (27 June 2012).

의 효과가 커지는 것을 볼 수 있다.

3.4.3. 분광 보정

분광 보정의 효과는 평균 2% 였고, 공기 밀도 보정과 마찬가지로 야간보다 주간에 더 크게 나타났다 (Figs. 8(b)-(c) and 9(b)-(c), dotted lines). 앞서 2.3.4에서 설명한 바와 같이 분광 보정은 기온과 압력으로 공기 밀도 보정식에 계수 *A*, *B*, *C*를 곱해주는 형태이다(식 4, 식 5). 식에서 알 수 있듯이 메탄 플럭스가 공기 밀도 보정량에 비해 크면 보정의 효과는 대부분 계수 *A*에 의해 결정된다. 관측 기간 동안 계수 *A*는 0.97-1.02의 범위를 갖기 때문에 보정의 영향이 작았다. 그러나 메탄 플럭스가 작은 경우 공기 밀도 보정과 같이 보정의 영향이 증가하였다.

적 요

CH₄는 CO₂ 및 N₂O와 더불어 중요한 온실가스로서 지속적이고도 체계적인 감시가 요구된다. 에디 공분산 기술 기반의 CO₂ 플럭스의 관측은 이미 세계적으로 관측망이 구축되어 관측부터 자료처리에 이르기까지 모든 과정이 표준화되어 있을 뿐 아니라 체계적으로 잘 문서화되어 있다. 그러나 미량 기체인 CH₄의 경우, 레이저 기반의 고속반응 분광계를 필요로 할 뿐 아니라, 이에 수반되는 플럭스 자료의 처리 과정이 표준화되어 있지 않다. 본 연구 노트에서는 최근에 상용화된 개회로 파장 변조 분광계를 사용하여 에디 공분산 방법으로 논에서 관측한 CH₄ 플럭스 결과를 보고하였다. 모내기 전과 직후의 각 5일간 연속 관측한 자료를 KoFlux 프로토콜에 따라 상용화된 EddyPro™ 프로그램을 사용하여 자료를 처리하였다. 이 후처리 과정에서 세 가지 주요 보정, (1) 주파수 반응 보정, (2) 공기 밀도 보정, (3) 분광 보정의 효과를 정량화 하였다. 보정 효과는 밤과 낮에 따라 차이를 보였고, 메탄 플럭스가 작을수록 보정 효과가 컸다. 전반적으로 보정 후에 메탄 플럭스는 평균 20-25% 정도 증가하였다. 국가농림기상센터(www.ncam.kr)에서는 분광 보정과 빈 자료 메우기를 포함한 CH₄플럭스 자료 처리가 포함된 업데이트된 KoFlux 프로그램을 일반 사용자에게 제공할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국기초기술연구회와 한국표준과학연구원의 국가 현안대응연구-기후변화대응측정기술개발사업(12011023)과 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술연구개발사업(과제번호: PJ90722802)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baldocchi, D., Eva Falge, Lianhong Gu, Richard Olson, David Hollinger, Steve Running, Peter Anthoni, Ch Bernhofer, Kenneth Davis, Robert Evans, Jose Fuentes, Allen Goldstein, Gabriel Katul, Beverly Law, Xuhui Lee, Yadvinder Malhi, Tilden Meyers, William Munger, Walt Oechel, K. T. Paw, Kim Pilegaard, H. P. Schmid, Riccardo Valentini, Shashi Verma, Timo Vesala, Kell Wilson, and Steve Wofsy, 2001: FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **82**, 2415-2434.
- Baldocchi, D., Detto, M., Sonnentag, O., Verfaillie, J., Teh, Y. A., Silver, W., and Kelly, N. M., 2012. The challenges of measuring methane fluxes and concentrations over a peatland pasture. *Agricultural and Forest Meteorology*, **153**, 177-187.
- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E. G., Carouge, C., Langenfelds, R. L., Lathiere, J., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C., and White, J., 2006. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*, **443**, 439-443.
- Burba, G., 2013: Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA, 331.
- Choi, T., J. Kim, and J. I. Yun, 1999: On Using the Eddy Covariance Method to Study the Interaction between Agro-Forest Ecosystems and the Atmosphere. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **1**, 60-71. (in Korean with English abstract)
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., and Others, 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2, in: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*.
- Hong, J., and J. Kim, 2002: On Processing Raw Data from Micrometeorological Field Experiments. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **4**(2), 119-126. (in Korean with English abstract)

- Hong, J., H. Kwon, J.-H. Lim, Y.-H. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux Eddy-Covariance Data Processing. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **11**(1), 19-26. (in Korean with English abstract)
- IPCC. 2013, Climate change, 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Iwata, H., Y. Kosugi, K. Ono, M. Mano, A Sakabe, A. Miyata, and K. Takahashi, 2013: Cross-Validation of Open-Path and Closed-Path Eddy-Covariance Techniques for Observing Methane Fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, **151**(1), 95-118.
- Kim, J., S. B. Verma, N. Shurpali, Y. Harazono, A. Miyata, J.-I. Yun, B. Tanner, and J.-W. Kim, 2000: Diurnal and seasonal variations in CH₄ emission from various freshwater wetlands, *Non-CO₂ Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control and Implementation*, J. van Ham et al. (Eds), Kluwer Academic Publishers, 131-136pp.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J.-H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B.-L. 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**(6), 881-889.
- Korea Global Atmosphere Watch Center, 2012: Report of Global Atmosphere Watch. Korea Meteorological Administration, 27pp.
- LI-COR Inc., 2013: LI-7700 Open Path CH₄ Analyzer Instruction Manual. LI-COR, 4647 Superior Street, Inc. Lincoln, NE, USA.
- Massman, W. J., and J. P. Tuovinen, 2006: An Analysis and Implications of Alternative Methods of Deriving the Density (WPL) Terms for Eddy Covariance Flux Measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, **121**(2), 221-227.
- Min, S.-H., K.-M. Shim, Y.-S. Kim, M.-P. Jung, S.-C. Kim, and K.-H. So, 2013: Seasonal Variation of Carbon Dioxide and Energy Fluxes During the Rice Cropping Season at Rice-barley Double Cropping Paddy Field of Gimje. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **15**(4), 273-281. (in Korean with English abstract)
- Moncrieff, J. B., J. M. Massheder, H. D. Bruin, J. Elbers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Soegaard, and A. Verhoef, 1997: A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 589-611.
- Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 2013, 2013: National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea
- Wassmann, R., H. U. Neue, R. S. Lantin, K. Makarim, N. Chareonsilp, L. V. Buendia, and H. Rennenberg, 2000: Characterization of Methane Emissions from Rice Fields in Asia. II. Differences among Irrigated, Rainfed, and Deepwater Rice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **58**(1-3), 13-22.
- 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.