

〈Original article〉

## 벼논에서 open-path와 closed chamber 방법 간 메탄 배출량 비교

정현철\* · 최은정 · 김진엽 · 이선일 · 이종식

농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과

### Comparison of CH<sub>4</sub> Emission by Open-path and Closed Chamber Methods in the Paddy Rice Fields

Hyun-cheol Jeong\*, Eun-jung Choi, Gun-yeob Kim, Sun-il Lee and Jong-sik Lee

National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

**Abstract** - The closed chamber method, which is one of the most commonly used method for measuring greenhouse gases produced in rice paddy fields, has limitations in measuring dynamic CH<sub>4</sub> flux with spatio-temporal constrains. In order to deal with the limitation of the closed chamber method, some studies based on open-path of eddy covariance method have been actively conducted recently. The aim of this study was to compare the CH<sub>4</sub> fluxes measured by open-path and closed chamber method in the paddy rice fields. The open-path, one of the gas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> etc.) analysis methods, is technology where a laser beam is emitted from the source passes through the open cell, reflecting multiple times from the two mirrors, and then detecting. The CH<sub>4</sub> emission patterns by these two methods during rice cultivation season were similar, but the total CH<sub>4</sub> emission measured by open-path method were 31% less than of the amount measured by closed chamber. The reason for the difference in CH<sub>4</sub> emission was due to overestimation by closed chamber and underestimation by open-path. The closed chamber method can overestimate CH<sub>4</sub> emissions due to environmental changes caused by high temperature and light interruption by acrylic partition in chamber. On the other hand, the open-path method for eddy covariance can underestimate its emission because it assumes density fluctuations and horizontal homogeneous terrain negligible. However, comparing CH<sub>4</sub> fluxes at the same sampling time (AM 10:30-11:00, 30-min fluxes) showed good agreements ( $r^2=0.9064$ ). The open-path measurement technique is expected to be a good way to compensate for the disadvantage of the closed chamber method because it can monitor dynamic CH<sub>4</sub> fluctuation even if data loss is taken into account.

**Keywords** : methane (CH<sub>4</sub>), open-path, chamber, eddy covariance, paddy rice

## 서론

주요 온실가스 중 하나인 메탄(CH<sub>4</sub>)은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 다음으로 지구온난화에 대한 기여도가 높은 물질로 산업혁명 이후 배출량이 지속적으로 증가하고 있다(Stocker *et al.*

2014; Peyron *et al.* 2016). 농업부문에서 배출되는 주요 온실가스는 메탄과 아산화질소(N<sub>2</sub>O)로 이 중 메탄은 주로 벼 재배 과정과 가축의 장내발효에서 배출되며 가축분뇨 처리 과정을 통해서도 일부 배출된다(IPCC 1996). IPCC 가이드 라인에 따라 2017년에 산정한 2015년 우리나라 농업분야 온실가스 배출량은 20.6 백만톤 CO<sub>2</sub>-eq.으로 이 중 30.4% (6.3 백만톤 CO<sub>2</sub>-eq.)가 벼재배를 통한 메탄 배출이다(GIR

\* Corresponding author: Hyun-cheol Jeong, Tel. 063-238-2485, Fax. 063-238-3823, E-mail. tajji152@korea.kr

2017).

농경지에서 배출되는 온실가스( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) 측정 방법에는 chamber enclosure (IAEA 1992), eddy covariance (Alberto *et al.* 2014; Ge *et al.* 2018), flux-gradient (Miyata *et al.* 2000), infrared (Zheng *et al.* 2013) 등이 있다. 이 중 챔버법(closed chamber)과 에디공분산(eddy covariance)을 이용한 연구는 습지나 농경지 생태계를 대상으로 메탄 배출량을 측정하는데 주로 이용되고 있다(Baldocchi *et al.* 2012; Wang *et al.* 2013). 벼재배 논에서의 메탄 측정은 현재까지 챔버를 이용해 온실가스를 포집하고 가스크로마토그래피(Gas Chromatography)를 이용해 정량 분석하는 방법을 주로 사용해왔다(Wassmann *et al.* 2000). 챔버법은 적은 양의 가스를 포집하는데 유리하고, 별도의 전기 공급이 없이도 시료 채취가 가능해 연구 현장에 적용하기가 쉽다(Song *et al.* 2009). 또한 저비용으로 제작이 가능하고 챔버의 설치와 제거가 용이하다는 점도 챔버법의 장점이라고 할 수 있다(Christensen *et al.* 1995). 그러나 챔버법의 경우 시·공간적 제약과 함께 변동 폭이 큰 메탄 배출량을 측정하는데 한계가 있어 에디공분산 방법을 이용한 온실가스 측정 연구가 대안으로 제시되고 있다(McDermitt *et al.* 2011; Alberto *et al.* 2014). 그러나 지금까지 에디공분산 방법을 이용한 연구는 주로 산림지의 이산화탄소 측정에 집중되었고 최근에 들어서야 논이나 습지를 대상으로 메탄을 측정하는 연구가 활

발히 진행되고 있다(Alberto *et al.* 2014).

에디공분산 방법은 식생을 포함한 지표와 대기 간에 교환되는 물리량의 연직플럭스(vertical flux)를 정량화하고 그 교환과정에서 난류의 구조를 밝히는데 사용된다(Choi *et al.* 1999). 여기에서의 물리량은 운동량 플럭스, 현열(sensible heat) 및 잠열(latent heat)과 같은 에너지 플럭스,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ 와 같은 온실가스 등을 말한다(Kaimal and Finnigan 1994; Choi *et al.* 1999). 에디공분산을 이용한 측정방법에는 closed-path 방법과 open-path 방법이 있으며, closed-path 방법의 경우 많은 양의 전기가 필요하고 분석 장비도 무거워 현장에서 이용하는데 많은 제약이 따른다. 반면 open-path를 이용한 분석방법은 저전력과 가벼운 무게로 인해 현장 적용이 용이하다는 장점이 있다(Haslwanter *et al.* 2009; Wang *et al.* 2013; Alberto *et al.* 2014). 최근에는 농경지에서 open-path의 에디공분산 방법을 이용한 온실가스 측정 연구에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 에디공분산 기술을 현장에 적용하기 위해서는 일정량 이상의 난류(turbulence)와 지형적 조건(작물이 균일하고 측정 면적의 canopy가 편평)이 충족되어야 하고 이와 더불어 고속(10 Hz 이상)으로 반응하는 open-path 방식의 스칼라(scalar) 장비와 3차원 초음파 풍향-풍속-온도계가 필수적으로 설치되어야 하기 때문에 국내에서 측정 연구는 아직 미비한 상황이다(Kang *et al.* 2015)

본 연구에서는 담수상태의 벼논에서 주로 발생하는 메탄

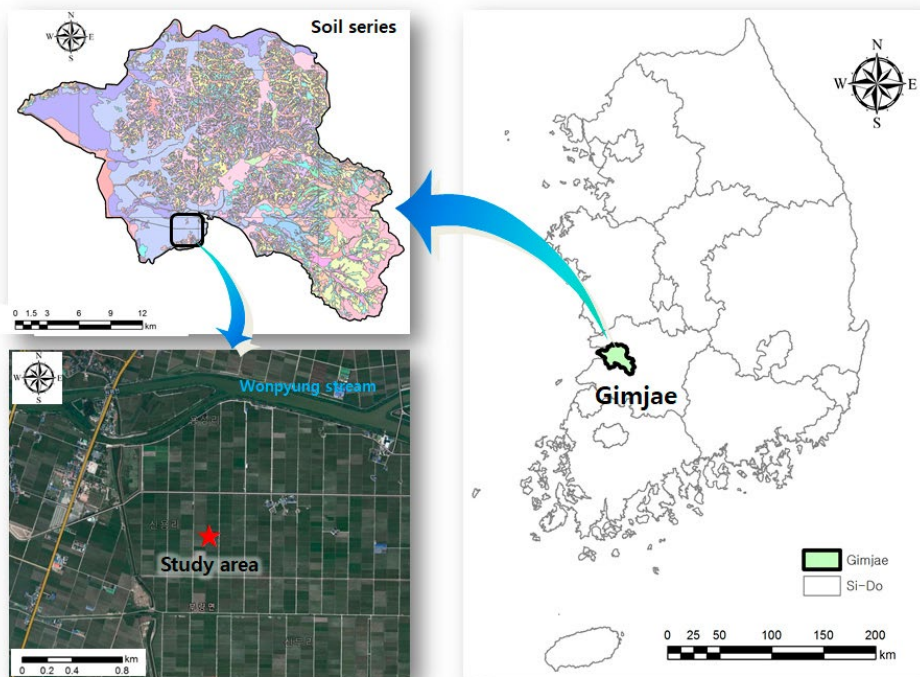


Fig. 1. Location of study site.

을 대상으로 챔버법과 open-path의 에디공분산 방법을 이용해 배출량 차이를 비교 분석하고 이를 통해 향후 챔버를 이용한 온실가스 측정방법을 보완하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지역

연구수행지는 전북 김제시 부량면 신용리 (35°74'86"N, 126°86'40"E, 해발고도 6.5 m)에 위치한 벼재배 단지로 관측지 주변은 에디공분산 방법을 적용하기에 적절한 균질하고 평탄한 지역이다. 관측 지점 (플럭스 타워)을 중심으로 남서쪽 400 m 떨어진 곳에 작은 마을과 지방도가 존재하며, 북동쪽 300 m 지점에는 작은 축사가 있다(Fig. 1).

Table 1은 시험 전 토양의 화학적 특성을 나타낸다. 토양은 미사질양토(Silt loam)의 전북토종으로 물빠짐이 좋은 편이며, pH는 6.9, 유기물 함량은 29.9 g kg<sup>-1</sup>, T-N은 1.8 g kg<sup>-1</sup>이었다. 벼 이앙을 위해 5월 5일 논에 물을 대고, 5월 13일에 비료처리 및 썩레질을 하였다. 벼 품종은 중만생종인 신동진으로 어린모를 5월 19일에 기계 이앙하였고, 10월 11일 수확하였다. 6월 28일부터 7월 14일까지는 무효분얼과 도복 방지를 위해 중간낙수를 하였다.

### 2. 시험방법

#### 1) Closed 챔버 설치 및 메탄 배출량 조사·분석

Open-path에 의한 메탄 배출량과 챔버법에 의한 메탄 배출량 비교를 위해 벼 이앙 3일 후 가스 포집을 위한 closed 챔버를 설치하였다. 챔버의 위치는 플럭스 타워를 기준으로 주풍향(북서풍)을 고려해 북서쪽으로 40 m 떨어진 위

치에 설치하였다(Fig. 2). 챔버는 가로, 세로, 높이가 각각 60×60×120 cm인 투명 아크릴 재질로 챔버 하단에는 물이 드나들 수 있도록 직경 5 cm의 구멍을 뚫었다. 챔버 내부에는 벼재배 면적을 고려해 8모의 벼가 들어가도록 하였고, 챔버 내 공기 순환을 위한 fan과 온도계를 설치하였다. 온실가스 시료 채취를 위한 샘플링 라인을 측면에 설치하여 주 1회 가스시료를 채취하였다. 가스 채취는 60 mL 주사기(syringe)를 이용하여 오전 10시에서 12시 사이에 초기값과 밀폐 30분 후의 값을 취하였다. 메탄의 농도 분석은 가스크로마토그래피(7890A, Agilent, USA) (detector-FID)를 이용해 정량분석을 하였다. 메탄 배출량 계산 방법은 식(1)과 같다.

$$F = q \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \quad (1)$$

$$F = \text{CH}_4 \text{ flux (mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)}$$

$$q = \text{gas density (mg m}^{-3}\text{)}$$

$$V = \text{volume of chamber (m}^3\text{)}$$

$$A = \text{surface area of chamber (m}^2\text{)}$$

$$\Delta c/\Delta t = \text{rate of increase of gas concentration (mg m}^{-3} \text{ h}^{-1}\text{)}$$

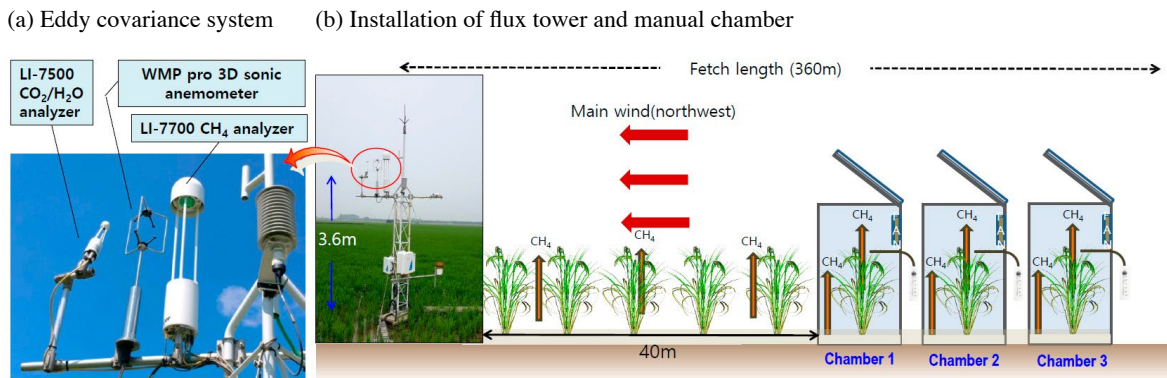
$$T = \text{absolute temperature (273 + mean temperature in chamber) (}^\circ\text{C)}$$

#### 2) Open-path를 이용한 메탄 플럭스 측정 및 타워 설치

Open-path를 이용한 메탄 플럭스 측정을 위해 3차원 풍향풍속계(WMP-PRO, GILL Inc., USA)와 개회로 메탄 분

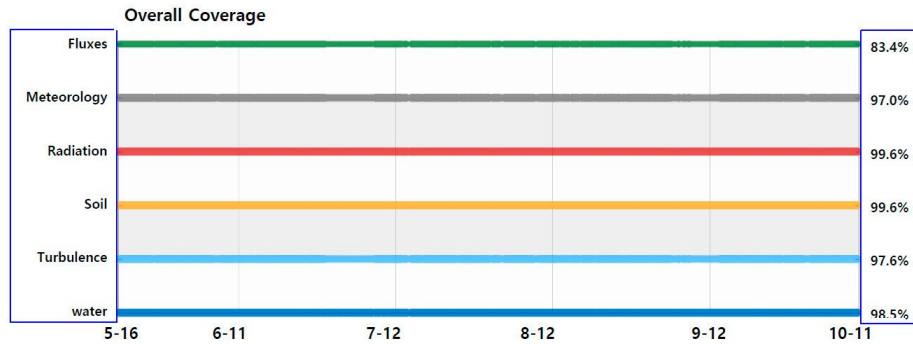
**Table 1.** Chemical properties of soil before experiment

pH	EC	OM	T-N	Ex. Cation			C/N ratio
				K	Ca	Mg	
(1:5 H <sub>2</sub> O)	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	--- cmolc kg <sup>-1</sup> ---			10.2
6.9	0.68	29.9	1.8	0.4	7.1	1.6	

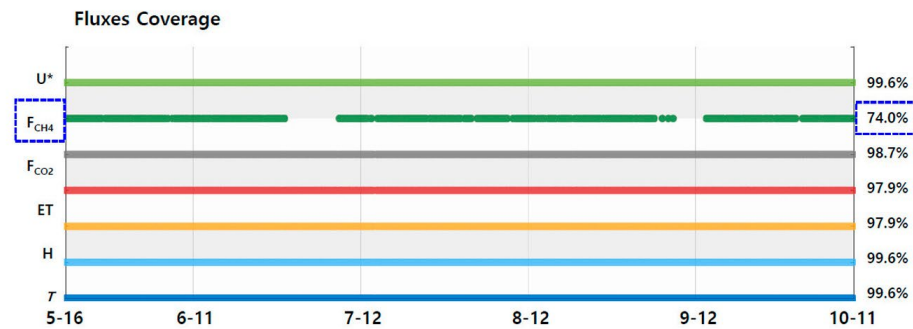


**Fig. 2.** (a) Set-up of eddy covariance system with LI-7500 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O analyzer, WMP-PRO 3D anemometer, and LI-7700 CH<sub>4</sub> analyzer. (b) Illustration of eddy covariance flux tower and closed chamber in study site.

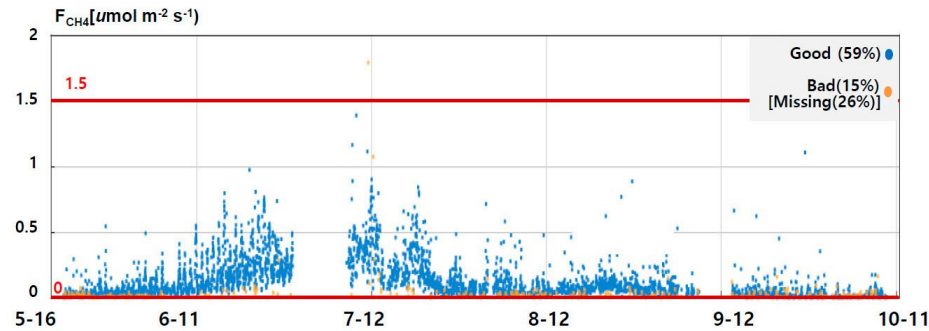
(a) Overall coverage of raw data: 83.4%



(b) CH<sub>4</sub> fluxes coverage of raw data: 74.0%



(c) Quality flag (Good 61%, Bad 11%, Missing 26%) and despiked



**Fig. 3.** The results of data processing using TOVI software. (a) overall coverage of raw data, (b) CH<sub>4</sub> flux coverage of raw data, and (c) quality flag and de-spiked.

석기(LI-7700, Li-cor Inc., USA)를 지면으로부터 3.6 m 높이에 설치하였다. 메탄 보정 시 필요한 잠열 플럭스 측정을 위해 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 분석기(LI-7500, Li-cor Inc., USA)도 같은 높이에 설치하였다(Fig. 2a). 플럭스 타워 설치 전 주 풍향을 분석하였고, 이를 고려해 개회로 메탄 분석기가 북서쪽(정북기준 285°)을 향하도록 하였다. LI-7700은 파장변조분광(wavelength modulation spectroscopy)을 이용해 고속으로 메탄을 분석하는 장비이다. LI-7700의 상단(upper mirror)과 하단(lower)의 광학적인 물리적 경로는 0.5 m이지만 mirror에 설치된 Herriott cell을 60회 반복하여 측정하기

때문에 실측 광학경로는 30 m이다. LI-7700은 WMP-PRO와의 거리를 최소화하기 위해 관측경로 중심 부분을 동일하게 하여 0.23 m 거리에 설치하였다. LI-7500의 물리적 경로는 0.125 m로 WMP-PRO와의 거리는 0.25 m로 하여 설치하였다. 미기상자료 수집을 위해 온습도센서(HMP-155, Vaisala, USA)를 지상 1.5 m에 설치하고 순복사계(CNR4, Kipp & Zonen, Netherlands)를 지상 3.6 m에 설치하였다. PAR(photosynthetically active radiation) 측정을 위해 퀀텀센서(LI-190R, Li-cor Inc., USA)를 지상 3.6 m에 설치하고 강우량 측정을 위해 강우량계(TR-525USW, Texas Electronics,

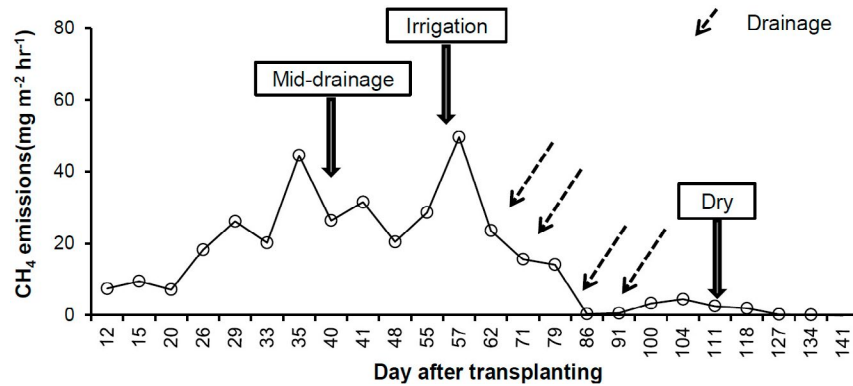


Fig. 4. Change in CH<sub>4</sub> emission by closed chamber method during rice cultivation.

USA)를 지상 1.5 m에 설치하였다. 열전도율 측정을 위해 토양 온도 플럭스 센서(HFP01, HUKSEFLEX, Netherlands)를 토양으로부터 10 cm 깊이에 설치하고 같은 깊이에 토양수분 측정 센서(Hydro Probe II, Stevens, USA)를 설치하였다. 30분 평균된 자료 수집을 위해 스마트플럭스시스템(Smart flux 2 system, Li-cor Inc., USA)을 설치하여 자료를 수집하였다. 30분간 측정되어진 데이터는 전용 프로그램(TOVI software, Li-cor Inc., USA)을 이용해 coverage, QC, footprint 등의 작업을 수행하였다.

### 3. Open-path를 이용한 메탄 플럭스 데이터 품질관리

Fig. 3은 smart flux software에 의해 계산된 30분간 평균값을 TOVI software를 이용해 분석한 결과이다. Open-path에 의해 측정된 플럭스(fluxes), 기상(meteorology), 복사(radiation), 토양(soil), 난류(turbulence), 물(water)의 측정율(coverage)은 각각 83.4%, 97.0%, 99.6%, 99.6%, 97.6%, 98.5%였다(Fig. 3a). 플럭스 데이터 중 메탄 플럭스는 74.0%가 수집되었고, 26%의 데이터 손실이 있었다. 메탄 플럭스 데이터 손실은 전원공급 차단과 그에 따른 장비 재가동 문제로 6월 29일부터 7월 7일까지 약 8일간, 9월 9일부터 13일까지 약 5일간의 연속적인 데이터 손실이 발생했다(Fig. 3b). Fig. 3c는 quality flag를 이용해 신뢰도가 낮은 raw data를 필터링하고 튀는 자료를 제거한 결과이다. 일반적으로 quality flag는 0 (best quality flux), 1 (suitable for general analysis such as annual budget), 3 (should be discarded from the results dataset)의 3단계로 구분하며 일반적으로 0, 1은 데이터 품질에 문제가 없는 것으로 판단하여 2를 제외한 0과 1의 메탄 플럭스 데이터를 활용하였다(Foken *et al.* 2004). Quality flag 수행결과 약 15%의 데이터가 필터링되어 59%의 데이터를 이번 배출량 평가에 활용하였다. Open-path 측정에서 얻어진 데이터 중에는 튀는 자료가 존재하며

이를 제거(de-spiked)해야 데이터에 대한 품질이 높아진다. 이번에 측정된 데이터에서는  $-$ 값과  $1.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이상값은 이상치로 간주하여 배출량 비교 시 제외하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. Closed 챔버법에 의한 메탄 배출량

Fig. 4는 벼재배 기간 동안 closed 챔버를 이용해 분석한 메탄 배출량 변화를 나타낸다. 벼 이앙 후 12일째인 5월 30일에 첫 메탄 분석을 시작하였다. 메탄 배출량은 중간 물떼기(mid-drainage)를 시작하기 전인 6월 26일(35 DAT)까지  $44.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 지속적으로 증가하였고, 중간 물떼기를 시작한 6월 27일부터 배출량은  $26.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 약간 감소하기 시작하였다. 일반적으로 논에서 메탄 배출은 혐기적인 토양 조건(답수상태)에서 유기물이 메탄 생성균에 의해 분해되면서 벼 통기조직을 통해 배출되는데 이번 실험에서 중간 물떼기 기간 중 메탄 배출이 감소한 이유 또한 물떼기로 인해 토양이 혐기적 조건에서 호기적 조건으로 변했기 때문이다(Chen *et al.* 1993; Hadi *et al.* 2010; Tyagi *et al.* 2010). Minamikawa and Sakai (2006)도 벼재배 기간 중 물 관리(중간 물떼기)에 의해 메탄 배출량이 감소한다고 하였다. 그러나 중간 물떼기 기간(36-55 DAT)에 많은 강우가 집중되어 물떼기에 의한 메탄 배출 감소폭은 크지 않았다. Kim *et al.* (2016)은 우리나라와 같이 중간 물떼기 기간에 태풍이나 집중호우로 인해 비가 많이 집중 될 경우에는 메탄 배출효과가 크지 않다고 보고한 바 있다. 중간 물떼기 이후 관개한 시점부터 메탄 배출량은 다시 증가했고 이앙 후 57일째부터 메탄 배출량 감소가 관찰(62, 71, 79, 86, 91 DAT)되었는데 이는 지역 특성상 논에서 물 공급이 이루어지는 시기(매주 금요일)에 농가에서 공급 시기를 놓쳐 물 공급이 제대

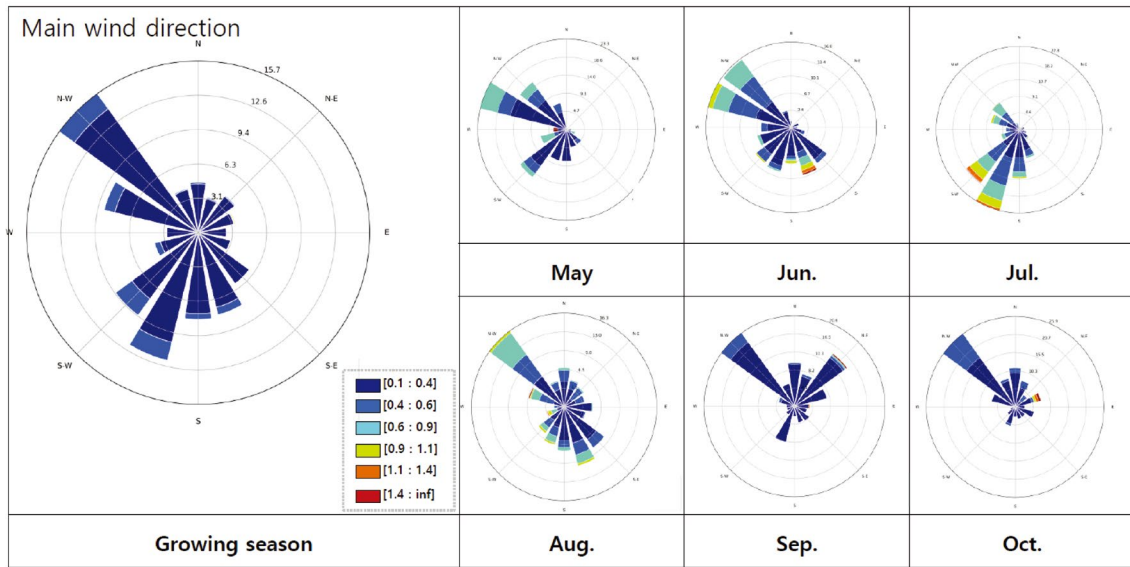


Fig. 5. Analysis for the main wind direction.

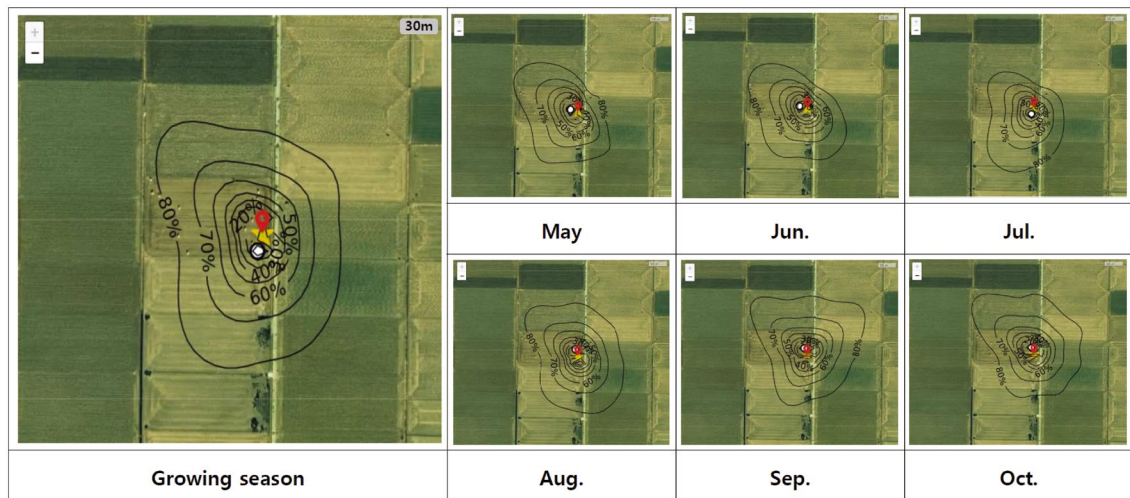


Fig. 6. The CH<sub>4</sub> flux footprint measured by flux tower during rice cultivation.

로 이루어지지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 특히 79, 86, 91 DAT에는 식안으로도 논에 물이 거의 관찰되지 않았다. 수확을 위해 논을 본격적으로 말리기 시작한 이후부터(118 DAT), 메탄 배출량은 급격히 감소하기 시작하여 수확 전에 메탄 배출은 대기 중 메탄 농도와 비슷한 수준을 나타냈다.

## 2. Open-path 방법에 의한 메탄 플럭스

Fig. 5는 플럭스 타워에서 측정된 재배 기간 동안의 주 풍향을 나타낸다. 재배 기간 동안의 주 풍향은 북서풍이었으나

7월에는 남서풍의 영향이 간접적으로 있었던 것으로 분석되었다. Fig. 6은 플럭스 타워에서 측정된 재배 기간 동안의 메탄 footprint를 나타낸다. 플럭스 타워에 설치된 측정 장비의 높이(3.6 m)를 기준으로 약 360 m 반경의 메탄 플럭스 측정이 가능하다. TOVI software를 이용해 분석한 결과 메탄 플럭스 측정 데이터의 80% 이상이 반경 200 m 내에서 측정된 것으로 분석되었다. 이는 시험 사이트로 선정한 지역 내에서 메탄 배출량이 측정되었음을 의미하며 또한 closed 챔버가 설치된(플럭스 타워로부터 40 m 거리) 지역 내에서 메탄 배출량이 측정되어 open-path 측정 데이터와 closed 챔버에서

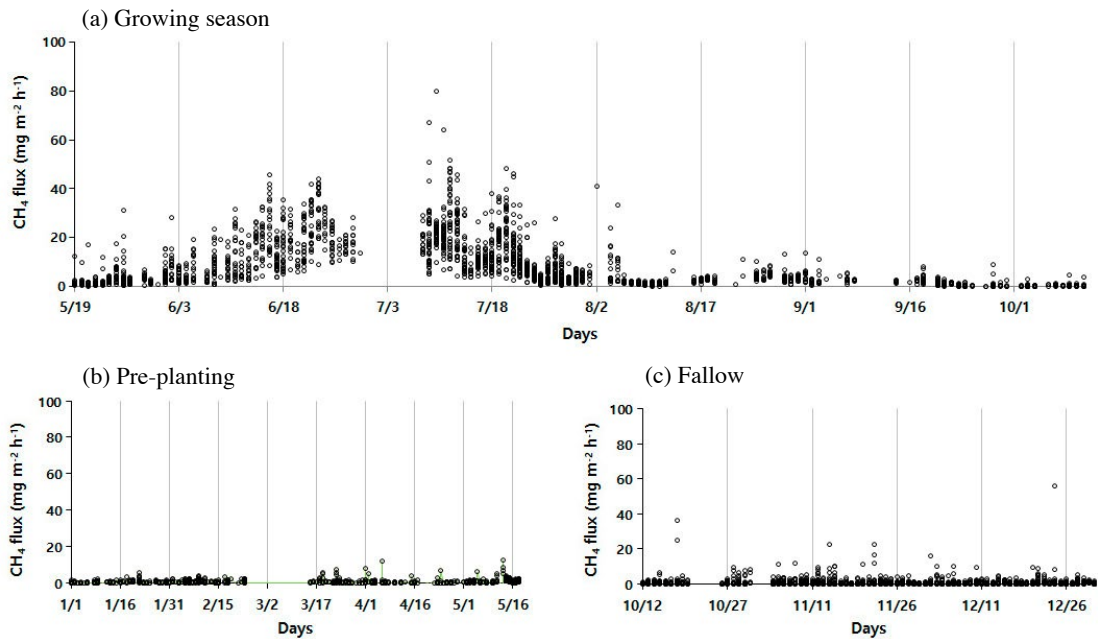


Fig. 7. The change in CH<sub>4</sub> flux by open-path: (a) growing season (5/19–10/11), (b) pre-planting (1/1–5/10), and (c) fallow (10/12–12/31).

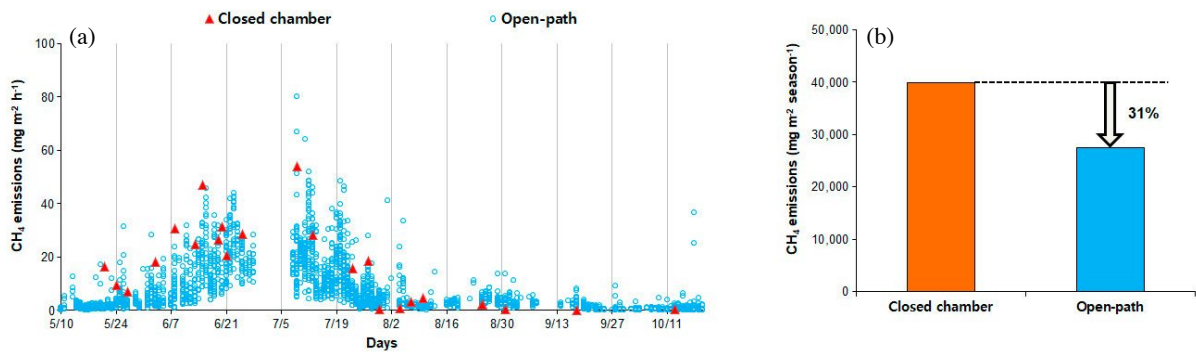


Fig. 8. Comparison of (a) CH<sub>4</sub> emission changes and (b) total emission by open-path and closed chamber method.

측정된 데이터를 비교하기에 문제가 없음을 의미한다.

Fig. 7은 open-path 방법을 이용해 측정한 raw 데이터를 여러 단계를 거쳐 필터링하여 얻어진 벼 이앙 전 (pre-planting), 재배 기간 (growing season), 수확 후 (fallow)의 메탄 플럭스 변화를 나타낸다. 벼 이앙 전까지 메탄은 거의 배출되지 않았고 (Fig. 7b), 메탄 배출량은 벼 이앙 후 지속적으로 증가하다 중간낙수 기간 (6월 27일~7월 14일)을 전후해서 감소하였다. 물을 관개한 이후 메탄 배출량은 다시 증가하였고 7월 20일 이후에는 메탄 배출량이 감소하였는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 논에 관개를 하지 못했기 때문인 것으로 판단된다 (Fig. 7a). 수확을 위해 논을 본격적으로 말리기 시작한 9월 13일 이후부터 수확 때까지 메탄 배출량

큰 증가 없이 낮은 배출량을 나타냈다 (Fig. 7c).

### 3. Open-path와 closed 챔버법 간 배출량 비교

Fig. 8은 재배 기간 동안 open-path와 closed 챔버법 간 시간별 메탄 배출량 변화 비교를 나타낸다. 두 방법 간 메탄 배출량 변화는 비슷한 경향을 보였고, 이를 메탄 총 배출량으로 환산한 결과는 closed 챔버 방법에 의한 배출량이 39,871 mg m<sup>-2</sup> season<sup>-1</sup>로 open-path 배출량 27,486 mg m<sup>-2</sup> season<sup>-1</sup>보다 약 31% 높았다. 이는 Meijide *et al.* (2011)도 open-path와 closed 챔버 간 비교에서 약 30%의 배출량 차이가 있다고 보고하였고, Chaichana *et al.* (2018)도 open-

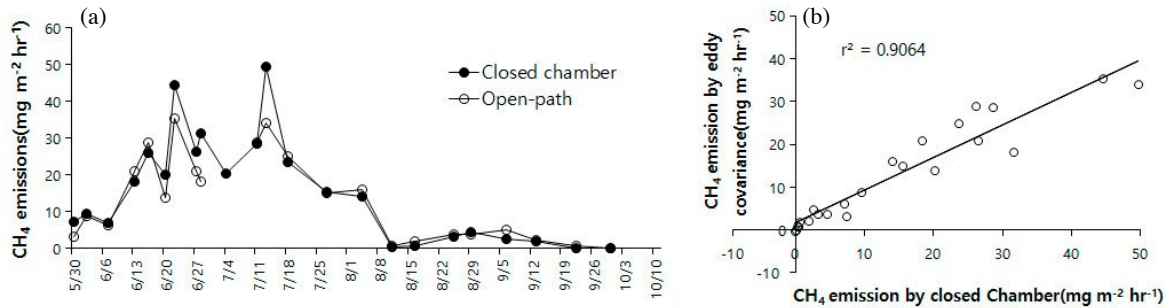


Fig. 9. Comparison of (a) CH<sub>4</sub> emission at sampling time (AM 11:00) by open-path and closed chamber method, and (b) correlation analysis.

path에 의한 에디공분산 방법을 농토양에 적용해 측정했을 경우 closed 챔버보다 배출량이 적다고 보고하였다. 이처럼 open-path에 의한 배출량이 적은 원인은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫째는 챔버법에 의한 배출량의 과다 측정이다. 챔버는 메탄 플럭스처럼 변동 폭이 큰 가스변화를 측정하기 어렵고 챔버 내 환경변화(높은 온도와 그에 따른 토양 미생물상과 작물 생육의 변화)는 메탄의 과다 측정을 유발할 수 있기 때문이다. 두 번째 원인은 open-path 측정방법에 의한 메탄 플럭스의 과소 측정이다. Open-path 측정방법은 에디공분산(eddy covariance)의 이론을 적용하여 가정하는데, 측정 지역의 작물의 균질성, 편평성을 가정하고 일정량의 난류가 있음을 가정하기 때문에 이러한 조건을 완벽히 충족하지 못할 경우 과소평가 될 수 있기 때문이다.

일반적으로 closed 챔버법을 이용한 시료 샘플링 및 분석은 하루 중 메탄 평균 배출 시간대인 오전 10시에서 12시 사이에 30분간의 농도 증가 값을 기준으로 하루 평균값(30분 × 48)을 산출한다. 따라서 closed 챔버법과 연속측정이 이루어지는 open-path 측정값의 정확한 비교를 위해 open-path 측정값 중 closed 챔버 샘플링 시간대 30분 농도값을 추출하여 직접 비교를 한 결과 두 방법 간 배출량은 고도로 유의한 상관( $r^2=0.9064$ )을 나타냈다(Fig. 9). 이는 평균 배출량 시간대의 값은 open-path와 챔버 간 큰 차이가 없으며, 난류 발생이 크지 않은 밤 시간대에 배출량 차이가 크기 때문인 것으로 사료된다.

## 결 론

벼재배 논에서 closed 챔버법과 open-path 방법을 이용해 메탄 플럭스를 측정하고 플럭스 변동은 비슷한 경향을 보였다. 특히 closed 챔버를 이용한 온실가스 측정 시간대의 값은 open-path 측정에 의한 값과 고도로 유의한 상관( $r^2=0.9064$ )을 보였다. 이는 open-path를 이용해 측정된 메

탄 배출량 모니터링의 가능성과 측정 시간대의 값을 이용한 총 배출량 산정에 유의미할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만 총배출량에 있어서 두 측정방법 간에 나타난 약 31%의 차이에 대한 정확한 원인 분석을 위해서 향후에도 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

Open-path 방법은 여러 여건 상 데이터의 손실을 감안하더라도 변동 폭이 큰 메탄 플럭스 변화를 모니터링을 할 수 있다는 장점을 갖고 있다고 할 수 있다. 따라서, 향후 closed 챔버법의 단점과 open-path 방법의 한계를 보완하면 좀 더 정확한 메탄 측정이 가능할 것으로 기대한다.

## 적 요

벼재배 논에서 온실가스 측정을 위해 사용되는 closed 챔버법은 시·공간적으로 변동 폭이 큰 메탄 플럭스를 측정하는 데는 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 메탄플럭스 측정에 있어 에디공분산을 기반으로 하는 open-path 방법과 closed 챔버법을 비교분석하였다.

벼 재배 기간 중 메탄 플럭스 변동은 두 방법 모두 비슷한 경향을 보였고 closed 챔버를 이용한 메탄 측정 시간대의 값은 open-path 측정에 의한 값과 고도로 유의한 상관을 보였다. 다만 총배출량에 있어서 두 측정 방법 간에 나타난 약 31%의 차이가 발생했는데 이는 closed 챔버법에 따른 과다 측정과 open-path에 의한 과소측정으로 생각해 볼 수 있다. 정확한 원인 분석을 위해서 향후에도 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ012489 01)의 지원에 의해 이루어진 것임



## REFERENCES

- Alberto MCR, R Wassmann, R Buresh, JR Quilty, TQ Correa, JM Sandro and CAR Conteno. 2014. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. *Field Crop Res.* 160:12–21.
- Baldocchi D, M Detto, O Sonnentag, J Verfaillie, YA Teh, W Silver and NM Kelly. 2012. The challenges of measuring methane fluxes and concentrations over a peatland pasture. *Agric. For. Meteorol.* 153:177–187.
- Chaichana N, SD Bellingrath-Kimura, S Komiya, Y Fuji, K Noborio, O Dietrich and T Pakoktom. 2018. Comparing of closed chamber and eddy covariance methods to improve the understanding of methane fluxes from rice paddy fields in Japan. *Atmosphere* 9:356–372.
- Chen ZL, DB Li, KS Shao and BJ Wang. 1993. Features of methane emission from rice paddy fields in Beijing and Nanjing. *Chemosphere* 26:239–248.
- Choi TJ, J Kim and JI Yun. 1999. On using the eddy covariance method to study the interaction between agro-forest ecosystems and the atmosphere. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 1:60–71.
- Christensen TR, S Jonasson, TV Callaghan and M Havstrom. 1995. Spatial variation in high-latitude methane flux along a transect across Siberian and European tundra environments. *J. Geophys. Res.* 100:21035–21045.
- Foken T, M Gockede, M Mauder, L Mahrt, B Amiro and W Munger. 2004. Post-field data quality control. pp. 181–208. In *Handbook of Micrometeorology*. Springer, Dordrecht.
- GIR. 2017. National greenhouse gas inventory report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Ministry of Environment.
- Ge HX, HS Zhange, XU Cai, Y Song and L Kang. 2018. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method. *Agric. For. Meteorol.* 249:228–238.
- Haslwanter A, A Hammerle and G Wohlfahrt. 2009. Open-path vs. closed-path eddy covariance measurements of the net ecosystem carbon dioxide and water vapour exchange: A long-term perspective. *Agric. For. Meteorol.* 149:291–302.
- Hadi K, K Inubushi and K Yagi. 2010. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia. *Paddy Water Environ.* 8:319–324.
- IAEA. 1992. Closed on measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-674.
- IPCC. 1996. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kamal JC and JJ Finnigan. 1994. Atmospheric boundary layer flow: their structure and measurement. p. 289. Oxford University Press.
- Kang NG, JY Yun, MSA Talucder, MK Moon, MS Kang, KM Shim and J Kim. 2015. Corrections on CH<sub>4</sub> fluxes measured in a rice paddy by eddy covariance method with an open-path wavelength modulation spectroscopy. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 17:15–24.
- Kim YU, MSA Talucder, MS Kang, SM Shim, NG Kang and J Kim. 2016. Interannual variations in methane emission from an irrigated rice paddy caused by rainfalls during the aeration period. *Agric. Ecosyst. Environ.* 223:67–75.
- McDermitt D, G Burda, L Xu, T Anderson, A Komissarov, B Riensche, J Schedlbauer, G Starr, D Zona, W Oechel, S Oberbauer and S Hastings. 2011. A new low-power open-path instrument for measuring methane flux by eddy covariance. *Appl. Phys. B-Lasers Opt.* 102:391–405.
- Minamikawa K and N Sakai. 2006. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field in Japan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 116:181–188.
- Miyata A, R Leuning, OT Denmead, J Kim and Y Harazono. 2000. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agric. For. Meteorol.* 102:287–303.
- Peyron M, C Bertora, S Pelisserri, D Said-Pullicino, L Celi, E Miniotti, M Romani and D Sacco. 2016. Greenhouse gas emissions as affected by different water management practices in temperate rice paddies. *Agric. Ecosyst. Environ.* 232:17–28.
- Song C, X Xu, H Tian and Y Wang. 2009. Ecosystem-atmosphere exchange of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O and ecosystem respiration in wetland in the Sanjiang plain, Northeastern China. *Glob. Change Biol.* 9:1–11.
- Stocker TF, D Qin, GK Plattner, MMB Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex and PM Midgley. 2014. *Climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge University Press.
- Tyagi L, B Kumari and SN Singh. 2010. Water management-A tool methane mitigation from irrigated paddy fields. *Sci. Total Environ.* 408:1085–1090.
- Wang JM, JG Murphy, JA Geddes, CL Winsborough, N Basliko and SC Thomas. 2013. Methane fluxes measured by eddy covariance and static chamber techniques at a temperate forest in central ontario Canada. *Biogeosciences* 10:4317–4382.
- Wassmann R, HU Neue, RS Latin, L Makarim, N Chareonsilp, LV Buendia and H Rennenberg. 2000. Characterization of

methane emissions from rice fields in Asia. II. Differences among irrigated, rainfed, and deepwater rice. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 58:13–22.

Zheng CT, JQ Huang, WL Ye, M Lv, JM Dang, TS Cao, C Chen and YD Wang. 2013. Demonstration of a portable near-infrared CH<sub>4</sub> detection sensor based on tunable diode

laser absorption spectroscopy. *Infrared Phys. Technol.* 61:306–312.

Received: 10 October 2018

First revised: 5 November 2018

Second revised: 14 November 2018

Revision accepted: 17 November 2018