



벼논에서 자동 챔버와 수동 챔버를 이용한 CH₄ 배출량 비교

정현철^{**} · 최은정^{*} · 이종식^{**} · 김건엽^{*} · 이선일^{*}

^{*}국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과 연구사, ^{**}국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과 연구관

Comparison of CH₄ Emission between Auto Chamber and Manual Chamber in the Rice Paddy

Jeong, Hyun Cheol^{*†}, Choi, Eun Jung^{*}, Lee, Jong Sik^{**}, Kim, Gun Yeob^{*} and Lee, Sun Il^{**}

^{*}Researcher, Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju-gun, 55365, Korea

^{**}Senior researcher, Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju-gun, 55365, Korea

ABSTRACT

The chamber method is widely used for measuring methane emission from paddy rice fields. The closed static chamber has advantages of easy installation and removal in the field and low manufacturing cost. However, the manual chamber method requires a lot of labor and has a limited sampling time and frequency. To overcome the disadvantages of the manual chamber, the auto-chamber system is used for measuring methane emission. We compared the differences in methane flux between the auto-chamber and manual chamber. To investigate methane emissions by the two methods, a chamber was installed for each of the following treatments : control without rice straw (NA), spring plowing after autumn rice straw application (SPRA) and autumn plowing after autumn rice straw application (APRA). The total methane emission was lowest in the control and highest in APRA with both methods. There was no significant difference in total methane emission between the methods, but dynamic fluctuation in methane with temperature change was accurately measured in the auto-chamber. Measuring methane emission with an auto-chamber system is expected to reduce uncertainty and increase accuracy, accompanied by labor reduction.

Key words: Greenhouse gases, Methane, Chamber, Paddy rice

1. 서 론

농업분야에서 배출되는 주요 온실가스 (CH₄, N₂O, CO₂) 중 하나인 메탄은 벼 재배과정과 가축 장내발효 과정을 통해 주로 배출되고 작물잔사를 소각하는 과정에서도 발생한다 (IPCC, 2006). 메탄은 지구온난화에 대한 기여도가 이산화탄소 다음으로 높고 배출량 또한 산업혁명 이후 지속적으로 증가하고 있다 (IPCC, 2007).

기후변화협약 (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)에 따라 우리나라는 현재

1996 IPCC 가이드라인에 준해 산업부문별 (에너지, 산업공정, 농업, LULUCF, 폐기물) 온실가스 배출량을 매년 산정하고 있다. 2017년에 산정한 2015년 농업분야 비에너지 온실가스 총배출량은 21 백만톤 CO₂-eq. (우리나라 온실가스 총 배출량의 약 3%)으로 이중 31%인 6 백만톤 CO₂-eq.이 벼를 재배하는 과정에서 배출됐다 (GIR, 2017).

농경지에서 배출되는 온실가스 측정을 위해서는 일반적으로 챔버법 (closed static chamber)을 가장 많이 사용하는데, 국내 연구에서도 챔버를 이용하여 벼논에서 배출되는 온실가스 포집·분석하고 있다 (Ko et al., 2002; Lee et al., 1999;

[†]Corresponding author: taiji152@korea.kr (T. + [redacted] National Institute of Agricultural Sciences, Wanju-gun, 55365, Korea)

Received November 7, 2018 / Revised November 19, 2018 / Accepted November 30, 2018

Shin et al., 1995). IAEA (1992)는 측정환경과 대상에 따라 챔버의 규격, 재질, 샘플링 및 분석 방법 등을 자세하게 제시하고 있다. 이러한 챔버법은 농업 현장에서 가스포집이 용이하고 저비용으로 쉽게 설치, 제거가 가능하다는 장점이 있다 (Christensen et al., 1995). 그러나 챔버를 이용해 온실가스를 포집할 경우 시료 채취 시간, 분석 횟수 등 시공간적 제약과 함께 많은 노동력이 요구된다 (Christensen et al., 1995; Wassmann et al., 2000; Song et al., 2009). 또한 포집된 온실가스가 가스크로마토그래피에 의해 정량분석 될 때, 분석자에 따라 분석값에 대한 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다 (Levy et al., 2011). 따라서 IPCC (1996)는 농업현장에서 챔버를 이용해 온실가스를 측정할 경우 온실가스 측정 시 발생하는 오차에 대한 불확도를 줄이고 정확도를 높이기 위해 측정 횟수, 측정 시간 등 상세한 가이드라인을 제시하고 있고, 이보다 더 정확한 측정을 위해 연속측정 (continuous measurement) 이나 직접측정 (direct measurement)을 권고하고 있다. 최근에는 에디공분산 (eddy covariance) 방법을 이용해 온실가스를 연속으로 측정할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있으나 이러한 방법을 적용하기 위해서는 고가의 장비가 필요하기 때문에 설치 비용의 부담이 크고 넓은 지역 (벼의 경우 최소 300 m 이상의 반경)을 대상으로만 측정이 가능하다는 한계 (Haslwanter et al., 2009; Wang et al., 2013; Alberto et al., 2014)가 있어 농업현장에 적용하기는 현실적으로 어렵다. 따라서 일부 선진국에서는 auto 챔버를 이용한 온실가스 자동분석 시스템을 자체적으로 개발해 불확도를 줄이고 정확도를 높이는 연구를 활발히 진행 중에 있다. 국립농업과학원에서도 기존 manual 챔버법과 동일한 규격의 챔버를 사용하면서 온실가스 포집부터 분석이 자동화로 가능한 온실가스 자동측정시스템을 개발하였다. 온실가스 자동측정시스템은 여러 챔버 (multi auto chamber)에서 동시에 시료 채취가 가능하기 때문에 챔버 간, 처리 간 시간에 따른 오차를 줄일 수 있고, 측정횟수의 조정이 가능하기 때문에 온실가스 측정 시 발생하는 불확도를 줄이고 정확도를 높일 수 있다는 장점이 있다.

본 연구는 국립농업과학원에서 개발한 농경지 온실가스 자동측정시스템을 이용해 벼논에서 배출되는 메탄을 측정하고 기존 manual 챔버법과의 배출량 차이를 비교분석 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험포장 및 시험구 처리

연구지역은 전북 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 내 벼 시험포장 (위도 35.82°, 경도 127.04°)으로 시험연구는 2016년과 2018년에 각각 수행하였다. 시험에 사용된 토양은 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 37.4%, 40.4, 22.0인 양토 (loam)로 물빠짐은 양호한 편이다. Table 1은 시험 전 토양의 이화학적 특성을 나타낸다. 2016년 시험 전 토양의 pH는 6.7, 유기물 함량은 11 g C kg⁻¹이었고, 2018년 시험 전 토양의 pH는 6.2, 유기물 함량 (OM)은 12.5 g C kg⁻¹이었다. 시험구 처리는 ① 유기물 (벼짚)을 사용하지 않는 처리 (control without rice straw, NA), ② 수확 후 벼짚을 남겨 둔 후 다음 해 봄에 경운한 처리 (Spring Plowing after Rice straw Autumn application SPRA), ③ 수확 후 벼짚을 남겨 둔 후 그해 가을에 경운한 처리 (Autumn Plowing after Rice straw Autumn application, APRA)로 하였고, 물관리는 재배기간 동안 상시 담수 상태를 유지하였다.

Table 1. Chemical properties of soil before experiment

| Year | pH | EC | OM | Ex. Cation | | |
|------|-------------------------|--------------------|--------------------|------------|------------------------------------|------|
| | | | | K | Ca | Mg |
| Unit | (1:5, H ₂ O) | dS m ⁻¹ | g kg ⁻¹ | ---- | cmol _c kg ⁻¹ | ---- |
| 2016 | 6.7 | 0.3 | 11 | 0.4 | 5.1 | 2.2 |
| 2018 | 6.2 | 0.7 | 12.5 | 0.6 | 5.0 | 1.2 |

2.2 작물재배

시험에 사용된 벼 품종은 신동진 (*Oryza sativa L.*)으로 어린모를 손 이앙 (2016년 5월 25일, 2018년 5월 29일)하고 화학비료는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (NAAS, 2010)에 따라 질소 (N), 인산 (P₂O₅), 칼리 (K₂O)를 각각 90, 45, 57 kg ha⁻¹씩 시비하였다. 봄 경운은 2016년에는 4월 30일, 2018년에는 4월 26일에 각각 실시하였다. 벼 재배일수는 2016년 140일, 2018년 138일 이었다. 연도별 벼 재배이력 (이앙, 수확, 물 관리 등)은 Table 2와 같다.

2.3 농경지 온실가스 자동측정시스템 구성

Fig. 1은 이번 연구에서 사용된 온실가스 포집 챔버 (Fig. 1a)와 자동측정시스템의 구성도 (Fig. 1b)를 나타낸다. 온실가

Table 2. Schedule of rice cultivation

| Year | Irrigation | Fertilizer application | Planting | Autumn plowing | Spring plowing | Harvest |
|------|------------|------------------------|----------|----------------|----------------|---------|
| 2016 | 23 May | 23 May | 25 May | Mid Nov 2015 | 30 Apr. | 14 Oct |
| 2018 | 24 May | 24 May | 29 May | Mid Nov 2017 | 26 Apr. | 16 Oct |

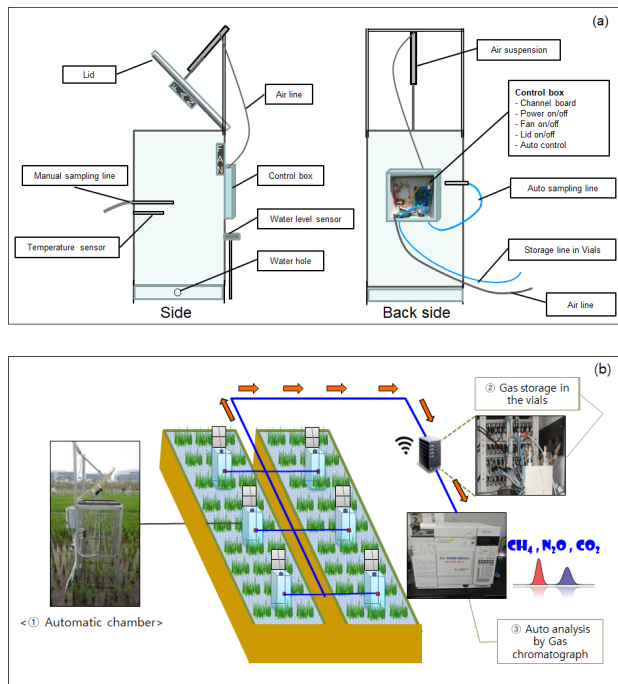


Fig. 1. Auto-chamber diagram (a) and configuration of auto-chamber system (b) installed in paddy fields.

스 자동측정시스템은 크게 auto-chamber, main control board, gas chromatography (detector-FID)로 구성되어 있다. Auto-chamber는 manual 방법과 겸용으로 사용이 가능하며, 가로, 세로, 높이가 각각 60 × 60 × 140 cm로 재질은 빛 투과율이 높은 아크릴을 사용하였다. 챔버 상단의 뚜껑은 수동과 자동으로 개폐가 가능하도록 에어 서스펜션 (air suspension)을 부착하였고, 하단에는 담수상태에서 논물이 챔버 안쪽과 바깥 쪽으로 드나들 수 있도록 직경 5 cm의 홀을 양쪽에 1개씩 가공하였다. 챔버 측면에는 온실가스를 수동방식으로 주사기 (syringe)를 이용해 가스 포집이 가능하도록 스테인레스 재질의 관을 설치하였고, 반대쪽에는 자동으로 가스 시료 샘플링이 가능하도록 같은 재질의 관을 설치하였다. 또한 챔버 내 온도변화 측정을 위해 온도센서를 설치하고 상단 뚜껑과 측면에는 공기순환을 위한 fan을 설치하였다. 챔버 뒤쪽에는 컨

트롤 박스가 설치되어 있고 박스 내에는 채널보드 (channel board)를 설치하여, 가스시료 샘플링, 뚜껑 개폐, 온도 측정, 팬 가동 등 자동으로 제어가 가능하도록 하였다. 각각의 챔버는 가스 샘플링라인, 에어라인 및 데이터 전송 라인이 main control board로 연결되어 있어 여러 챔버에서 동시에 메탄 시료 샘플링이 가능하다. 각 챔버에서 샘플링 된 시료 (초기 농도 값, 30분 후 농도값)는 main board 뒤쪽에 설치된 유리 재질의 50 ml vial에 보관되고 포집된 가스시료는 gas chromatography (7890A, Agilent, USA)를 이용해 순차적으로 분석되도록 시스템을 설계하였다.

2.4 메탄 시료 샘플링

Manual 챔버를 이용한 온실가스 시료 샘플링은 벼 이앙 후 주 1회 씩, auto 챔버를 이용한 온실가스 시료 샘플링은 주 2 ~ 3회씩 같은 장소에서 실시하였고 manual 방법과 auto 방법 같은 챔버를 사용하였기 때문에 샘플링 날짜는 달랐다. Manual 챔버 방식의 경우 챔버에서 직접 수동으로 시료를 샘플링 하였다. 2018년의 경우 수확 한 달 전 물을 말린 후부터 수확 전까지 매일 1회 자동 분석을 실시하였다. 또한 온실가스의 일변화 배출 패턴을 조사하여 하루 평균 샘플링을 찾기 위해 2시간 간격 (12회)으로 24시간 동안의 메탄 일변화량을 측정하였다. 이러한 결과를 바탕으로 메탄 샘플링 시간은 오전 10시 ~ 12시 사이로 하였다. 온실가스 시료는 뚜껑을 열어둔 상태에서 60 ml 주사기를 이용해 초기 시료를 샘플링하고 뚜껑을 닫아 밀폐한 후 챔버 내 온도와 부피를 측정하였다. 챔버 내 공기의 순환을 위해 밀폐된 시간 동안 fan을 가동하였고, 30분 후에 60 ml 주사기를 이용해 후기 시료를 샘플링하고 하고 뚜껑을 열어 다음 샘플링 때까지 열린 상태로 유지하였다.

2.5 메탄분석

60 ml 주사기에 포집된 메탄 시료는 가스크로마토그래피를 이용해 정량분석을 하였다. 메탄 배출량 계산 방법은 식 1, 2와 같다.

$$F = \rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \text{ ----- (eq. 1)}$$

$F = \text{CH}_4 \text{ flux (mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)}$
 $\rho = \text{gas density (mg m}^{-3}\text{)}$
 $V = \text{volume of chamber (m}^3\text{)}$
 $A = \text{surface area of chamber (m}^2\text{)}$
 $\Delta c/\Delta t = \text{rate of increase of gas concentration (mg m}^{-3} \text{ h}^{-1}\text{)}$
 $T = \text{absolute temperature (273+mean temperature in chamber) (}^\circ\text{C)}$

$$\text{Total CH}_4 \text{ flux} = \sum_i^n (F_i \times D_i) \text{ ----- (eq. 2)}$$

$F_i = \text{the rate of flux (g m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{) in the } i^{\text{th}} \text{ sampling interval}$
 $D_i = \text{the number of days in the } i^{\text{th}} \text{ sampling interval}$
 $n = \text{the number of sampling intervals}$

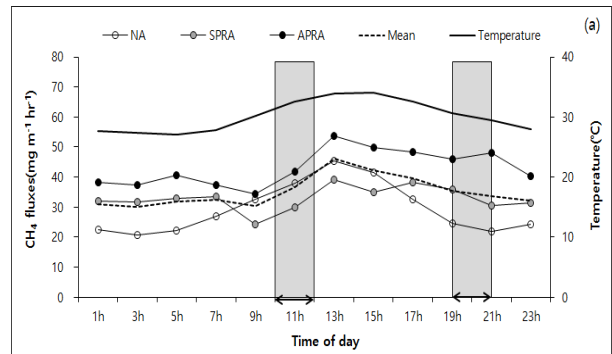
2.6 통계분석 방법

처리간 차이는 Excel XLSTA를 이용해 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test (DMRT)를 하였다.

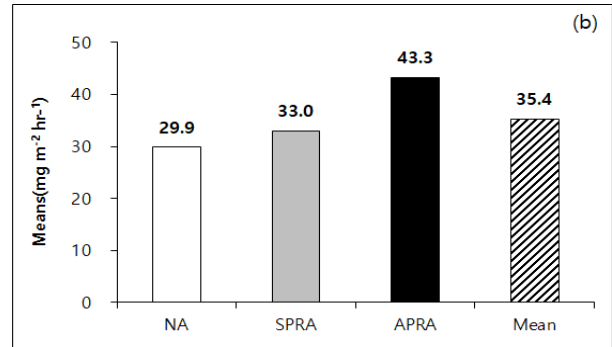
3. 결과 및 고찰

3.1 일중 메탄 배출량 변화

1996 IPCC 가이드라인은 챔버를 이용한 논토양 메탄 배출량 측정 시 일 중 메탄 배출량 변화를 고려하여 샘플링 시간을 정하도록 권고하고 있다 (IPCC, 1996). 챔버법의 경우 하루 중 일정 시간 (30분) 동안의 가스 농도 변화를 측정 후 일 배출량으로 환산하기 때문에 샘플링 시간은 매우 중요하다. 특히 오전에 해가 뜨고 대기 중 온도가 높아지기 시작하면서 메탄 배출량 또한 증가하기 때문에 평균 배출을 벗어나 샘플링을 할 경우 과다 또는 과소 산정될 수 있다. Fig. 2는 24시간 동안 2시간 간격으로 측정한 처리별 하루 중 메탄 배출량 변화 (fig. 2a)와 평균 배출량 (fig. 2b)을 나타낸다. 일 메탄 배출량 변화는 처리 별 약간씩 차이는 있었으나 대부분 하루 중 온도 변화 패턴과 비슷한 양상을 보였다. 오전에 해가 뜨고 온도가 높아지면서 메탄 배출량 또한 증가하기 시작해서 오후 1시에 최대 배출량을 보였고 그 이후에는 온도 감소와 함께 배출량 또한 감소하는 것으로 나타났다. Centeno et al., (2017)은 벼논에서 연중 메탄 배출량을 벼 이앙 전, 작기 중, 이앙 후로 나누어 배출량을 측정하고 시기별 일 배출



(a) Diurnal patterns of methane fluxes and temperature



(b) Average daily methane emissions

Fig. 2. Changes of methane fluxes and temperature during 24 hour and average daily methane emissions.

량을 측정할 결과 작기 중 메탄 배출량 변화폭이 가장 컸고 특히 일 배출량의 경우 오후 14시 경 가장 높은 피크를 보였다고 한 바 있다. Yagi and Minami (1990)도 일중 메탄 배출량 변화는 토양 온도와 높은 상관성이 있고 빛 및 처리나 물 관리 방법에 따라 배출 패턴의 차이가 있다고 한바 있다. 이번 결과에서도 메탄 배출량 변화 패턴 또한 비슷한 결과를 보였다. 일 메탄 평균 배출량은 NA 처리에서 29.9 mg m⁻² hr⁻¹, SPRA에서 33.0, APRA에서 43.3 순으로 높았고, 평균 배출량은 35.4였다. 평균 배출량을 기준으로 평균 메탄 배출 시간대는 오전 10시~12시, 오후 7시~9시 사이인 것으로 나타났다. Alberto et al., (2014)은 벼재배 논에서의 일 메탄 배출량은 온도와 높은 양의 상관성이 있다고 하였고, 배출 평균 시간 또한 10시에서 12시 사이로 언급한 바 있다.

3.2 auto 챔버법과 manual 챔버법에 의한 메탄 배출량 비교

Fig. 3은 2016년에 auto 챔버와 manual 챔버를 이용한 처

리별 메탄 배출량 변화와 온도 및 강수량 변화를 나타낸다. 벼 재배기간 동안 시료 샘플링 (측정) 횟수는 auto 챔버의 경우 48회, manual 챔버의 경우 22회 실시하여 auto 챔버에서 약 2배 이상 측정을 많이 하였다. 측정횟수가 많아짐에 따라 온도변화에 많은 영향을 받는 메탄 배출량의 변화를 좀 더 정확하게 측정할 수 있었다. 벼 재배 논에서의 메탄 배출량은 일반적으로 이앙 후 배출량이 급격히 증가하는데 이는 벼가 부피 성장을 하고 온도 상승에 따른 토양 내 메탄생성균 (*methanogenesis*)의 활동이 활발해 지기 때문이다 (Holzapfel et al., 1985). 특히 비가 오거나 온도가 낮아질 경우에는 배출량 또한 감소하는 경향을 나타내는데 2016년 연구결과에서도 manual 챔버법보다 auto 챔버법을 이용한 측정에서 배출량 변화를 더 세밀하게 관측할 수 있었다. 특히 온도가 낮았던 이앙 후 21, 30, 54, 72, 91, 96, 118, 126일에서 (fig. 3c)에 배출량이 낮아짐 (Fig. 3a)을 관측할 수 있었는데 이는 측정횟수와 측정시기가 변동성이 큰 메탄 배출량을 측정하는데 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

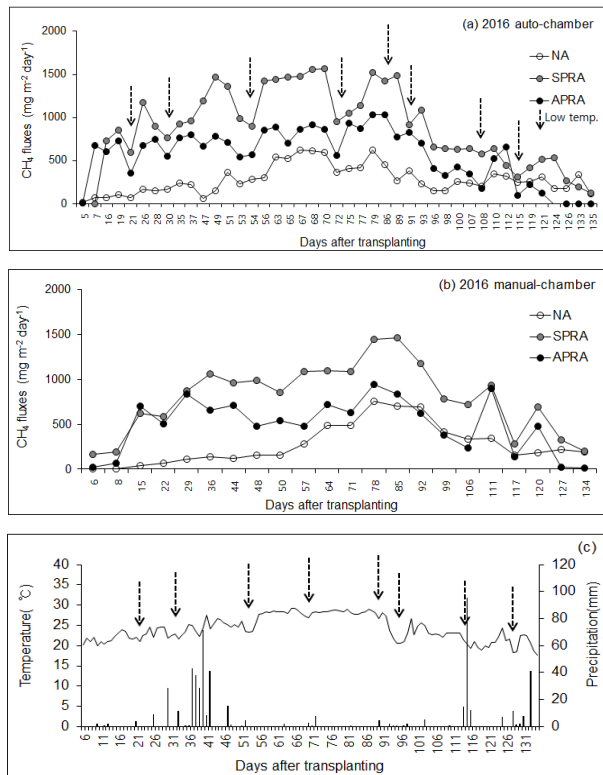


Fig. 3. Changes of methane fluxes measured by auto-chamber (a) and manual-chamber (b) and temperature and precipitation (c) during rice cultivation, 2016.

Fig. 4는 2018년에 auto 챔버와 manual 챔버를 이용한 처리별 메탄 배출량 변화와 온도 및 강수량 변화를 나타낸다. 벼 재배기간 동안 시료 샘플링 (측정) 횟수는 auto 챔버의 경우 66회, manual 챔버의 경우 25회 실시하여 auto 챔버에서 약 2.6배 이상 측정을 많이 하였다. 2016년 auto 챔버 보다 배출량 측정횟수가 많았던 이유는 수확 한 달 전 물을 댄 이후 매일 측정을 했기 때문이다. 배출량 측정 결과 2016년과 마찬가지로 auto 챔버법에 의해 측정된 메탄 배출량은 이앙 후 13, 24, 29, 33, 44, 81, 89일에서 온도 변화에 따른 배출량 변화를 잘 반영하였다. 수확 한 달 전 물을 댄 직후 이후 토양의 화학적 변화 및 미생물 활성에 의해 메탄 배출량이 급격히 증가함을 알 수 있었고 (Iwata et al., 2018, Watanabe et al., 1993) 이러한 배출량 또한 측정횟수가 많았던 auto 챔버법에서 세밀하게 관측되었다.

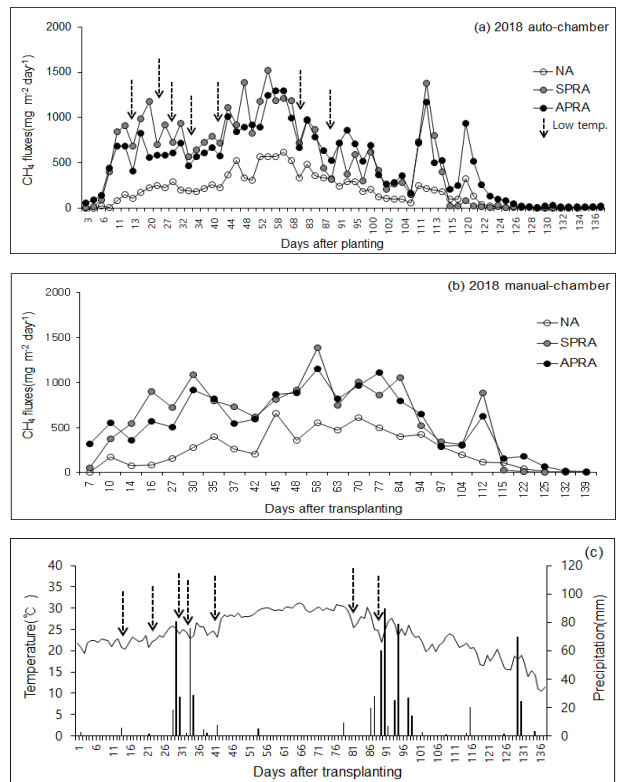


Fig. 4. Changes of methane fluxes measured by auto-chamber (a) and manual-chamber (b) and temperature and precipitation (c) during rice cultivation, 2018.

Fig. 5는 연도별 처리에 따른 auto 챔버와 manual 챔버 간 메탄 배출량 상관을 나타낸다. 각 처리별 auto 챔버에 의한

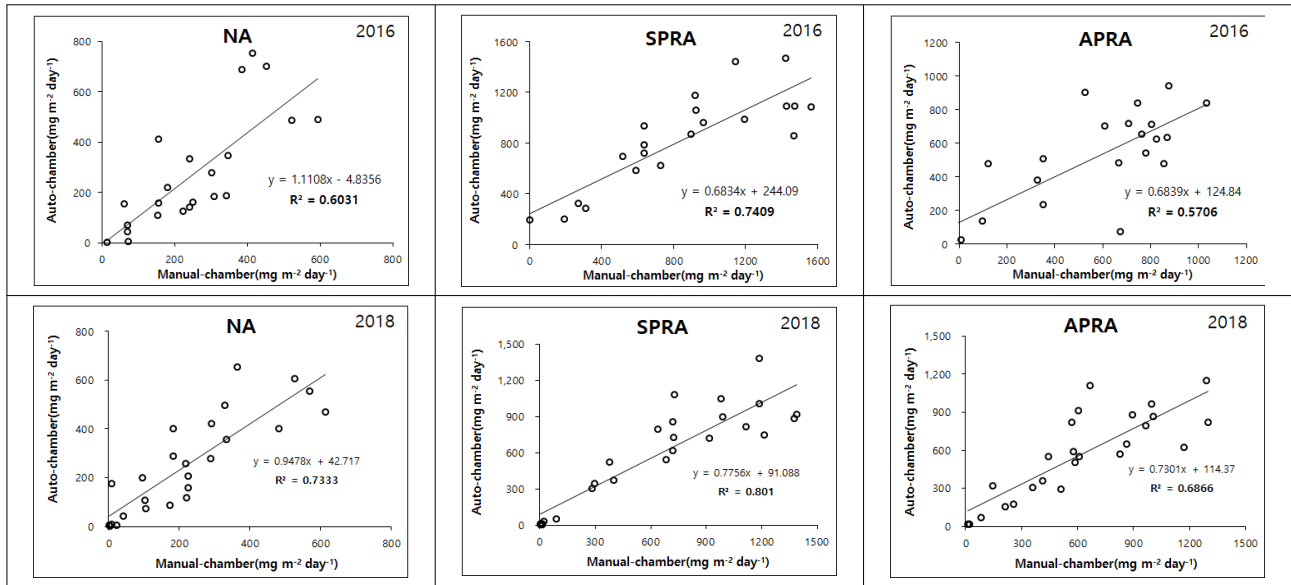


Fig. 5. Comparison of CH₄ emissions between the auto-chamber (a) and manual-chamber (b) in 2016 and 2018.

일 메탄 배출량은 manual 챔버와 모두 유의한 정의 상관을 보였다. Yu et al., (2013)의 auto 챔버와 manual 챔버 간 메탄 배출량을 비교한 연구에서도 두 방법 간 고도로 유의한 정의 상관 ($R^2=0.85$)을 갖는다고 한바 있다.

로 유의한 차이는 보이지 않았는데 이는 강우 등 기상조건과 토양 조건에 영향을 받은 것으로 사료된다. 벼논에서의 벼짚 시용은 메탄 배출에 유의적인 상관성이 있으며, 경운 시기 (방법)에 따라 배출량의 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 총 메탄 배출량 변화

Fig. 6은 2016년과 2018년에 auto 챔버법과 manual 챔버법을 이용한 처리별 메탄 총배출량 변화를 나타낸다. 처리 간 총 메탄 배출량은 2016년과 2018년 모두 벼짚을 사용하지 않은 NA 처리에서 가장 낮았고, 벼짚을 가을에 시용한 후 봄에 경운을 한 SPRA 처리에서 가장 높았다. 벼짚을 시용한 처리구에서 메탄 배출량이 높은 이유는 가을에 시용한 벼짚 (유기물)이 이양 후 담수조건에서 메탄생성균에 의해 메탄으로 분해되면서 배출량이 많았기 때문인 것으로 사료된다. 논에서의 메탄 배출은 벼 재배기간 중 물 관리와 유기물 시용에 가장 큰 영향을 받는데, 특히 유기물 시용은 메탄 배출의 가장 큰 요인이다 (Hadi et al.,2000). Yagi and Minami (1990)도 벼논 유기물 시용은 메탄 발생을 증가시킨다고 하였고, Watanabe et al., (1993)도 유기물 시용은 메탄생성균의 활성을 높여 메탄 배출량의 증가를 가져온다고 한바 있다. 2016년의 경우 가을에 벼짚을 시용한 후 봄에 경운한 처리보다 가을에 경운한 처리에서 배출량이 적었는데 이는 겨울철 동안 경운에 의해 유기물질의 분해가 일어났기 때문이다 (Ko and Kang, 2000). 반면 2018년의 경우에는 두 처리 간 통계적으

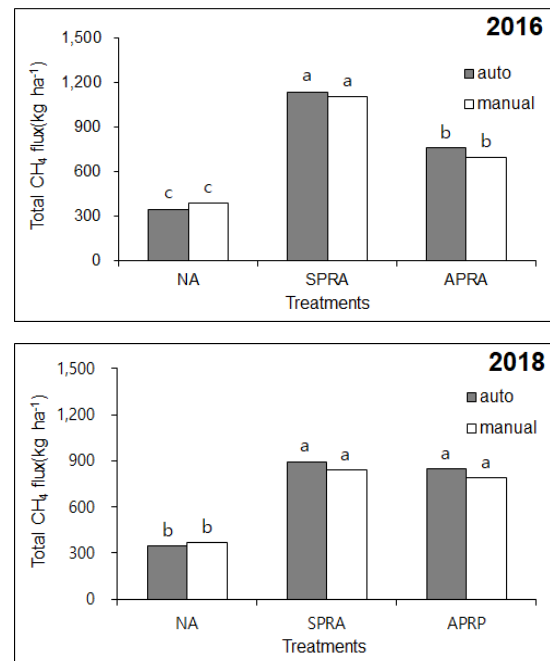


Fig. 6. Comparison of total methane fluxes in 2016 and 2018.

4. 결론 및 고찰

논에서 배출되는 메탄을 측정하기 위해 사용되는 챔버법 (closed chamber method)은 온실가스 포집-분석을 위해 가장 많이 사용되는 방법 중 하나이다. 이러한 챔버법은 농업 현장에서 저렴한 비용으로 가스포집이 가능하고 쉽게 설치, 제거가 가능하다는 장점이 있는 반면, 시료 채취 시간, 분석 횟수 등 시공간적 제약과 함께 많은 노동력을 요구한다. 또한 온실가스 샘플링 시 현장에서 연구자가 여러 챔버에서 수동으로 시료를 포집하고 가스크로마토그래피로 분석하는 과정에서 발생하는 오차 또한 불확도 증가의 원인이 될 수 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

벼논에서 챔버를 이용해 메탄 시료를 샘플링 할 경우 무엇보다도 우선 시 되어야 할 것은 하루 중 메탄 평균 시간을 정확히 측정해 시료 채취 시간을 정해야 한다. 특히 하루 중 일정시간 (30분) 동안의 메탄 배출량을 정량 분석하고 그 값을 하루 총배출량으로 환산하기 때문에 온도에 따른 배출량 변동성이 큰 메탄을 분석할 때는 반드시 시료 채취 시간 (오전 10시~12시)이 고려되어야 한다.

이번 연구에서 사용된 auto 챔버는 측정횟수를 늘려 측정이 가능하고 동시에 여러 챔버에서 동시에 샘플링을 하고 자동으로 정량분석을 할 수 있어 manual 챔버를 이용한 분석 시 발생하는 많은 오차들을 줄일 수 있었다. Auto 챔버법에 의한 메탄 배출량과 manual 챔버법에 의한 메탄 배출량을 비교한 결과 두 방법 간 통계적으로 유의적인 차이는 없었으나 측정 횟수가 많았던 auto 챔버는 온도 변화에 영향을 받는 메탄 배출량 변화를 좀 더 세밀하게 관측이 가능하였다. 특히 측정횟수의 증가는 메탄 샘플링을 하지 않았던 날들의 배출량 측정이 가능하기 때문에 벼 재배 논에서 배출되는 메탄 같이 변동 (fluxuation)이 큰 가스를 포집하여 분석하는데 효과가 있었다. Auto 챔버와 manual 챔버를 이용해 온실가스 총 배출량을 산정할 때는 두 방법 유의적인 차이가 없어 사용에는 문제가 없을 수 있지만 배출량 변화에 대한 패턴과 요인에 의한 민감도 분석 등을 위해서는 auto 챔버법이 좀 더 유용할 것으로 생각된다. 또한 토양 특성, 유기물 투입 유무, 물관리 방법 등 감측 기술을 적용했을 때 비교 또한 auto 챔버가 유용할 것으로 사료된다.

Auto 챔버를 이용한 온실가스 자동측정방법은 기존의 manual 챔버법과 온실가스 포집-분석 방법은 동일하면서 전 과정이 자동으로 이루어지기 때문에 측정에 대한 정확도를 높이고 불확도를 줄일 수 있는 방법으로 활용이 클 것으로 기대된다. 또한, 온실가스자동측정시스템은 여러 챔버에서 동

시에 시료 채취가 가능하기 때문에 챔버 간, 처리 간 시간에 따른 배출량 차이를 줄일 수 있다는 장점과 함께 노동력 투입 없이 메탄 분석이 가능하다는 장점이 있다. 특히 자동측정방법은 여건만 주어진다면 매일 측정이 가능하기 때문에 IPCC에서 권고하는 연속측정과 같은 측정법으로도 활용이 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (PJ01185501) 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Alberto MCR, Wassmann R, Buresh R, Quilty JR, Correa TQ, Sandro JM, Conteno CAR. 2014. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. *Field Crop Research*. 160:12-21.
- Centeno CAR, Alberto MCR, Wassmann R, Sander BO. 2017. Assessing diel variation of CH₄ flux from rice paddies through temperature patterns. *Atmospheric Environment*. 167:23-39.
- Christensen TR, Jonasson S, Callaghan TV, Havstrom M. 1995. Spatial variation in high-latitude methane flux along a transect across Siberian and European tundra environments. *J. Geophys. Res.* 100:21035-21045.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2017. National greenhouse gas inventory report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Ministry of Environment.
- Haslwanter A, Hammerle A, Wohlfahrt G. 2009. Open-path vs. closed-path eddy covariance measurements of the net ecosystem carbon dioxide and water vapour exchange: A long-term perspective. *Agri. and Forest Meteo.* 149:291-302.
- Hadi K, Inubushi K, Yagi K. 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.
- Holzappel pschorn A, Conrad R, Seiler W. 1985. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. 92:223-233

- IAEA. 1992. Manual on measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture. IAEA-TECDOC-674.
- IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- IPCC. 2007. In: Metz B, Davidson OR, Bosh PR, Dave R, Meyer LA. (Eds.), Climate change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of the working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom.
- Iwata H, Mano M, Ono K, Tokida T, Kawazoe T, Kosugi Y, Sakabe A, Takahashi K, Miyata A. 2018. Exploring sub-daily to seasonal variations in methane exchange in a single crop rice paddy in central Japan. *Atmosphere Environment*. 179:156-165.
- Ko JY, Kang HW. 2000. The effects of cultural practices on methane emission from rice fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 58:311-314.
- Ko JY, Lee JS, Kim MT, Kang HW, Kang UG, Lee DC, Shin YG, Kim KY, Lee KB. 2002. Effects of cultural practices on methane emission in tillage and no-tillage practice from rice paddy fields. *Korean J. Soil Sci & Fert.* 35 (4):216-222.
- Lee KB, Lee DB, Lee SB, Kim JG, Kim YW. 1999. Methane emission among rice ecotypes in Korean paddy soil. *Korean J. of Environmental agriculture*. 18 (1):1-5.
- Levy PE, Gray A, Leeson SR, Gaiawyn J, Kelly MPC, Cooper MDA, Dinsmore KJ, Jones SK, Sheppard LJ. 2011. *European J. of Soil Science*. 62:811-821.
- Miyata A, Leuning R, Denmead OT, Kim J, Harazono Y. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agr. Forest Meteorol.* 102:287-303.
- Shin YK, Lee YS, Yun SH, Park ME. 1995. A simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soils. *Korean J. Soil Sci & Fert.* 28 (2):183-190.
- Song C, Xu X, Tian H, and Wang Y. 2009. Ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and ecosystem respiration in wetland in the Sanjiang plain, Northeastern China. *Global Change Biol.* 9:1-11.
- Wang JM, Murphy JG, Geddes JA, Winsborough CL, Basiliko N, Thomas SC. 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, Neue HU, Latin RS, Makarim L, Chareonsilp N, Buendia LV, Rennenberg H. 2000. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. II. Differences among irrigated, rainfed, and deepwater rice. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 58:13-22.
- Watanabe A, Katoh K, Kimura M. 1993. Effects of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*. 39 (4):707-712.
- Yagi K, Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*. 36 (4):599-610.
- Yu L, Wang H, Wang G, Song W, Huang Y, Li SH, Liang N, Tang Y, He JS. 2013. A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland. *Environmental Pollution*. 181:81-90.