

## 벼는 메탄 플럭스 측정용 폐쇄형 정적 챔버법: 고찰

주옥정<sup>1,2</sup> · 강남구<sup>3,4\*</sup> · 임갑준<sup>1</sup>

<sup>1</sup>경기도농업기술원 환경농업연구과, <sup>2</sup>서울대학교 협동과정 농림기상학전공, <sup>3</sup>한국표준과학연구원  
첨단측정장비연구소 장비인프라팀, <sup>4</sup>과학기술연합대학원대학교 오딧세이교육프로그램  
(2020년 4월 2일 접수; 2020년 5월 15일 수정; 2020년 5월 25일 수락)

## Closed Static Chamber Methods for Measurement of Methane Fluxes from a Rice Paddy: A Review

Okjung Ju<sup>1,2</sup>, Namgoo Kang<sup>3,4\*</sup>, Gapjune Lim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Environmental Agriculture Research Division, Gyeonggido Agricultural Research and Extension Services

<sup>2</sup>Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University

<sup>3</sup>Instrumentation Infrastructure Team, Advanced Measurement Instrumentation Institute,  
Korea Research Institute of Standards and Science

<sup>4</sup>Odyssey Education Program, University of Science and Technology

(Received April 2, 2020; Revised May 15, 2020; Accepted May 25, 2020)

### ABSTRACT

Accurate assessment of greenhouse gas emissions is a cornerstone of every climate change response study, and reliable assessment of greenhouse gas emission data is being used as a practical basis for the entire climate change prediction and modeling studies. Essential, fundamental technologies for estimating greenhouse gas emissions include an on-site monitoring technology, an evaluation methodology of uncertainty in emission factors, and a verification technology for reductions. The closed chamber method is being commonly used to measure gas fluxes between soil-vegetation and atmosphere. This method has the advantages of being simple, easily available and economical. This study presented the technical bases of the closed chamber method for measuring methane fluxes from a rice paddy. The methane fluxes from rice paddies occupy the largest portion of a single source of greenhouse gas in the agricultural field. We reviewed the international and the domestic studies on automated chamber monitoring systems that have been developed from manually operated chambers. Based on this review, we discussed scientific concerns on chamber methods with a particular focus on quality control for improving measurement reliability of field data.

**Key words:** Methane flux, Rice paddy, Closed static chamber method, Fully automated chamber system



\* Corresponding Author : Namgoo Kang  
(nkang@kriss.re.kr)

## I. 서 론

기후변화의 인위적인 요인 혹은 유의한 상관관계를 가진다고 추정되는 온실가스 배출량의 정확한 평가는 모든 기후변화 대응 연구의 초석이며, 측정 신뢰성이 높은 온실가스 배출량의 평가는 모든 기후변화 예측 및 모델링 연구의 실질적인 기초자료로서 활용된다. 또한 기후변화 대응 기술개발, 온실가스 저감기술 개발, 저감정책과 계획수립 등 기후변화에 효율적으로 대응하려면 예외 없이 온실가스 배출량에 대한 실질적이고 측정 신뢰성 높은 온실가스 모니터링 데이터 확보가 필요하다.

선진국들의 온실가스 감축의무를 규정한 교토 의정서(Kyoto Protocol)에 따라 온실가스 의무 감축국들(Annex I)은 온실가스 배출량 산정, 보고, 검증체계(Monitoring, Report, and Verification)가 잘 갖추어져 있고, 배출량 산정방법과 산정결과의 정확성이 높다고 평가되고 있다. 우리나라는 교토 의정서에 따른 의무 감축국(Annex I)은 아니지만 국가 보고서(NC, National Communication)와 격년갱신보고서(BUR, Biennial Update Report)를 기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)에 제출하고 있다. 또한 우리나라는 2014년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵을 수립하였고, 2015년 배출권 거래제 시행과 국제사회에 국가 온실가스 감축목표(INDC, Intended Nationally Determined Contributions)를 제출함에 따라 신뢰성 있는 국가 인벤토리 산정의 중요성이 더욱 증대되고 있다(GIR, 2018). 하지만 농업분야는 에너지, 산업공정 분야에 비해 배출계수 산정의 어려움, 배출량 산정식의 복잡성 등으로 온실가스 배출량의 정확한 측정과 결과의 검증은 여전히 어렵고 타 분야에 비해 상대적으로 불확실성이 크다고 알려져 있다(Bae et al., 2013).

우리나라 제 7차 농업과학기술 중장기 연구개발 계획(2018~2027)에 의하면 농업분야 온실가스 배출량의 정확한 산정을 중점 추진과제로 추진하고 있으며, 국가고유 온실가스 배출계수를 지속적으로 개발하고 있다. 이러한 국가 차원의 과제를 수행하기 위한 기반 기술로서, 온실가스 배출량 현장 모니터링 기술, 배출계수의 불확도 평가 기술, 온실가스 배출량 및 저감량 검증 기술 등이 필수적으로 요구되고 있는 실정이다. 이런 기반 기술의 핵심에는 가장 보편적으로 많이 사용되어 실질적인 표준화된 방법으로 자리 매김한 챔버

방식의 모니터링 기술이 자리 잡고 있다.

우리나라 국가 인벤토리 보고서에 따르면 농업 분야의 2016년 부문별 배출량은 벼재배 부문이 6.1 백만 톤 CO<sub>2</sub>eq. 으로 가장 큰 비중(28.8%)을 차지하며, 벼재배 부문 온실가스 인벤토리는 폐쇄형 챔버법으로 현장에서 직접 측정하여 산정한 국가 고유 메탄 배출계수에 활동자료(벼 재배면적)를 곱하여 산정하였다(GIR, 2018). 벼논 메탄 배출량이 많은 중국, 인도 등에서도 벼논 CH<sub>4</sub> 배출량 산정은 논에서 배출되는 CH<sub>4</sub>에 대해 현장에서 챔버법으로 직접 측정한 값을 근거로 하였다(Neue and Sass, 1998). 벼논에서 대기로 방출되는 CH<sub>4</sub>은 일정한 부피를 가진 상자로 지표면을 동봉하여 짧은 시간 동안의 농도변화를 측정하는 ‘폐쇄형 챔버법’을 보편적으로 많이 사용하며(Rochette and Ericksen-Hamel, 2008; Yao et al., 2009; Uprety et al., 2011; Jeong et al., 2016; Ju et al., 2018; Khokhar and Park, 2017; Pavelka et al., 2018), 온실가스 배출 인자들과 배출량에 대한 고찰에 많이 활용되었다(Khalil et al., 1991; Yagi and Minami, 1990; Sass et al., 1990; Lindau et al., 1991; Wassmann and Rennenberg, 1993; Ko et al., 1996; Kim et al., 2002; Shin et al., 2003; Zhang et al., 2010; Seo et al., 2011; Ju et al., 2013; Hayashi et al., 2015; Kang et al., 2015; Wassmann et al., 2018). 벼논에서 발생하는 CH<sub>4</sub>은 담수된 논토양에서 유기물의 혐기성 분해를 통해 벼의 통기조직 등을 통해 대기 중으로 배출되며, 그 배출량은 유기물 사용 등의 탄소 공급원만으로 결정되는 것이 아니라 기온, 강수량, 일사량 등의 여러 기상요소에 따른 벼의 생육상황, 토양 내 미생물 활동 등이 유기적으로 연결되어 나타난다(Khalil et al., 1991; Van der Gon and Neue, 1995; IPCC GPG, 2000; Kim et al., 2002; Yao et al., 2009; Kim et al., 2016; Matthias et al., 2019).

본 연구에서는 농업분야 온실가스 단일 배출원으로 가장 큰 부분을 차지하는 벼논에서 방출되는 CH<sub>4</sub> 플럭스 측정용 챔버법의 기술적 근간과 장·단점을 정리하고, 시료채취와 분석을 포함한 모니터링 전 과정을 자동화 시스템으로 발전하고 있는 챔버법 기술개발에 대한 국내·외 동향을 소개하고자 한다. 이를 바탕으로 보편적으로 사용하고 있는 CH<sub>4</sub> 플럭스 측정용 챔버법의 표준화된 방법에 대한 고찰과 CH<sub>4</sub> 플럭스 측정값에 대한 신뢰성을 높이기 위한 발전 방향에 대해 조망하고자 하였다.

## II. 국내 · 외 챔버법 기술 동향 분석

### 2.1. 기본 원리

세계적으로 농경지 CH<sub>4</sub> 플럭스 측정 기술로서 가장 널리 이용되고 있는 ‘폐쇄형 정적 챔버법(closed static chamber method)’은 토양표면에 바닥이 없는 상자(챔버)를 설치하고 CH<sub>4</sub> 농도 변화에서 플럭스를 산출하는 것이다. 챔버 내부에 갇힌 공기 중 CH<sub>4</sub> 혼합비(mixing ratio)를 시간의 함수로 기록하여 Eq. 1에 의해 플럭스(mg m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>)를 산정한다(Denmead, 1979; Minamikawa *et al.*, 2015). 여기서 V는 챔버의 내부 용적(m<sup>3</sup>), A는 챔버 밑면적(m<sup>2</sup>), ρ(P, T)는 챔버 내부의 기록된 절대 압력(atm)과 절대온도(K)에서의 CH<sub>4</sub> 밀도(mg m<sup>-3</sup>), C는 CH<sub>4</sub>의 부피 농도(ppmv), dC/dt는 측정 시간(dt) 동안 챔버 내 CH<sub>4</sub> 혼합비(부피비 농도)의 선형적인 차이(dC)이다. 이 방법은 CH<sub>4</sub>의 비교적 긴 대기 중 체류기간(약 12년), 수중에서의 낮은 용해도(약 24 mg L<sup>-1</sup> 20°C, 1기압), 일반적인 챔버 재료들과 CH<sub>4</sub>의 낮은 상호작용이라는 관점에서 활용도가 높다.

$$F_{CH_4} = \frac{V}{A} \rho(P, T) \frac{dC}{dt} \quad (\text{Eq. 1})$$

일반적으로 측정현장에서 벼는 CH<sub>4</sub> 플럭스에 적용하는 식은 챔버 내 온도 변화에 대한 보정(T<sub>initial</sub>, T<sub>final</sub>)을 고려하고, 챔버 내부와 외부의 압력 차이는 무시할 수 있다고 가정하여 Eq. 2와 같다(FAO-IAEA, 1992;

Xunhua *et al.*, 1998). 여기서 h는 챔버의 유효 높이(m), ρ(0°C, 1 atm)는 표준상태에서의 CH<sub>4</sub> 밀도(mg m<sup>-3</sup>), C는 메탄의 부피 농도(ppmv), dC/dt는 측정 시간(dt) 동안 챔버 내 메탄 혼합비(부피비 농도)의 선형적인 차이(dC)이다.

$$F_{CH_4} = h\rho(0^\circ\text{C}, 1\text{atm}) \frac{dC}{dt} \frac{273}{(273 + \frac{T_{\text{initial}} + T_{\text{final}}}{2})} \quad (\text{Eq. 2})$$

챔버법은 낮은 비용, 손쉬운 사용, 좁은 지역에서의 처리 수준별 연구들과 공간 또는 시간에서의 일치성과 반복 측정을 요하는 연구들에 매우 유용하다(Rolston *et al.*, 1993). 그러나 농경지에서 온실가스 플럭스를 측정할 때는 작물에 대한 인위적 간섭을 최소화하고 최대한 자연에 가까운 환경에서 관측되어야 하기 때문에 챔버 설치에 따른 인위적 간섭이 발생하는 챔버법의 한계를 보완하기 위한 기술로서 미기상학적 방법이 1990년 중반부터 농경지를 포함한 생태계의 미량 가스 교환에 대해 현장 측정 기술로서 개발되기 시작하였다(Raupach *et al.*, 1996; Lee, 1998). 미기상학적 방법은 대기 중 기체농도의 연직분포와 각종 미기상요소로부터 플럭스를 산출하는 방법이다. 기본적으로 타워 기반 미기상학적 방법은 전형적으로 100~1,000 m<sup>2</sup>의 비교적 넓은 지역에 대한 플럭스를 측정하기 때문에, 일반적으로 1 m<sup>2</sup> 미만의 챔버법으로 측정할 지역 규모 가스 교환 속도의 변화가 상당히 클 때 잠재적인 장점을 제공한다. 하지만 관측시스템의 설치비용이 상대적으로 비싸고, 전문인력의 지속적인 관리가 필요

**Table 1.** Summary of flux chamber and micrometeorological methods for measurement of CH<sub>4</sub> fluxes from a rice paddy

	Chamber methods	Micrometeorological methods
Principle	Short-term changes in concentration of a gas species of interest within a sealed enclosure placed over the land surface	Trace gas fluxes transported by eddy motion of the atmosphere from the extensive uniform terrain(100~1,000 m <sup>2</sup> ) measured
Characteristics	Possible measurement of small scale in time and space and no extra equipment required for electrical supply	Flux-gradient techniques require accurate measurement of gradients of vertical gas concentration wind velocity, and air temperature above the emitting surface
Advantages	Simple, relatively inexpensive to construct, easy to manage, and suitable for comparison between various treatments	Non-destructive and continuous measurement with rapid response detector (1 to 10 Hz)
Disadvantages	Intensive-labor and disturbance of a site due to chamber installation	Expensive equipment and more difficult sampling and measurement procedures than chamber methods

하며, 측정하고자 하는 대상지역이 넓어야 하므로 여러 처리간의 비교에는 부적절하다(Table 1).

챔버법은 수동식 혹은 자동화로 운용될 수 있다. 초기 형태의  $\text{CH}_4$  수동식 시료 채취형 챔버는 ‘이동식, 상부 폐쇄형’의 형태를 보였다. 기본적으로 수동 측정 시스템은 눈에 규칙적으로 배열된 반복 실험용 복수개의 챔버들에서 분석자가 직접 주사기(syringe)로 공기 시료를 채취하여 직접 GC로 주입하여 분석한다. 이러한 수동 챔버의 경우, 소요 비용은 비교적 저렴하나 포장에서 이동설치를 위한 시간과 노동력이 과다 소용되며, 포장 시험 시 처리와 반복수를 늘리기 어렵다는 단점이 있다. 반면에 자동 챔버법은 폐쇄형 정적 챔버(closed static chamber)에서의 자동 시료 채취와 가스 크로마토그래피-불꽃 이온화검출기(GC-FID, Gas Chromatography-Flame Ionization Detector)를 이용한 자동 분석에 기초를 두고, 시료 채취부터 분석까지 일련의 과정을 프로그램에 의해 자동으로 진행한다는 점이다. 이를 위해서는 기본적으로 챔버 상단 문 자동 개폐 기능을 위한 유압 시스템, 챔버 내부로부터 시료 루프로 공기 시료를 전달하는 시스템, 데이터 수집장치와 연결된 가스 농도 분석 시스템을 갖추어야 한다.

## 2.2. 챔버법의 해외 기술 동향

벼논에서 방출되는  $\text{CH}_4$  측정은 1981년 미국 캘리포니아 지역 논에서 처음 챔버법으로 측정되어 벼논이  $\text{CH}_4$ 의 큰 배출원임이 확인되었다(Cicerone and Shetter, 1981). 1987년 호주 그리피스(Griffith) 지역 논에서는 질소 비료 시비에 따른 아산화질소 등을 챔버법으로 측정할 수 있으며(Mosier *et al.*, 1989), 일본에서는 1988년부터 벼논에서 챔버법으로  $\text{CH}_4$  배출을 측정하기 시작하였다(Yagi and Minami, 1990). 최초로 자동화 시료채취 및 분석 시스템을 개발한 사례는 1989년 이탈리아의 상시담수 조건 논에서  $\text{CH}_4$  플럭스 측정 연구이다(Table 2). 챔버의 용적은 약 380 L로서 밑 면적 약  $0.4 \text{ m}^2$  ( $0.65 \text{ m} \times 0.65 \text{ m}$ ), 높이 0.9 m로 제작되었다. 챔버의 외관은 투명한 3 mm 두께의 플렉시유리(plexiglass: 항공기 방풍유리나 광학기구에 사용되는 유리 같이 투명한 성질의 열가역성 폴리메타크릴산메틸의 중합체)로 모서리는 4 mm 두께의 알루미늄 재질로 고정시키고, 내부표면에는 실리콘으로 기밀하였다. 금속 벨로스(bellows) 펌프로 주기적으로 각 폐쇄형 챔버 내부로부터 공기 시료를 채취하여 스테인리스강(stainless steel) 모세관(길이 50 m, 내경 1 mm)

라인을 통하여 시험포장 바로 옆에 위치한 분석실로 이송된다. 공기 시료 내 수증기는 냉각트랩을 통과시켜 제거하였다. 이 시료는 GC-FID의 시료저장 고리(sampling loop)에 들어가 분석된다. 각 90분 측정 주기로 GC 시스템은  $\text{CH}_4$  교정가스(약  $4 \mu\text{mol mol}^{-1}$ )를 이용하여 자동으로 교정되었다. 각 챔버당 매일 8회의  $\text{CH}_4$  배출 플럭스 자료를 얻을 수 있었으며,  $\text{CH}_4$  배출 플럭스의 최저 검출 한계는 약  $0.05 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로서 1시간 동안 약  $0.1 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 의 증가분으로 배경 대기 농도인 약  $2 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 의 5%에 해당하였다.

이후 보급형으로 개발된 자동화 챔버는 필리핀에 있는 국제 미작 연구소(IRRI, International Rice Research Institute)에서 개발한 메탄자동측정장비(AMMS, Automatic Methane Measuring System)라고 알려져 있다. AMMS는 챔버, 제어기, 가스 분석기, 환경 모니터링 유닛(unit)으로 구성되어 있으며, 포장에 인접하여 설치된 야외 분석실에서 하루 8~12회 연속 측정이 가능하여 수동 챔버법으로는 놓칠 수도 있는 짧은 사건의 검출과 미량기체의 시간적 변화를 파악할 수 있다. 하지만 설치 운용 시 많은 비용이 소요되고 숙달된 인력의 확보가 필요한 점에서는 접근이 용이하지 않다.

미국에서는 토양으로부터 이산화탄소와 아산화질소 가스를 대상으로 시료 포집 기술을 수동식 폐쇄형 챔버 시스템과 더불어 맞춤형 자동화 시스템을 개발하였다(Scott *et al.*, 1999). 수동식에 비교하여 자동화 기술은 복수개의 미량 가스 플럭스를 동시에 분석할 수 있으며, 장기간 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. 자동 챔버는  $0.5 \text{ m}^2$ 의 토양 면적을 차지하며, 챔버 뚜껑은 날씨에 관계없이 운용이 가능한 모터로 가동된다. 챔버는 금속 재료로 기밀되어, 시료 유지(retention)가 가능하여 장기 보관이 가능하고 원격으로 수송할 수 있다. 다중경로 회전식 밸브(multiway rotary valve)를 통하여 폐쇄형 챔버 내부에 갇힌 가스를 펌핑하여 시료 보관용기에 채워진 시료는 실험실에 있는 GC로 자동 주입되어 분석된다. 수동식 관측으로는 수많은 순간적인 미량 가스 배출 플럭스 사건들을 놓칠 가능성이 높으므로 자동화 챔버 측정 시스템 보다 일반적으로 낮은 누적 플럭스 값을 보일 것으로 예측하였다. 따라서 수동식에 비해 자동화 가스 시료 채취 시스템은 가스 플럭스 자료의 시간적 변화에 대한 보다 명확한 파악이 가능하여 누적 플럭스 추정을 개선할 수 있었다. 이에 현장에서 보다 신뢰성 높은 가스 누적 배출량에 대한 추정을 하려면 측정 빈도가 많고 규칙

적인 시료 채취가 가능하도록 설계된 자동화 기법 사용을 권장한다. 그러나 수동형 챔버 제작비용이 자동 챔버에 비해 상대적으로 저렴하기 때문에 보다 반복수를 늘릴 수 있으며, 토양으로부터 발생하는 미량 가스 플럭스의 공간적 변동성(spatial variability)을 추정하는데 보다 효과적으로 사용될 수 있다.

일본 국립농업환경과학연구소(NIAES, National Institute for Agro-Environmental Sciences)에서는 자동화된 CH<sub>4</sub> 모니터링 시스템의 자동 챔버와 수동 챔

버로 1991년부터 1993년까지 벼 경작기간에 걸친 CH<sub>4</sub> 배출량에 대하여 보고하였다(Yagi *et al.*, 1996). 가스 포집용 챔버는 단면적 1.44 m<sup>2</sup>(1.2 m×1.2 m), 높이 1.5 m 크기의 투명한 폴리카보네이트(PC, polycarbonate) 재질로 제작되었으며, 자동으로 CH<sub>4</sub> 시료를 채취하고 분석이 가능한 자동챔버 시스템이다(Table 2). 벼 경작 기간에 측정된 CH<sub>4</sub> 배출량이 수동식 챔버에서 더 높은 값을 보였는데, 이는 시료채취 시간이 11시 경에 수행되어 일 평균 플럭스 값보다 약간 높게 나와 과대

**Table 2.** Characteristics of fully automated closed chamber methods in previous studies in domestic and abroad

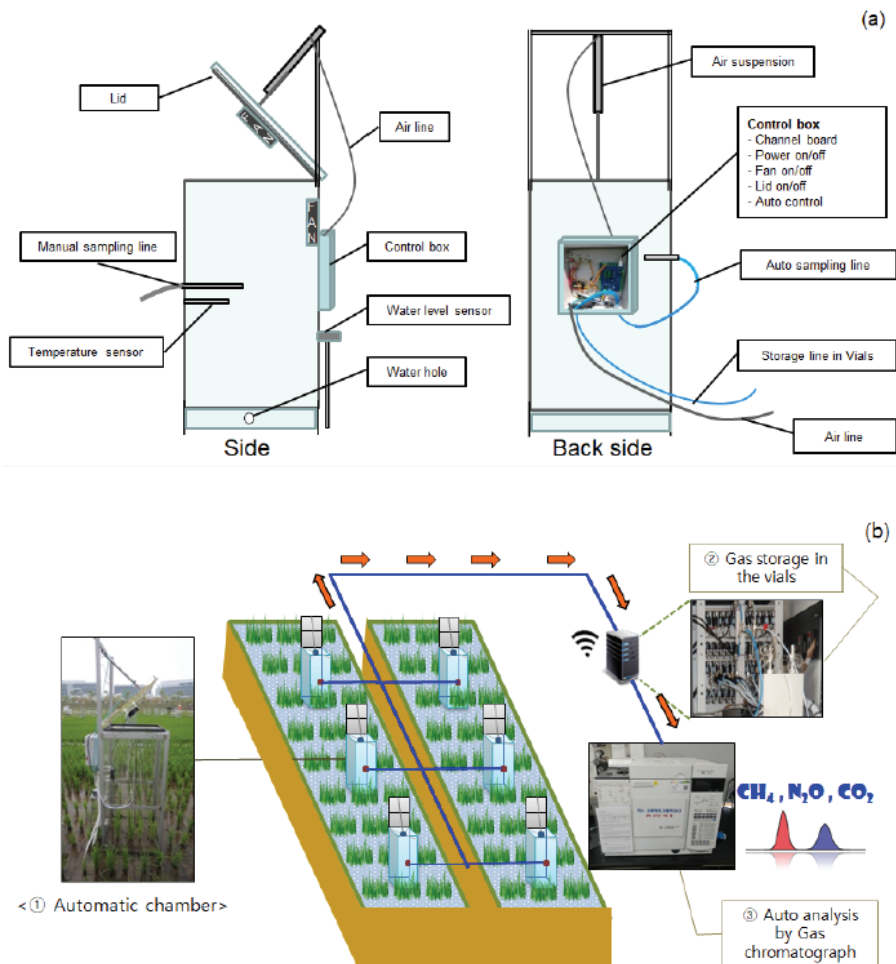
Country of study site (performer)	Characteristics of fully automated closed chamber method	Reference
Italy (Italian Rice Research Institute)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber materials: colorless, smooth, plexiglass 3 mm thick and aluminum profiles</li> <li>- Chamber size: Area 0.4 m<sup>2</sup>, Height 0.9 m (inner volume: 380 L) / plot size: 1.5 × 5 m</li> <li>- Top lid operation: pressure-cylinder</li> <li>- A fan mounted on the inner side of the cover</li> <li>- Automatic system: chamber-sampling unit with sampling loop-GC connected to a two-channel integrator, the magnetic valves controlling the air flow in the system are operated by a microcomputer</li> </ul>	Schutz <i>et al.</i> , 1989
Japan (National Institute of Agro-Environmental Sciences)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber materials: transparent polycarbonate</li> <li>- Chamber size: Area 1.44 m<sup>2</sup>, Height 1.5 m / plot size: 50 m<sup>2</sup></li> <li>- Top lid operation: automated shutter driving by an air valve</li> <li>- A fan was attached inside the cover</li> <li>- Automatic system: chamber-sampling system(drawn by a metal bellow pump)-GC/FID, the chamber and the sampling system are operated by a microcomputer</li> </ul>	Yagi <i>et al.</i> , 1996
China (Chinese Academy of Sciences)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber size: Area 1.44 m<sup>2</sup>, Height 1.5 m</li> <li>- Top lid operation: air compressor cylinder</li> <li>- A fan was attached inside the cover</li> <li>- Automatic system: chamber-sampling system(drawn by a sampling pump)-GC/FID, the chamber and the sampling system are operated by the central computer</li> </ul>	Xunhua <i>et al.</i> , 1998
Republic of Korea (National Institute of Agricultural Sciences)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber materials: transparent acrylic</li> <li>- Chamber size: Area 0.36 m<sup>2</sup>, Height 1.4 m</li> <li>- Top lid operation: air suspension</li> <li>- Fan installed on top lid and side of the chamber</li> <li>- Automatic system: chamber-sampling system(controlled by main control board)-GC/FID, the chamber and the sampling system are operated by the main control board</li> </ul>	Jeong <i>et al.</i> , 2018
Republic of Korea (Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber materials: transparent polycarbonate</li> <li>- Chamber size: Area 0.36 m<sup>2</sup>, Height 1.2 m / plot size: 80 m<sup>2</sup></li> <li>- Top lid operation: electric cylinder</li> <li>- A fan was attached inside the cover</li> <li>- Automatic system: chamber-sampling system(drawn by a vacuum pump)-GC/FID, the chamber and the sampling system are operated by the control program</li> </ul>	Ju <i>et al.</i> , 2017

평가될 수도 있다고 하였다(Yagi *et al.*, 1996). 따라서 수동식으로 이루어지는 경우 일평균 배출량의 대표성을 확보할 수 있도록 시료채취 시간이 고려되어야 한다.

중국 과학원(CAS, Chinese Academy of Sciences)에서 보고한 벼는 CH<sub>4</sub> 배출량 측정을 위한 자동챔버 시스템은 시험포장 논으로부터 약 50 m 거리에 있는 실험실, 중간 제어기를 갖고 있는 약 5 m<sup>2</sup> 규모의 보관함과 8개의 챔버가 있는 논 시험포장으로 크게 3부분으로 구분된다(Xunhua *et al.*, 1998). 실험실에는 중앙 제어시스템 컴퓨터, 시료채취용 펌프, 수분제거 시스템, GC-FID를 포함하는 가스 분석실로 구축되었다.

전체 측정과정은 분석실 제어 절차에 따라 챔버 내 가스 시료 채취, 시료 이송, 시료의 수분 제거, GC-FID 분석, 자료 획득과 저장이 자동으로 순서대로 진행된다(Table 2).

해외 사례의 경우 자동화를 위한 기술 개발은 선진화되고 있으나 대부분 측정 원자료(raw data)가 제시되어 있지 않고, 추가적인 CH<sub>4</sub> 자동 측정 시스템의 성능을 검증하기 위한 실험 평가와 플럭스 데이터의 측정 불확도 평가 결과가 제시되어 있지 않은 실정이다.



**Fig. 1.** Scheme of the automatic closed chamber(a), the automatic sampling and analyzing system(b) employed in continuous measurements of CH<sub>4</sub> emission rates in rice paddies (adapted from Jeong *et al.*, 2018).

### 2.3. 챔버법의 국내 기술 동향

우리나라에서는 국립농업과학원에서 1993년부터 간이 폐쇄형 챔버법을 적용하여 논에서의 CH<sub>4</sub> 배출 플럭스 관측 연구를 시작하였다. 우리나라 최초의 수동식 폐쇄형 정적 챔버(manual closed static chamber) 모델은 8개의 모(단위 모 면적, 0.15 m×0.3 m)를 수용할 수 있는 단면적 0.36 m<sup>2</sup>(0.6 m×0.6 m), 높이 1.0 m 크기의 폴리아크릴 플라스틱판(polyacrylic plastic plate)과 알루미늄 앵글로 제작되었으며, 챔버 상단 뚜껑의 각도는 약 45°이었다(Shin *et al.*, 1995). 이 방법으로 2시간 이내에 약 30개의 챔버에서 시료를 채취하여 시간당 30~40점의 시료를 분석할 수 있다고 제안하였다(Shin *et al.*, 1995). 이는 1990년대 초반 당시 국내에서 제작, 보급이 가능하고 설치 비용 면에서 저렴하고 반복시험까지 수용할 수 있도록 단순화된 수동식 폐쇄형 챔버법이다. 수동식 폐쇄형 챔버법은 2000년대 중반까지 활용 가능한 실질적인 표준화된 방법으로 채택되어 꾸준히 벼농사 영농방식에 따른 CH<sub>4</sub> 배출량 조사에 활용되었다(RDA, 2005). 또한 국가 고유 배출계수 개발용 CH<sub>4</sub> 플럭스 자료를 얻기 위해 경기 화성, 경북 대구, 전남 광주, 경남 진주에 위치한 시험

포장에도 수동형 고정식 상부 개폐형 챔버법이 적용되었으며(Kim *et al.*, 2013), 벼논 유기물 시용 보정계수 개발에도 챔버법이 사용되었다(Ju *et al.*, 2013).

국립농업과학원에서 개발한 농경지 온실가스 자동 측정 시스템은 크게 자동 챔버, 주 제어판(main control board), GC-FID로 구성되어 있다(Fig. 1). 챔버의 재질은 빛 투과율이 높은 아크릴 소재의 투명 챔버로, 가로, 세로, 높이가 각각 0.6 m, 0.6 m, 1.4 m 크기이다. 자동 챔버 측면에는 온실가스를 수동 채취 방법과 겸용 가능하도록 스테인리스(stainless) 재질의관이 설치되어 있다. 챔버 상단의 뚜껑은 수동과 자동으로 개폐가 가능하도록 공기 받침대(air suspension)를 부착하였다(Table 2). 하단에는 담수상태에서 논물이 챔버 안쪽과 바깥쪽으로 드나들 수 있도록 양쪽에 1개씩 직경 5 cm의 홀이 있다. 챔버 내 온도변화 측정을 위해 온도센서를 설치하였으며, 상단 뚜껑과 측면에는 공기순환을 위한 환풍기(fan)를 설치하였다. 챔버 뒤쪽에는 제어박스가 설치되어 있고 박스 내에는 채널보드(channel board)를 설치하여 가스시료 샘플링, 챔버 상단 문 개폐, 온도 측정, 환풍기 가동 등이 자동으로 제어가 가능하도록 하였다. 각각의 챔버는

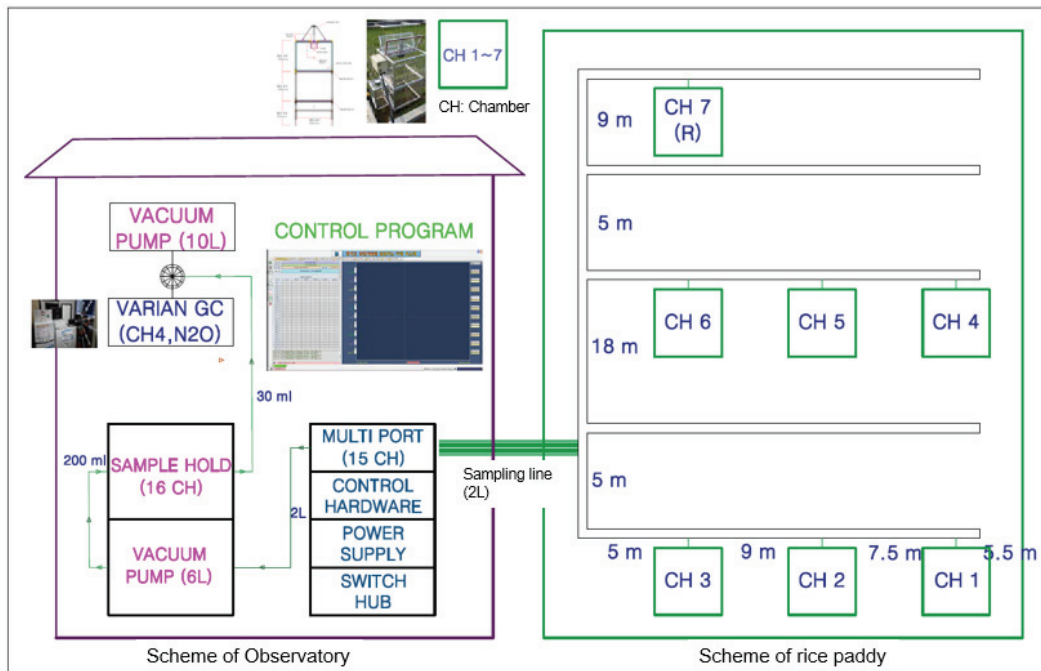


Fig. 2. Scheme of the fully automated closed chamber system employed in Gyeonggi-do Agriculture Research and Extension Services in Korea (modified from Ju *et al.*, 2017).



가스 샘플링라인, 에어라인 및 자료 전송 라인이 주 제어판으로 연결되어 있어 여러 챔버에서 동시에 메탄 시료 샘플링이 가능하다. 각 챔버에서 샘플링 된 시료는 제어판 뒤쪽에 설치된 유리재질의 50 ml vial에 보관되고 포집된 가스 시료는 GC-FID를 이용해 순차적으로 분석된다(Jeong *et al.*, 2018a). 여러 챔버에서 동시에 시료 채취가 가능한 자동 챔버 시스템인 경우 측정값들 간 차이의 잠재적 원인인 챔버 간 위치의 차이, 처리 간 측정 시점의 차이로 인한 불확실성을 감소시킬 수 있고, 측정 횟수를 증가시켜 평균값의 불확도를 감소시킬 수 있을 것으로 추정된다.

또한 경기도농업기술원에서는 국내 간이 폐쇄형 챔버(Shin *et al.*, 1995)와 일본 국립농업환경과학연구소의 챔버(Yagi *et al.*, 1996) 규격을 참고하여 단면적  $0.36 \text{ m}^2$  ( $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ ), 높이 1.2 m 크기의 PC재질 투명 챔버로 자동시료채취와 분석이 가능한 자동 챔버 시스템을 구축하였다(Fig. 2). 챔버가 설치된 시험포장에서 약 3 m 떨어진 온실가스 분석실까지 시료채취라인(Teflon tube)이 연결되어 있으며, 각각의 시료는 멀티포트와 16개의 시료를 저장할 수 있는 샘플 포집기를 거쳐 분석기에서 시료를 분석한다(Table 2). 챔버에서 분석기(GC-FID)까지 시료 라인 길이는 최대 50 m 정도이며, 정확한 시료를 이송할 수 있도록 라인을 우선 압축공기로 세척한 후 사용한다. 가스 포집은 주 2회, 매회 오전 10~11시 사이에 진공펌프와 유량조절기에 의해  $200 \text{ ml min}^{-1}$ 의 일정한 유속으로 1분 30초간 온실가스 샘플 포집기(30 ml pyrex 관) 안으로 지나가며 약 10초간 약 30 ml의 가스 시료가 자동으로 포집되어 GC-FID에서 분석된다. 가스 시료 채취 간격은 챔버의 상단 문이 열린 상태에서 1차로 채취한 후 문을 닫고 30분 경과 후 2차로 시료를 채취하여 농도 변화를 측정하며, 시료 채취와 동시에 최초 온도와 30분 후 온도를 기록하며, 논문로부터 챔버 상단까지 유효높이를 조사하여 Eq. 2에 준하여  $\text{CH}_4$  플럭스 배출량을 산정하였다(Ju *et al.*, 2017).

### III. 챔버 설계시 고려사항

벼논  $\text{CH}_4$  플럭스 측정용 챔버는 경제성, 운영의 편의성, 시·공간적으로 작은 규모에서 다양한 연구에 적용할 수 있는 장점으로 많은 연구에 활용되고 있다. 다양한 연구에 보편적으로 사용하여 실질적인 표준화된 방법으로 자리 매김한 챔버 방식의 기술을 이용할

때 유념해야 할 인위적 간섭 효과들을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 챔버 설치로 인한 토양 교란 및 가뭄 효과이다. 챔버 설치 과정에서 교란된 토양 표면으로 인한 영향은 매우 작다고 보고된 바 있으나(Kim *et al.*, 2000), 평형상태를 위해 6시간이 필요하다고 지적한 바 있으며(Shin *et al.*, 1995), 시료채취 24시간 전에 챔버를 설치해야 한다고 권고한 바 있다(GRA, 2015). 이에 토양의 교란효과를 최소화하면서 노동력도 줄일 수 있는 챔버 칼라(collar)에 대한 고려가 필요하다. 또한 챔버를 설치하면 주변 공기의 자연스런 흐름을 인위적으로 차단시킴으로써 챔버 내 토양과 식물체가 주변 공기와의 상호작용에 영향을 받을 수 있어  $\text{CH}_4$  배출량에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있다. 폐쇄형 챔버를 사용하는 한 이러한 측정방법에 의한 편향(bias)을 제거하는 것은 원리상 불가능하다. 이것은 배출량 측정 결과가 과대평가 혹은 과소평가의 개연성을 가지고 있음을 시사한다.

둘째, 폐쇄로 인해 벼 생장에 영향을 줄 수 있는 온도와 습도의 변화는 최소화 할수 있어야 하며, 챔버 크기를 고려해야 한다. 벼논  $\text{CH}_4$  배출량은 벼 통기조직을 통한 배출이 많은 부분을 차지하므로 벼가 정상 생육할 수 있는 조건의 챔버 크기와 환경이 필요하다. 이는 개방형 동적 챔버(open dynamic chamber)를 사용하거나 통제된 환경에서 폐쇄형 챔버를 사용함으로써 해결할 수 있다. 온도 변화의 경우 불투명 챔버 등을 이용하여 챔버 내부 공기의 가열을 감소시킬 수 있으나 벼 생장과 토양 온도에서의 빛 차단 효과 등으로 인하여 식물체가 있는 챔버는 투명 챔버 사용을 권고한다(Pavelka *et al.*, 2018). 폐쇄형 챔버 사용에 따른 온도 변화에서는 환풍기를 가동하는 경우 30분 후 챔버 내부 온도가  $4.5^\circ\text{C}$  상승한 반면에, 가동하지 않는 경우에는  $9.5^\circ\text{C}$  상승하여 벼의 생육에 영향을 미칠 수 있음을 지적한 바 있으며(Shin *et al.*, 1995), 야간 측정 등을 이용하여 이러한 효과를 줄이고자 하였다(Wassmann *et al.*, 2018).

셋째, 벼논에서 측정 기간이 가능한 짧아야 하는 점과 측정 사이트가 자연 조건에 규칙적인 간격으로 다시 노출되어야 한다는 점이다. 챔버 폐쇄 후 오랜 기간 동안 방치하면  $\text{CH}_4$ 이 계속 축적되고 이러한 적체현상으로 인해 자연스런  $\text{CH}_4$  배출량이 억제될 수 있기 때문이다.  $\text{CH}_4$ 의 초기 농도가 챔버 외부의 농도와 최대한 일치하도록 주기적으로 개방시켜야 한다.



넷째, 벼는 측정용 챔버는 생리화학적 활성 범위에서 분광학적 조성 혹은 빛의 강도에서 오직 작은 변화만 가능한 재료로 제작되어야 한다. 챔버 제작용으로 사용되는 재료들은 plexiglass, polyacrylic plastic, acrylic, PVC, PC, stainless steel, 알루미늄 등이며, 어떤 경우에는 플라스틱 백이 식물 챔버로 사용되기도 한다. plexiglass(3 mm 두께)는 챔버 제작용으로 흔히 사용되는 재료로서 400 nm 이하의 파장에서 빛을 효과적으로 흡수하지만 식물생장을 위한 광합성의 활성 빛 스펙트럼에는 유의한 영향을 미치지 않는다. 하지만, 청색광에 의해 유도된 생리학적 반응들은 변경될 수 있다. 또한 국내에서 많이 사용되고 있는 PVC, PC 등의 챔버 차광효과로 인한 식물 성장 영향은 보고된 바 없다.

다섯째, 챔버 내 갇힌 공기 중 시간에 따라 증가하는 CH<sub>4</sub> 농도의 기울기(gradient)는 갇힌 토양 면적에 비해 큰 챔버 용적을 사용함으로써 최소화 될 수 있다. 또한 챔버 내 CH<sub>4</sub> 농도의 수직적 변화로 인해 비균질한 샘플링을 방지하기 위한 고려가 필요하다. 챔버 상단 등의 환풍기를 사용하여 챔버 내부 공기를 균질화하도록 설계되어 있으나, Shin *et al.*(1995)에 의하면 환풍기를 가동하지 않았을 때 CH<sub>4</sub>의 상대적 분포 지표(IRDM, Index of Relative Distribution of Methane)가 더 안정하다고 보고한 바 있어, 챔버 내 방출된 CH<sub>4</sub> 배출량의 균질한 샘플링에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

#### IV. 결 론

본 연구는 벼에서 발생하는 CH<sub>4</sub> 배출량의 근간이 되는 단일 플렉스 측정용 폐쇄형 정적 챔버법의 국내·외 기술 동향을 검토하여 현장 측정결과 신뢰성, 즉 측정 품질을 향상시키기 위한 다양한 요구 사항들에 대하여 고찰하였다. 챔버법은 작은 규모에서 발생하는 CH<sub>4</sub> 배출량의 직접 측정방법으로 적용하기 쉽고 간단하지만 챔버 설치와 운영을 위한 노동력과 샘플링 측정시간, 횡수 등의 제한요소 극복을 위해 자동화를 통한 기술 개선의 노력이 계속되었다(Table 3). 수동식 챔버에서 자동화 챔버 시스템으로 발전함에는 노동력 감소와 데이터 측정시기, 횡수에 의한 제한점을 개선하여 측정데이터의 양적 성장을 통한 정밀성을 개선하였으나, 챔버법이 갖고 있는 인위적 간섭에 대한 한계와 측정값의 품질관리를 위한 과학적 고찰이 아직 부족한 현실이다(Table 3). 그러므로 현재까지 발견한 챔버법에서 측정품질을 향상시키기 위한 필요한 사항들에 대하여 다음과 같이 고찰하였다.

첫째, 수동 챔버에서 자동 챔버 시스템으로 변경 시 시료채취 과정에서 연유되는 불확실성이 개선될 수 있는지 또한 얼마나 개선 가능한지 검토해야 할 것이다. 여기에는 시료 채취에 사용된 주사기 내부 시료 농도의 경시 변화, 자동화된 경우에는 분석되는 시료가 라인을 통해 이송되는 과정에서 연유하는 불확실성, 완전 혼합을 가정한 시료 채취 높이의 영향 등이 고려되어야 할 것이다(Schutz *et al.*, 1989).

둘째, 정확한 시료 채취뿐 만 아니라 분석자체의 품질

**Table 3.** Comparison between manually operated and fully automated closed chamber methods for measurement of CH<sub>4</sub> fluxes from a rice paddy

Manually operated closed chamber	Fully automated closed chamber	Scientific concern
easy to apply direct measurements for very small fluxes on local scale	same	chamber enclosure effect
simple and relative inexpensive to construct	more complex and expensive to construct relative to the manual chamber	chamber materials (eq. plexiglass, PVC, PC and so on.)
no extra equipment requiring electrical supply is needed	extra equipment requiring electrical supply is needed	simplified extra equipment
labor to install and to remove	same	disturb the soil
limitation of sampling time and labor	easy to apply continuous or regular sampling without extra labor	manual or automated sampling bias or temporal variability
easy to apply in another site	difficult to apply in another site	representative sampling time or spatial variability

질도 중요한 품질관리 대상이다. 가스 기기분석 과정에서 연유되는 불확실성에 대한 요인들을 보다 과학적으로 평가해야 할 것이다. 미지의 CH<sub>4</sub> 시료와의 비교를 위한 CH<sub>4</sub> 표준가스의 농도, 검량선 설정 방법, 교정 주기, 크로마토그램(chromatogram) 바탕선(baseline)의 경시변화, 수분을 함유한 시료와 수분을 제거한 시료의 매질효과, GC 반응 피크 면적의 반복성, 농도 결과의 시간 경과에 대한 재현성 등이 고려대상이라고 할 수 있다(Bronson *et al.*, 1997).

셋째, 아직까지는 챔버법이 표준화된 방법으로 자리 잡아 계통적 오차(systematic error)는 없다는 전제하에 CH<sub>4</sub> 배출량에 대한 불확도를 추정하고 있다. 그럼에도 불구하고, 농경지 CH<sub>4</sub> 플럭스 챔버 방식 자체가 가지는 한계로서 분명한 점은 폐쇄로 인해 자연 조건에 변화를 유발시킬 수 있다는 방해요인(interference)로부터 결코 자유로울 수 없으며, 이로 인해 CH<sub>4</sub> 플럭스 값에도 변화를 일으킬 수 있다는 점이다. 또한 챔버 내부의 벼와 외부의 벼의 생장 여건의 차이로 CH<sub>4</sub> 배출 플럭스 값이 왜곡될 가능성에 대해 추후 계통적 편의(systematic bias)에 대한 평가가 필요할 것이다(Yu *et al.*, 2006). 이 부분에서는 우리나라에서도 현장 적용 챔버법의 근본적인 한계를 보완해 줄 수 있을 것으로 기대되는 비파괴적인 조건에서 측정이 가능한 미기상학적 방법(에디공분산법)과의 장기적인 비교 연구가 필요할 것이다(Schrier-Uijl *et al.*, 2010; Jeong *et al.*, 2018b).

전술한 바와 같이 챔버법을 활용한 CH<sub>4</sub> 배출량 측정 신뢰성 평가의 다양한 측면을 기반으로 정확한 현장 자료를 얻기 위한 품질관리 방안이 마련될 수 있을 것이다. 이러한 과학적 품질관리 방안들을 현장상황에 합리적으로 적용할 때 벼는 CH<sub>4</sub> 국가 고유 배출계수와 각종 보정계수들의 개발과 배출량 산정 결과들의 신뢰성 향상에 기여하게 될 것으로 전망한다.

## 적 요

온실가스 배출량의 정확한 평가는 모든 기후변화 대응 연구의 초석이며, 신뢰성이 높은 온실가스 배출량의 평가는 모든 기후변화 예측 및 모델링 연구의 실질적인 기초자료로서 활용된다. 온실가스 배출량 산정 기반 기술로서 온실가스 배출량 현장 모니터링 기술, 배출계수의 불확도 평가 기술, 온실가스 배출량 및 저감량 검증 기술 등이 필수적이다. 이런 기반 기술

의 핵심에는 토양-식생-대기 간에 교환되는 온실가스 플럭스 산정을 위해 가장 보편적으로 많이 사용되는 폐쇄형 정적 챔버법의 모니터링 기술이 자리 잡고 있다. 본 연구에서는 농업분야 온실가스 단일 배출원으로 가장 큰 부분을 차지하는 벼논에서 발생하는 CH<sub>4</sub> 플럭스 측정용 폐쇄형 챔버법의 기술적 근간과, 수동형 챔버법에서 전 과정의 자동화 시스템으로 발전을 거듭하고 있는 자동화 챔버 모니터링 기술개발에 대한 국내·외 동향을 소개하였다. 이를 바탕으로 보편적으로 사용하고 있는 챔버법의 표준화된 방법의 고찰과 정확한 현장 자료를 얻기 위한 품질관리 방안이 마련될 수 있을 것이다. 또한 CH<sub>4</sub> 플럭스 측정방법의 신뢰성 높은 기술 발전 방향에 대해 조망하여 벼는 CH<sub>4</sub> 배출량 산정 결과들의 신뢰성 향상에 기여하게 될 것으로 전망한다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ014853042020)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bae, Y. J., S. J. Bae, I. H. Seo, K. Seo, J. J. Lee, and G. Y. Kim, 2013: Estimation of uncertainty on greenhouse gas emission in the agriculture sector. *Korean Society of Rural Planning* **19**(4), 125-135. (in Korean with English abstract)
- Bronson, K. F., H. U. Neue, E. B. Abao Jr., and U. Singh, 1997: Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. Residue, Nitrogen, and Water Management. *Soil Science Society of America Journal* **61**, 981-987.
- Cicerone, R. J., and J. D. Shetter, 1981: Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion. *Journal of Geophysical Research* **86**, 7203-7209.
- Denmead, O. T., 1979: Chamber systems for measuring nitrous oxide emission from soils in the field. *Soil Science Society of America Journal* **43**(1), 89-95.
- FAO and IAEA, 1992: *Manual on Measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture*. IAEA-TECDOC-674, 91pp.
- GIR (Greenhouse gas Inventory and Research center),

- 2018: *National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea*, 401pp. (in Korean with no English abstract)
- GRA (Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases), 2015: *Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines*.
- Hayashi, K., T. Tokida, M. Kajiura, Y. Yanai, and M. Yano, 2015: Cropland soil-plant systems control production and consumption of methane and nitrous oxide and their emissions to the atmosphere. *Soil Science and Plant Nutrition* **61**, 2-33.
- IPCC GPG, 2000: *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*.
- Jeong, J. H., S. J. Kang, J. M. Lim, and J. H. Lee, 2016: Comparison and optimization of flux chamber methods of methane emissions from landfill surface area. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **38**(10), 535-542. (in Korean with English abstract)
- Jeong, H. C., E. J. Choi, J. S. Kim, G. Y. Kim, and S. I. Lee, 2018a: Comparison of CH<sub>4</sub> emission between auto chamber and manual chamber in the rice paddy. *Journal of Climate Change Research* **9**(4), 377-384. (in Korean with English abstract)
- Jeong, H. C., E. J. Choi, G. Y. Kim, S. I. Lee, and J. S. Kim, 2018b: Comparison of CH<sub>4</sub> emission by open-path and closed chamber methods in the paddy rice fields. *Korean Society of Environmental Biology* **36**(4), 507-516. (in Korean with English abstract)
- Ju, O. J., J. Kim, J. S. Park, and C. S. Kang, 2018: Chamber method for the estimation of greenhouse gas emissions in agricultural land: A review. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(1), 34-46. (in Korean with English abstract)
- Ju, O. J., N. G. Kang, J. S. Park, and C. S. Kang, 2017: Automated real-time analysis of greenhouse gases from rice paddies. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Gas Analysis Symposium and Exhibition (<http://www.gasanalysisevent.com/en/programme.proceedings/>).
- Ju, O. J., T. J. Won, K. R. Cho, B. R. Choi, J. S. Seo, I. T. Park, and G. Y. Kim, 2013: New estimates of CH<sub>4</sub> emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **32**(3), 179-184. (in Korean with English abstract)
- Kang, N., M. H. Jung, H. C. Jeong, and Y. S. Lee, 2015: Comparison of pooled standard deviation and standardized t-bootstrap methods for estimating uncertainty about average methane emission from rice cultivation. *Atmospheric Environment* **111**, 39-50.
- Khalil, M. A. K., R. A. Rasmussen, M.-X. Wang, and L. Ren, 1991: Methane emissions from rice fields in China. *Environmental Science and Technology* **25**, 979-981.
- Khokhar, N. H., and J. W. Park, 2017: A Simplified sampling procedure for the estimation of methane emission in rice fields. *Environmental Monitoring and Assessment* **189**, 468pp.
- Kim, D. S., Y. K. Jang, and E. C. Jeon, 2000: Surface flux measurements of methane from landfills by closed chamber technique and its validation. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **16**(5), 499-509. (in Korean with English abstract)
- Kim, G. Y., H. C. Jeong, O. J. Ju, H. K. Kim, J. H. Park, H. S. Gwon and P. J. Kim, 2013: Establishment of baseline emission factor of methane in Korean rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **32**(4), 359-365. (in Korean with English abstract)
- Kim, G. Y., S. I. Park, B. H. Song, and Y. K. Shin, 2002: Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in a rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **21**(2), 136-143. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y., M. S. A. Talucder, M. Kang, K. M. Shim, N. Kang, and J. Kim, 2016: Interannual variations in methane emission from an irrigated rice paddy caused by rainfalls during the aeration period. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **223**, 67-75.
- Ko, J. Y., H. W. Kang, and K. B. Park, 1996: Effects of water management rice straw and compost on methane emission in dry seeded rice. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **29**(3), 212-217. (in Korean with English abstract)
- Lee, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agriculture Forest Meteorology* **91**, 39-41.
- Lindau, C. W., P. K. Bollich, R. D. Delaune, W. H. Patrick Jr., and V. J. Law, 1991: Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH<sub>4</sub> emissions from a Louisiana, USA rice field. *Plant and Soil* **136**(2), 195-203.

- Maasackers, J. D., D. J. Jacob, M. P. Sulprizio, T. R. Scarpelli, H. Nesser, J-X. Sheng, Y. Zhang, M. Hersher, A. A. Bloom, K. W. Bowman, J. R. Worden, G. Janssens-Maenhout, and R. J. Parker, 2019: Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010–2015. *Atmospheric Chemistry Physics* **19**, 7859–7881.
- Matthias, J., R. Bun, Z. Nahorski, G. Marland, M. Gusti, and O. Danylo, 2019: Quantifying greenhouse gas emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **24**, 839-852.
- Minamikawa, K., T. Tokida, S. Sudo, A. Padre, and K. Yagi, 2015: *Guidelines for measuring CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddies by a manually operated closed chamber method*. National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan.
- Mosier, A. R., S. L. Chapman, and J. R. Freney, 1989: Determination of dinitrogen emission and retention in floodwater and porewater of a lowland rice field fertilized with <sup>15</sup>N-urea. *Fertilizer Research* **19**, 127-136.
- Neue, H. U., and R. L. Sass, 1998: The budget of Methane from rice fields, *IGACTivities Newsletter* **12**, 3-11.
- Pavelka, M., M. Acosta, R. Kiese, N. Altimir, C. Brummer, P. Crill, E. Darenova, R. Fub, B. Gielen, A. Graf, L. Klemetsson, A. Lohila, B. Longdoz, A. Lindroth, M. Nilsson, S. M. Jimenez, L. Merbold, L. Montagnani, M. Peichl, M. Pihlatie, J. Pumpanen, P. S. Ortiz, H. Silvernoinen, U. Skiba, P. Vestin, P. Weslien, D. Janous, and W. Kutsch, 2018: Standardisation of chamber technique for CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, and CH<sub>4</sub> fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *International Agrophysics* **32**, 569-587.
- Raupach, M. R., J. J. Finigan, and Y. Brunet, 1996: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy. *Boundary Layer Meteorology* **62**, 197-215.
- RDA (Rural Development Administration), 2005: *Development of Agricultural Practices to Mitigate Greenhouse Gases from Agricultural Sector*, 382pp. (in Korean)
- RDA (Rural Development Administration), 2010: *Assessment of Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Land in Korea*, 146pp. (in Korean)
- Rochette, P., and N. S. Eriksen-Hamel, 2008: Chamber measurements of soil Nitrous Oxide Flux: Are absolute values reliable? *Soil Physics* **72**(2), 331-342.
- Rolston, D. E., Duxbury, J. M., Harper, L. A., Mosier, A. R., Hutchinson, G. L., and G. P. Livingston, 1993: *Use of Chamber Systems to Measure Trace Gas Fluxes*. ASA Special Publication. Doi: 10.2134/asaspepub55.c4.
- Sass, R. L., F. M. Fischer, P. A. Harcombe, and F. T. Turner, 1990: Methane production and emission in a Texas agricultural wetland. *Global Biogeochemistry Cycles* **4**, 47-68.
- Schrier-Uijl, A. P., P. S. Kroon, A. Hensen, P. A. Leffelaar, F. Berendse, and E. M. Veenendall, 2010: Comparison of chamber and eddy covariance-based CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission estimates in a heterogeneous grass ecosystems on peat. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 825-831.
- Schutz, H., and W. Seiler, 1989: Methane flux measurements: Methods and results, exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, eds. Andreae, M.O. and Schimel, D.S., 209-228.
- Scott, A., I. Crichton, and B. C. Ball, 1999: Long-term monitoring of soil gas fluxes with closed chambers using automated and manual systems. *Journal of Environmental Quality* **28**(5), 1637-1643.
- Seo, Y. J., J. H. Park, C. Y. Kim, J. S. Kim, D. H. Cho, S. Y. Choi, S. D. Park, H. C. Jung, D. B. Lee, K. S. Kim, and M. Park, 2011: Effects of soil types on methane gas emission in paddy during rice cultivation. *Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer* **44**(6), 1220-1225.
- Shin, Y. K., Y. S. Lee, S. H. Yun, and M. E. Park, 1995: A simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soils. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* **28**(2), 183-190.
- Shin, Y. K., Y. S. Lee, M. H. Koh, and K. C. Eom, 2003: Diel Change of methane emission through rice plant under different water management and organic amendment. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **36**(1), 32-40.
- Uprety, D. C., K. K. Baruah, and L. Borah, 2011: Methane in rice agriculture: A review. *Journal of Scientific and Industrial Research* **70**, 401-411.
- Van der Gon, H. A. C. D., and H. U. Neue, 1995: Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochemical Cycles* **9**(1), 11-22.

- Wassmann, R., M. C. Alberto, A. Tirol-Padre, N. T. Hoang, R. Romasanta, C. A. Centeno, and B. O. Sander, 2018: Increasing sensitivity of methane emission measurements in rice through deployment of 'closed chambers' at nighttime. *PLOS ONE* **13**(2), e0191352.
- Wassmann, R., P. H., and H. Rennenberg, 1993: Methane emission from rice paddies and possible mitigation options. *Chemosphere* **26**, 201-217.
- Xunhua, Z., W. Mingxing, W. Uuesi, S. Renxinig, L. Jing, J. H. M. Kogge, L. Laotu, and J. Jisheng, 1998: Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields. *Advances in Atmospheric Sciences* **15**(4), 569-579.
- Yagi, K., and K. Minami, 1990: Effects of organic matter applications on methane emission from Japanese paddy fields. *Soils and the Greenhouse Effect*, 467-473.
- Yagi, K., J. Tsuruta, K. Kanda, and K. Minami, 1996: Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles* **10**(2), 255-267.
- Yao, Z., X. Zheng, B. Xie, C. Liu, B. Mei, H. Dong, K. Butterbach-Bahl, and J. Zhu, 2009: Comparison of manual and automated chambers for field measurements of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> fluxes from cultivated land. *Atmospheric Environment* **43**, 1888-1896.
- Yu, K. W., G. X. Chen, and H. Xu, 2006: Rice yield reduction by chamber enclosure: a possible effect on enhancing methane production. *Biology and Fertility of Soils* **43**(2), 257-261.
- Zhang, A., L. Cui, G. Pan, L. Li, Q. Hussain, X. Zhang, J. Zheng, and D. Crowley, 2010: Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **139**, 469-475.