

Drone 영상을 이용한 논 필지 벗짚 환원-동계 재배 확인 및 CH₄ 배출량 산정

장성주* · 박진석** · 홍록기*** · 홍주표*** · 권채린*** · 송인홍****

*서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부석사과정 · **서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부 박사과정

***서울대학교 조경 · 지역시스템공학부 학부과정 ·

****서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부/글로벌 스마트팜 융합전공/농업생명과학연구원 부교수

Estimation of Paddy CH₄ Emissions through Drone-Image-Based Identification of Paddy Rice Straw Application & Winter Crop Cultivation

Jang, Seongju* · Park, Jinseok** · Hong, Rokgi*** · Hong, Joopyo*** · Kwon, Chaelyn*** · Song, Inhong****

*M.S. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

**Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

***Undergraduate Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

****Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major,
Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

ABSTRACT : Rice straw management and winter crop cultivation are crucial components for the accurate estimation of paddy methane emissions. Field-based extensive investigation of paddy organic matter management requires enormous efforts however it becomes more feasible as drone technology advances. The objectives of this study were to identify paddy fields of straw application and winter crop cultivation using drone images and to apply for the estimation of yearly methane emission. Total 35 sites of over 150ha in area were selected nationwide as the study areas. Drone images of the study sites were taken twice during summer and winter in 2018 through 2019: Summer images were used to identify paddy cultivation areas, while winter images for straw and winter crop practices. Drone-image-based identification results were used to estimate paddy methane emission and compared with conventional method. As the result, mean areas for paddy, straw application and winter crop cultivation were 118.9ha, 12.0ha, and 11.3ha, respectively. Overall rice straw application rate were greater in Gyeonggi-do(20%) and Chungcheongnam-do(12%), while winter crop cultivation was greatest in Gyeongsangnam-do(30%) and Jeolla-do(27%). Yearly mean methane emission was estimated to be 226.2kg CH₄/ha/yr in this study and about 32% less when compared to 331.8kg CH₄/ha/yr estimated with the conventional method. This was primarily because of the lower rice straw application rate observed in this study, which was less than quarter the rate of 55.62% used for the conventional method. This indicates the necessity to use more accurate statistics of rice straw application as well as winter crop practices into paddy methane emission estimation. Thus it is recommended to further study to link drone technology with satellite image analysis in order to identify organic management practices at a paddy field level over extensive agricultural area.

Key words : Drone image, Methane emission, Rice paddy, Rice straw application, Winter crop cultivation

Corresponding author : Song, Inhong

Tel : +82-2-880-4581

Fax : +82-2-873-2087

E-mail : inhongs@snu.ac.kr

I. 서 론

메탄가스는 지구온난화와 기후변화의 원인으로 지목 받는 온실가스 중 하나이다(ME, 2020). 농업부문에서 메탄가스가 배출되는 주요 경로 중 하나로는 벼 재배가 있으며, 논이 담수된 상태에서 유기물의 혐기성 분해로 생성된 메탄가스는 작물의 통기조직을 통해 배출된다(Nouchi et al., 1990). 환경부의 국가온실가스통계에 따르면 2017년 농업부문 메탄가스 배출량 중 벼재배는 약 22.5%의 비중을 차지하고 있다(ME, 2020).

벼 재배를 통한 메탄가스 배출은 다양한 요인에 영향을 받는데, 그 예로 기후, 재배기간 전과 재배기간 중의 물관리 방법, 유기물 사용, 토양, 벼의 품종 등이 있다(Yagi and Minami, 1990; Sass et al., 1994; Yagi et al., 1996; Watanabe and Kimura, 1998). IPCC(2019)에서는 이와 같은 요소를 고려하여 벼 재배 부문의 메탄가스 발생량을 산정하기 위한 방법을 제시하고 있다.

IPCC(2019)는 벼 재배 부문의 메탄 배출량을 산정하는 방법을 크게 Tier 1, 2, 3의 세 단계로 구분하고 있다. Tier는 1에서 3으로 갈수록 복잡해지는데, 배출계수와 현장 데이터를 확보한 정도에 따라 선택할 수 있다. Tier 1은 벼 재배가 메탄 배출의 핵심 요소가 아니거나 국가고유배출계수가 없는 경우에 적용하는 방법으로 IPCC에서 제공하는 배출계수를 이용한다. Tier 2는 국가고유배출계수를 이용하는 방법으로 현장 데이터를 수집하여 국가별 메탄 배출계수를 산정한다. Tier 3은 고해상도의 자료를 수집하여 지역 고유의 메탄 배출량을 추정하는 방법이다(IPCC, 2019). Tier 3 수준의 메탄 배출량 평가는 정확하지만 이를 위해서는 메탄 배출과 관련된 다양한 인자의 조사가 필요하다(Kim et al., 2013).

우리나라는 현재 벼 재배 시 발생하는 메탄가스 발생량에 영향을 주는 물관리, 퇴비 및 녹비와 같은 유기물, 볏짚의 사용시기 등에 대한 다양한 연구가 진행되었다(Shin et al., 1995; Ko et al., 1996; Kim et al., 2002; Lim et al., 2012). 그리고 Kim et al.(2013)은 국가 메탄 기본 배출계수를 개발하고 Ju et al.(2013)은 볏짚 사용량에 따른 유기물 보정계수를 개발하여 Tier 2 수준에서의 메탄가스 배출량 산정이 가능하게 되었다. 그리고 Choi et al.(2018)은 벼 재배 시 중간낙수 기간에 발생한 강우를 고려한 물관리 보정인자를 적용하여 전국의 행정구역 단위의 메탄 배출량을 지도화하였다.

논벼에서의 메탄가스 배출량에 영향을 주는 요소 중 볏짚과 같은 유기물은 논에서의 메탄 배출량을 증가시키는 중요한 요소 중 하나이다(Yagi et al., 1996). Ju et

al.(2013)에 따르면 볏짚을 3Mg/ha, 5Mg/ha, 7Mg/ha을 사용한 경우 무시용에 비해 메탄 배출량이 46%, 101%, 190% 증가하는 것으로 나타났다. Lim et al.(2012)는 녹비를 사용한 경우의 메탄 배출량을 비교한 결과 평균 메탄 배출량이 무시용에 비해 녹비의 경우 약 164% 증가하였다.

따라서 볏짚과 같은 유기물의 사용에 대한 조사는 메탄 배출량 평가에 중요한 요인이다. 그러나 유기물과 관련된 자료는 부족한 상황이다. Jeong et al.(2010)은 우리나라 경종분야의 메탄가스 배출량을 평가하는데 통계자료가 부족하여 볏짚 환원율을 전문가들의 협의를 통해 20%로 결정하여 사용하였다. 현재에는 볏짚 환원에 대한 자료는 조사하고 있으나(ME, 2020), 볏짚 외 다른 유기물에 대한 자료는 부족하다. 녹비의 경우 볏짚과 마찬가지로 메탄가스 배출에 큰 영향을 미치며 국가고유 온실가스 배출계수 중 유기물 보정계수로 승인된 항목 중 하나이지만 통계자료의 부족으로 현재 우리나라의 벼 재배 부문 메탄가스 배출량 산정에는 유기물 중 볏짚환원에 대해서만 고려를 하고 있다(ME, 2020).

또한 메탄가스 배출량을 산정은 농림어업조사 및 농림어업총조사의 통계자료를 이용하고 있는데(ME, 2020), 농림어업조사 및 농림어업총조사는 방문 및 인터넷조사를 통해 수집되고 있어 많은 시간과 인력이 소모된다(KOSTAT, 2015; KOSTAT, 2020). 이를 해결하기 위한 방안 중 하나로 고해상도 영상의 사용이 있다. 고해상도 영상은 토지 피복도 및 토지 이용도 제작에 사용되고 있다(Ku and Jang, 2006; Lee et al., 2012). 고해상도 영상을 얻는 방법 중 하나로 드론을 이용하는 방법이 있다. 드론을 이용하여 항공촬영을 하는 방법은 경제적이고 비행과 촬영제약이 적다는 장점이 있다(Kang, 2017). Park et al.(2020)은 논벼 메탄가스 배출량 산정방법을 개선하기 위해 드론을 이용하여 합천, 김제, 당진에서 겨울철 논벼의 볏짚 환원과 유기물 사용 자료를 수집하고 메탄 배출량을 산정하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 드론을 사용하여 국내 지역별 논에서의 고해상도 영상을 촬영한 후 각 영상의 볏짚 사용 및 동계작물 재배 현황을 조사하여 메탄가스의 배출량을 산정하고, 기존의 방법으로 산정한 메탄가스 배출량과 비교하여 지역별 특성을 분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 지역 선정 및 드론 영상 촬영

본 연구의 대상 지역은 전국에서 논벼의 비중이 높은

지역을 대상으로 선정하였다. 이를 위해 우선 농업 재배 면적 중 논 면적의 비율이 50% 이상인 시군을 추출하고, 선정된 시군 내의 논 비중이 큰 동·리를 대상으로 150ha 이상의 들녘 단위를 무작위로 선정하여 총 35개 대상 지역을 선정하였다(Figure 1). 2018년 조사는 전국을 충청, 전라, 경상권역으로 각 6개소를 대상으로 하였고, 2019년은 경기·충청권역을 중심으로 논 비중이 큰 주요 시·군을 대상으로 17개소를 선정하여 조사하였다. 전국 단위로 많은 지구를 한 번에 조사하는데 여건상 제약이 있어, 지역별 및 연차별로 순차적으로 대상지구를 확대하여 선정하였다. 이에 본 연구에서는 대상 지구의 벗짚 등 유기물 관행이 연차별로 변화가 없는 것으로 가정하고, 2018년과 2019년 자료를 통합하여 지역별 특성 분석에 활용하였다.

대상 지역의 영상자료는 하계와 동계 두 시기로 구분하여 수집하였다. 하계영상 수집은 본 연구의 목적인 논 메탄가스 배출량 산정을 위해 우선 대상 지역 중 논 필지를 구분할 목적으로 수행하였다. 논 필지를 구분하기 위해 벼가 충분히 성장하여 육안으로 벼와 기타작물을 구분할 수 있는 7월 말부터 8월 초에 걸쳐 영상을 수집하였다. 동계영상은 벼 수확 후 벗짚의 토지환원이나 동계작물 재배 여부를 확인할 수 있는 겨울철인 1월(2018년)과 2월(2019년)에 걸쳐 하계영상 수집구역과 동일한 지역을 대상으로 수집하였다.

대상 지역의 고해상도 영상을 촬영하기 위해 사용된 드론은 SenseFly사의 eBee Drone(eBee Classic, SenseFly, Switzerland)을 이용하였다. 드론의 촬영지역과 비행경로 등을 설정하기 위해 eMotion 2(eMotion 2 Ver. 2.4.12, SenseFly, Switzerland) 프로그램을 사용하였다. 영상을 촬영한 후 Pix4Dmapper Pro(Educational Ver. 4.2.26, Pix4D, Switzerland) 프로그램을 이용하여 하나의 영상으로 합성하였다. 드론 합성 영상의 해상도는 5×5cm/pixel이다.

2. 논 필지 구분

메탄가스는 유기물이 혐기조건에서 분해되면서 배출되는데, 농경지에서는 담수 상태로 재배되는 논에서 일반적으로 발생한다. 따라서 하계에 촬영된 드론 영상을 통해 대상지역의 논 필지를 구분하였다. 이를 위해 먼저 농림축산식품부에서 제공하는 2018년 팜맵을 이용하여 대상지구의 필지 경계를 구분하였다. 즉, 팜맵에서 제공하는 필지 경계를 벡터파일로 저장한 다음 해당 필지의 여름철 드론 영상과 비교해 육안으로 벼가 재배되는 필지를 논으로 구분하였다. Figure 2는 원주시(8번 지구)의 여름철 드론 영상을 분석한 것으로 드론 영상에서 논에 해당하는 필지를 구분하였다. 2018년 하계 촬영지역 중 기상 악화로 영상 촬영을 하지 못한 충청남도 서천군에 위치한 대상지구(16번 지구)는 팜맵에서 논으로 분류된 필지를 적용하였다.

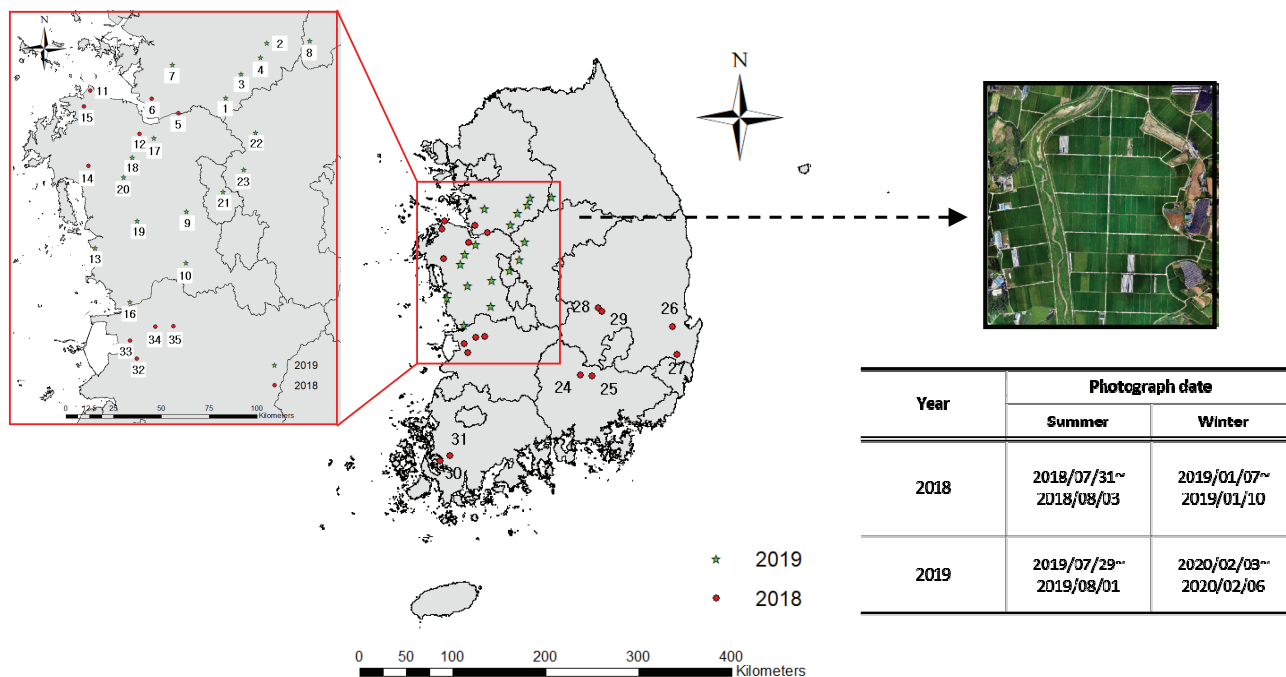


Figure 1. Location and investigation time of the study sites



Figure 2. Example images of (a)drone photograph in summer and (b)the resulting paddy area(Gangwon-do Wonju-si, site 8)

3. 볏짚 환원 및 동계작물 재배 필지 구분

겨울철에 논에서 메탄가스 배출과 관계되는 유기물의 관리는 크게 볏짚관리와 동계작물 재배로 구분할 수 있다. 따라서 동계에 촬영된 드론 영상은 하계 드론 영상에서 논으로 구분된 필지를 다시 볏짚관리와 동계작물 재배에 따라 분류하였다. 볏짚은 수확 후 곤포로 수거하여 조사료로 활용하거나 벼 수확 시 파쇄하여 논에 환원하는 두 가지 형태가 있다. 그리고 벼 수확 후 이듬해 이앙기 전까지 청보리, 밀 등 동계작물을 배재하는 이모작 필지를 확인하였다. 이밖에도 겨울철에 축분 퇴비를

사용하는 필지도 현장조사를 통해 일부 확인할 수 있었다. 축분 퇴비의 사용은 메탄가스 배출에 큰 영향을 미치지 않아(Ko et al., 1996; Lim et al., 2012), 볏짚 관리 형태와 동계작물 재배 필지만을 대상으로 구분하였다. 볏짚의 수거 또는 환원과 동계작물의 재배 여부를 확인하기 위해 1월 또는 2월에 촬영한 동계영상으로 육안 분석하였다. 우선 유기물 관리 형태별로 특정 필지에 대해 현장에서 카메라로 촬영한 사진과 해당 필지의 드론 영상을 추출하여 필지별 볏짚 관리 및 동계작물 재배 분류표를 Table 1과 같이 작성하였다. 현장 사진처럼 논에 볏짚이 수거된 경우를 대조구로, 갈린 볏짚이 많이 뿌려

Table 1. Drone-image-based identification of rice straw application & winter cropping areas

Item	Drone image	Field photo
Control (No rice straw application and winter crop cultivation)		
Rice straw application		
Winter crop cultivation		

저 있는 경우를 벗짚 시용, 작물이 자라고 있는 경우를 동계작물 재배로 분류하였다(Table 1). 작성된 분류표를 기준으로 현장 사진을 촬영하지 않은 필지들의 겨울철 드론 영상을 분류하였다. Figure 3은 원주시(8번 지구)의 겨울철 드론 영상을 분석한 것으로 Figure 2에서 논으로 구분된 필지들을 대조구, 벗짚 시용, 동계작물 재배로 구분하였다.

4. 메탄가스 배출량 산정

가. 현행 메탄가스 배출량 산정방법

IPCC(2019)는 단위 면적당 매일 배출되는 메탄가스 배출량에 벼의 재배기간과 재배면적을 곱하여 연간 메탄가스 배출량을 계산한다. 메탄가스 배출량을 산정식은 다음의 식 (1)과 같다(IPCC, 2019).

$$CH_{4Rice} = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \times 10^{-6}) \quad (1)$$

여기서 CH_{4Rice} 는 연간 메탄가스 배출량(Gg CH₄/yr), $EF_{i,j,k}$ 는 i, j, k 조건의 일 배출계수(kg CH₄/ha/day), $t_{i,j,k}$ 는 i, j, k 조건의 벼 재배기간(day), $A_{i,j,k}$ 는 i, j, k 조건의 벼 재배면적(ha/yr)이다.

이때 일 배출계수는 메탄가스의 배출에 영향을 미치는 물 관리방법, 유기물 관리방법, 토양, 품종 등의 요인에 따른 보정계수의 곱하여 산정하는데, 수식은 다음 식 (2)와 같다(IPCC, 2019).

$$EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \times SF_s \times SF_r \quad (2)$$

여기서 EF_c 는 기본배출계수(kg CH₄/ha/yr), SF_w 는 재

배기간 중 물관리 보정계수, SF_p 는 재배기간 전 물관리 보정계수, SF_o 는 유기물 보정계수, SF_s 는 토양 보정계수, SF_r 는 벼 품종 보정계수이다.

환경부(ME, 2020)에서는 벼 재배 부문의 메탄가스 배출량을 산정할 때 IPCC 가이드라인의 방법을 사용한다. 이때 기본배출계수, 벼 재배기간 중 물관리 보정계수, 유기물 시용 보정계수를 이용하며, 재배기간 전 물관리, 토양, 품종 등은 통계자료의 부족으로 적용되지 않는다.

기본배출계수는 국가고유 배출계수로 승인된 2.32kg CH₄/ha/day를 사용하며, 상시담수재배 조건과 유기물 무시용, 즉 벗짚 수거를 기준으로 산정한 메탄가스 배출량이다. 물관리 방법에 대한 보정계수는 상시담수, 중간낙수가 있는 간단관계, 천수담수로 나누어 국가고유 배출계수로 승인된 값을 사용한다(Table 2). 유기물 시용 보정계수는 지역의 벗짚 환원량에 따라 다른데, 농촌진흥청(RDA, 2017)의 표준 벗짚 시용량 6ton/ha를 적용하여 2.5의 벗짚 시용 보정계수를 일반적으로 적용하고 있다(Table 3). 벼 재배면적은 해당연도부터 2년 전까지의 3년 평균 벼 재배면적의 통계자료를 이용한다. 재배기간 중 물 관리 방법에 따른 재배면적과 유기물 시용에 따른 재배면적은 통계청(KOSTAT, 2018; 2019)의 농림어업조사와 농림어업총조사의 마이크로데이터를 사용하여 비율을 산정하여 이용한다(Table 2). 유기물 시용 면적은 농림어업조사의 마이크로데이터에서 벼 수확 후 잔사를 비료로 활용하는 비율을 사용하며(ME, 2020), 2018년 기준 유기물을 사용하지 않는 비율은 44.38%, 사용하는 비율은 55.62%로 나타났다(Table 3).

나. 메탄가스 배출계수 산정

본 연구는 기존의 메탄가스 배출계수 산정방법에서 이용한 유기물 시용 보정계수와 다른 배출계수를 적용하

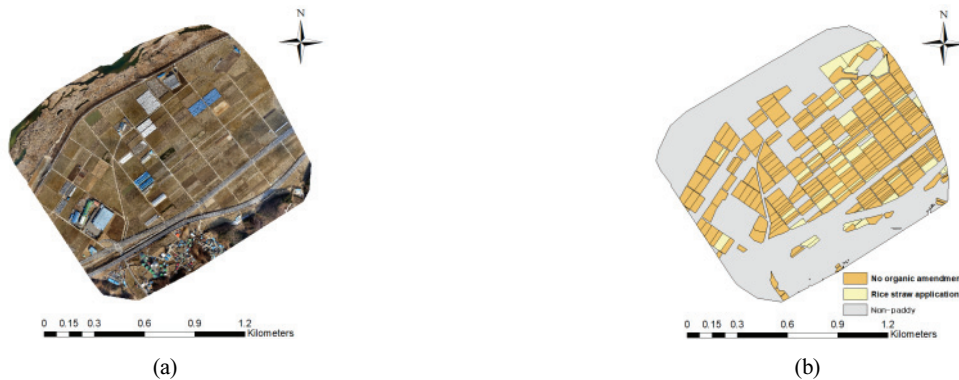


Figure 3. Example images of (a)drone photograph in winter and (b)the identified organic amendment (Gangwon-do Wonju-si, site 8)

였다. 기본배출계수와 재배기간 중 물 관리 보정계수는 기존 메탄가스 배출량 산정방법과 동일하였다. 즉, 기본배출계수 2.32kg CH₄/ha/day에 Table 2에서 제시한 물관리 보정계수와 적용 비율을 모든 지역에 동일하게 적용하였다. 유기물 사용 보정계수는 기존 방법과 달리 볏짚 환원과 동계작물 재배로 구분하여 환원량 및 투입량에 따라 보정계수를 결정하고, 본 연구에서 드론 영상으로 볏짚 환원과 동계작물 재배가 확인된 필지에 대해 적용하여 메탄가스 발생량을 산정하였다.

Table 4는 본 연구에서 적용한 유기물 보정계수를 나타낸다. 볏짚의 실제 환원량은 영상으로 정량적으로 분석하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 드론 영상을 이용하여 필지단위로 볏짚을 조사료로 수거하는 경우와 파쇄하여 논토양에 환원하는 경우를 구분하였다. 볏짚은 파

쇄하여 각 필지의 논에서 생산되는 볏짚이 다시 환원되므로 지역별 볏짚 생산량 만큼이 논토양에 환원되는 것으로 가정하였다. 따라서 Table 4에 제시한 통계청(KOSTAT, 2020)의 지역별 볏짚생산량 통계자료를 볏짚 환원량으로 적용하고, Table 3의 기준에 따라 보정계수를 결정하였다. 즉, Table 4에 제시한 것처럼 경기도, 충청남·북도, 전라남·북도, 경상북도, 강원도는 볏짚 환원량이 5-7Mg/ha의 범위로 보정계수 2.5를 적용하고, 경상남도 지역은 환원량이 7.02Mg/ha로 보정계수 3.4를 적용하였다. 동계작물은 주로 청보리, 밀 등 사료작물이 주로 많았고, 일부 양파 등이 재배되고 있음을 현장조사를 통해 확인하였다. 이들 동계작물은 수확 후 그루터기와 뿌리 등 잔여 유기물이 토양으로 환원된다는 의미에서 녹비 사용 보정계수에 준용하여 적용하였다. 동계작물에

Table 2. Water regime scaling factor for the CH₄ emission estimation(ME, 2014; KOSTAT, 2018; KOSTAT, 2019)

Water regime scaling factor(SF_w)		Value	Statistical data	
			2018	2019
Continuously flooded		1.00	12.7%	12.95%
Drainage	1 week	0.83	9.5%	7.79%
	1~2 weeks	0.66	38.7%	38.35%
	2 weeks more	0.49	38.4%	40.33%
Rainfed		0.40	0.7%	0.59%

Table 3. Organic amendment scaling factor for the CH₄ emission estimation(ME, 2014; 2020)

Organic amendment scaling factor(SF_o)		Value	Area ratio (2018)
Straw incorporated	1-3 Mg/ha	1.20	-
	3-5 Mg/ha	1.70	-
	5-7 Mg/ha	2.50	55.62%
	7+ Mg/ha	3.40	-

Table 4. Organic matter application amount and scaling factors for the CH₄ emission estimation

Organic type	Amendment amount (Mg/ha)	Scaling factor
Rice straw application (KOSTAT, 2020)	Gyeonggi-do	2.5
	Gangwon-do	
	Chungcheongnam-do	
	Chungcheongbuk-do	3.4
	Gyeongsangnam-do	
	Gyeonsanbuk-do	2.5
	Jeollanam-do	
	Jeollabuk-do	
Winter crop cultivation (Kim et al., 2017)	1.5	1.98

의한 잔여 유기물 또한 벗짚 환원량과 마찬가지로 드론 영상으로 확인하기는 어려워 가장 널리 재배되는 사료작물 중 하나인 이탈리아 라이그라스를 기준으로 보정계수를 결정하였다. Kim et al.(2017)에 의하면 이탈리아 라이그라스는 수확 후 잔여물의 건중량이 1.5Mg/ha로, 이를 드론 영상으로 확인한 동계작물 재배 필지에 대해 보정계수를 1.98로 적용하여 메탄 발생량을 산정하였다(Park et al., 2020).

벼의 재배일수는 품종에 따라 달라진다. 벼는 크게 조생종, 중생종, 중만생종으로 나뉘며, 각각 대표 품종으로는 해당쌀, 해품벼, 삼광벼가 있다. 세 품종의 벼의 분담 생육일수는 각각 112일, 119일, 129일이다. 본 연구에서는 대상 지역에서 재배되는 벼의 품종을 확인할 수 없어 세 품종의 평균 생육일수인 120일을 벼 재배기간으로 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 드론 영상 기반 필지 구분

가. 하계 논 필지 구분

대상지역별 논과 논 이외의 면적을 추출하여 Table 5에, 논 면적과 촬영면적 대비 비율의 분포를 box plot으로 Figure 4에 제시하였다. 드론 촬영면적은 지역에 따라 113.7~226.9ha의 범위로 평균 180.2ha이었다. 촬영면적 중 논 면적은 55.1~170.8ha로 평균 118.9ha이었다. 드론 촬영 면적에 대한 논 면적의 비율은 평균 66.6%였으며, 권역별로 구분하여 보면 전라남·북도와 충청남도에서 70% 이상으로 상대적으로 높게 나타났다(Table 5). 특히 전라북도의 경우 촬영지역의 83%가 논으로 다른 지역에 비해 논의 비율이 높게 나타났다.

Table 5. Total photographed area and paddy area for study sites

unit : ha

Region	Site(No.)	Study area	Paddy area	Region	Site(No.)	Study area	Paddy area	
Gyeonggi-do	Anseong(1)	193.5	128.9(67%)	Chungcheongbuk-do	Sejong(21)	147.6	55.1(37%)	
	Yeoju(2)	226.9	97.5(43%)		Jincheon(22)	172.4	100.5(58%)	
	Yongin(3)	213.5	97.9(46%)		Cheongju(23)	177.3	144.1(81%)	
	Icheon(4)	213.1	109.9(52%)	Sub-mean		165.8	99.9(60%)	
	Pyeongtaek(5)	187.4	142(76%)	Gyeongsangnam-do	Hapcheon(24)	136.9	57.7(42%)	
	Pyeongtaek(6)	186.2	110.5(59%)		Hapcheon(25)	187.1	121.2(65%)	
	Hwaseong(7)	166.9	90.3(54%)	Sub-mean		162.2	89.4(55%)	
Sub-mean		198.2	111.0(56%)	Gyeongsangbuk-do	Gyeongju(26)	113.7	93.1(82%)	
Gangwon-do	Wonju(8)	191.9	82.9(43%)		Gyeongju(27)	210.4	110.3(52%)	
Sub-mean		191.9	82.9(43%)		Gumi(28)	205.5	114.5(56%)	
Chungcheongnam-do	Gongju(9)	184.5	110.8(60%)		Gumi(29)	137.1	89.9(66%)	
	Nonsan(10)	191.4	153.1(80%)	Sub-mean		166.7	102.0(61%)	
	Dangjin(11)	170.2	144.3(85%)	Jeollanam-do	Yeongam(30)	178.5	120.5(68%)	
	Dangjin(12)	165.1	138.8(84%)		Yeongam(31)	166.3	138.8(83%)	
	Boryeong(13)	191.7	146.8(77%)	Sub-mean		172.4	129.7(75%)	
	Seosan(14)	174.5	129.6(74%)	Jeollabuk-do	Gimje(32)	158.3	134.7(85%)	
	Seosan(15)	174.6	146.4(84%)		Gimje(33)	152.9	128.4(84%)	
	Seocheon(16)	192	170.8(89%)		Iksan(34)	175.9	133.7(76%)	
	Asan(17)	200.5	161.2(80%)		Iksan(35)	158.9	140.8(89%)	
	Yesan(18)	206.6	124.3(60%)	Sub-mean		161.5	134.4(83%)	
	Cheongyang(19)	183	73.5(40%)					
Hongseong(20)	215.5	117.5(55%)						
Sub-mean		187.5	134.8(72%)					
Overall mean		180.2	118.9(66%)	Standard deviation		24.8	27.7	

* Values in () represent the percentage of paddy area to respective study site areas.

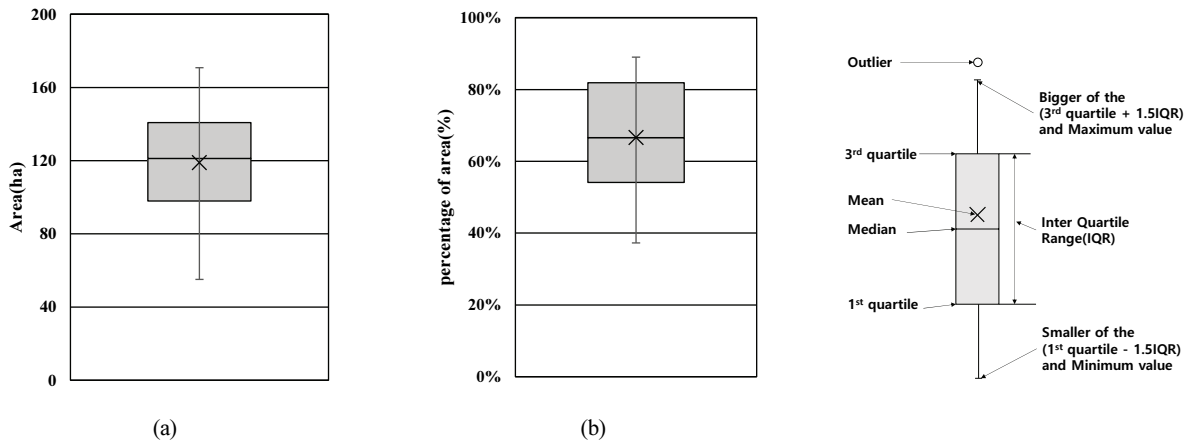


Figure 4. Box plot of (a)paddy area and (b)their percentage to respective study area

나. 동계 볏짚 환원 및 동계작물 재배지 구분

대상지역별 볏짚을 환원하는 논 면적과 동계작물을 재배하는 면적을 Table 6에, 볏짚 환원 면적과 동계작물 재배 면적의 비율의 분포를 Figure 5에 제시하였다. 권역별로 볏짚을 환원하는 논 면적은 경기도와 충청남도에서 크게 나타났다(Table 6). 경기도와 충청남·북도의 경우도 권역 내 편차가 커서 볏짚 환원의 관행이 지역별로 다른 것으로 생각된다. 권역별 동계작물을 재배하는 면적은 전라도 지역이 가장 크게 나타났다(Table 6). 이는 남부에 위치하는 전라남·북도와 경상남도의 기후가 온화하여 동계작물의 이모작 재배가 다른 지역에 비해 쉬운 까닭으로 판단된다.

대상지역별로 분류된 논 필지 중에 볏짚 환원 및 동계작물 재배면적과 비율을 보았을 때, 볏짚을 환원하는 필지의 면적은 평균 12.0ha이고, 지역에 따라 0.8~42.7ha로 편차가 크게 나타났다(Figure 5). 볏짚을 환원하는 관행은 Jeong et al.(2010)에서 결정한 20%와 달리 본 연구 대상 지역에서는 그 비율이 평균 10%로 낮게 나타났다. 경기도 지역에서 볏짚 환원 면적 비율이 가장 높은 20%를 나타낸 반면, 충청북도와 경상남·북도, 전라남·북도는 3~8%로 미미하게 나타났다(Table 6). 이는 환경부(ME, 2020)에서 온실가스 인벤토리 계산에 적용하는 볏짚 시용 비율인 55.62%보다 전반적으로 낮게 나타났다(Table 6). 이는 기존 통계와 달리 축산 수요 증가에 따라 볏짚의 조사료 활용이 많음을 의미하고, 따라서, 메탄가스의 배출량도 일정 부분 낮게 산정될 수 있음을 나타냈다.

동계작물을 재배하는 논 면적은 평균 11.3ha로 지역별로 0~65.0ha의 범위로 나타났다(Figure 5). 동계작물은

전반적으로 전라남·북도 및 경상남도에서 상대적으로 재배비율이 높게 나타났다. 평균 동계작물 재배 면적이 큰 지역은 경상남도(30%)였지만 전라남도도 지역 내 편차가 고르게 분포하여 해당지역의 논에서 청보리 등 조사료를 중심으로 동계작물을 활발하게 재배하고 있는 것으로 조사되었다(Table 6). 동계작물 재배에 따른 유기물 공급 부분은 기존의 논 메탄가스 배출량의 산정방법에 반영되지 않았다. 따라서 동계작물의 잔여물에 의한 논 유기물 공급을 고려한다면, 특히 남부지방을 중심으로 논 메탄가스 배출량이 증가할 것으로 예상된다.

2. 연간 메탄가스 배출량 산정

대상 지역의 기존의 방법으로 계산한 메탄가스의 연간 배출량과 유기물 관리 분류결과를 고려하여 산정된 경우의 메탄가스의 단위면적 당 연간 배출량과 일 배출계수를 Table 7에, 메탄가스 배출량의 분포를 Figure 6에 제시하였다.

기존의 방법으로 계산한 경우 메탄가스의 연간 배출량은 평균 331.8kg CH₄/ha/yr, 드론 영상을 통해 볏짚 환원과 동계작물 재배를 고려한 경우 연간 배출량이 226.2kg CH₄/ha/yr로 적게 나타났다. 이는 본 연구 대상 지역을 통해 조사된 볏짚 환원 논 면적이 기존 연구에서 사용하는 비율보다 적기 때문으로 생각된다. 물론 본 연구에서 동계작물 잔여물에 의한 유기물 공급을 반영하여 메탄 배출량이 일부 증가하였다. 하지만, 볏짚 환원에 의한 보정계수가 동계작물에 비해 커서 상대적으로 볏짚 환원 비율이 줄어든 영향이 크기 때문에 메탄가스 배출량이 기존의 방법에 비해 105.6kg CH₄/ha/yr (약 32.0%) 가량 작게 산정되었다.

Table 6. Rice straw application and winter crop cultivation area for the study sites

unit : ha

Region	Site(No.)	Rice straw application	Winter crop cultivation	Region	Site(No.)	Rice straw application	Winter crop cultivation
Gyeonggi-do	Anseong(1)	22.9(18%)	0(0%)	Chungcheongbuk-do	Sejong(21)	3.9(7%)	0(0%)
	Yeouju(2)	42.7(44%)	1(1%)		Jincheon(22)	9.1(9%)	0(0%)
	Yongin(3)	15.8(16%)	0(0%)		Cheongju(23)	5.4(4%)	11.9(8%)
	Icheon(4)	13.6(12%)	0.7(1%)	Sub-mean		6.1(6%)	4(4%)
	Pyeongtaek(5)	4.7(3%)	3.8(3%)	Gyeongsangnam-do	Hapcheon(24)	5.3(9%)	7.9(14%)
	Pyeontaek(6)	20.2(18%)	0(0%)		Hapcheon(25)	8.4(7%)	45.9(38%)
	Hwaseong(7)	22.4(25%)	0(0%)	Sub-mean		6.9(8%)	26.9(30%)
Sub-mean		20.4(18%)	0.8(1%)	Gyeongsangbuk-do	Gyeongju(26)	1.8(2%)	0.3(0%)
Gangwon-do	Wonju(8)	13.3(16%)	0(0%)		Gyeongju(27)	7(6%)	0.7(1%)
Sub-mean		13.3(16%)	0(0%)		Gumi(28)	2.8(2%)	5.1(4%)
					Gumi(29)	0.2(0%)	4.6(5%)
Chungcheongnam-do	Gongju(9)	4.8(4%)	44.6(40%)	Sub-mean		3(3%)	2.7(3%)
	Nonsan(10)	17.9(12%)	5.3(3%)	Jeollanam-do	Yeongam(30)	4.1(3%)	49.8(41%)
	Dangjin(11)	6.3(4%)	0(0%)		Yeongam(31)	3(2%)	10.5(8%)
	Dangjin(12)	22(16%)	0(0%)	Sub-mean		3.6(3%)	30.1(23%)
	Boryeong(13)	34.8(24%)	3.1(2%)	Jeollabuk-do	Gimje(32)	0.8(1%)	26.1(19%)
	Seosan(14)	8.9(7%)	0(0%)		Gimje(33)	3.1(2%)	40(31%)
	Seosan(15)	5.2(4%)	0(0%)		Iksan(34)	5.5(4%)	65(49%)
	Seocheon(16)	36(21%)	48(28%)		Iksan(35)	16.5(12%)	19.3(14%)
	Asan(17)	0.7(0%)	0(0%)	Sub-mean		6.5(5%)	37.6(28%)
	Yesan(18)	10.1(8%)	0(0%)				
	Cheongyang(19)	24.6(34%)	2.2(3%)				
Hongseong(20)	16.5(14%)	0(0%)					
Sub-mean		15.6(12%)	8.6(6%)				
Overall mean		12.0(10%)	11.3(10%)	Standard deviation		24.8	27.7

* Values in () represent the percentage of paddy area to respective study site areas.

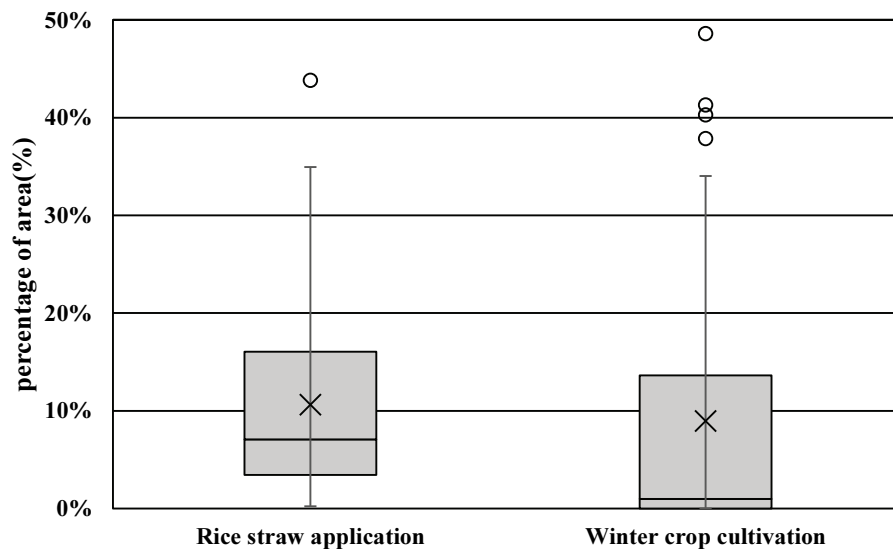


Figure 5. Percentage of rice straw application and winter crop cultivation areas over the study sites

Table 7. Yearly CH₄ emissions for the study sites

unit : ha

Region	Site(No.)	Yearly methane emission (kg CH ₄ /ha/yr)	Region	Site(No.)	Yearly methane emission (kg CH ₄ /ha/yr)
Gyeonggi-do	Anseong(1)	228.3	Chungcheongbuk-do	Sejong(21)	199.4
	Yeoju(2)	300.3		Jincheon(22)	204.8
	Yongin(3)	224.0		Cheongju(23)	204.5
	Icheon(4)	215.1	Sub-mean		202.9
	Pyeongtaek(5)	195.2	Gyeongsangnam-do	Hapcheon(24)	246.1
	Pyeontaek(6)	231.4		Hapcheon(25)	279.2
	Hwaseong(7)	247.7	Sub-mean		262.7
Sub-mean		234.6	Gyeongsangbuk-do	Gyeongju(26)	187.5
Gangwon-do	Wonju(8)	223.4		Gyeongju(27)	199.8
Sub-mean		223.4		Gumi(28)	196.2
Chungcheongnam-do	Gongju(9)	257.4		Gumi(29)	191.4
	Nonsan(10)	217.3	Sub-mean		193.7
	Dangjin(11)	198.5	Jeollanam-do	Yeongam(30)	264.3
	Dangjin(12)	225.4		Yeongam(31)	200.9
	Boryeong(13)	247.9	Sub-mean		232.6
	Seosan(14)	200.1	Jeollabuk-do	Gimje(32)	217.6
	Seosan(15)	191.2		Gimje(33)	243.6
	Seocheon(16)	286.9		Iksan(34)	279.1
	Asan(17)	181.1		Iksan(35)	237.8
	Yesan(18)	201.9	Sub-mean		244.5
	Cheongyang(19)	273.7			
Hongseong(20)	218.0				
Sub-mean		224.9			
Overall mean		226.2	Standard deviation		24.8

* Values in () represent the percentage of paddy area to respective study site areas.

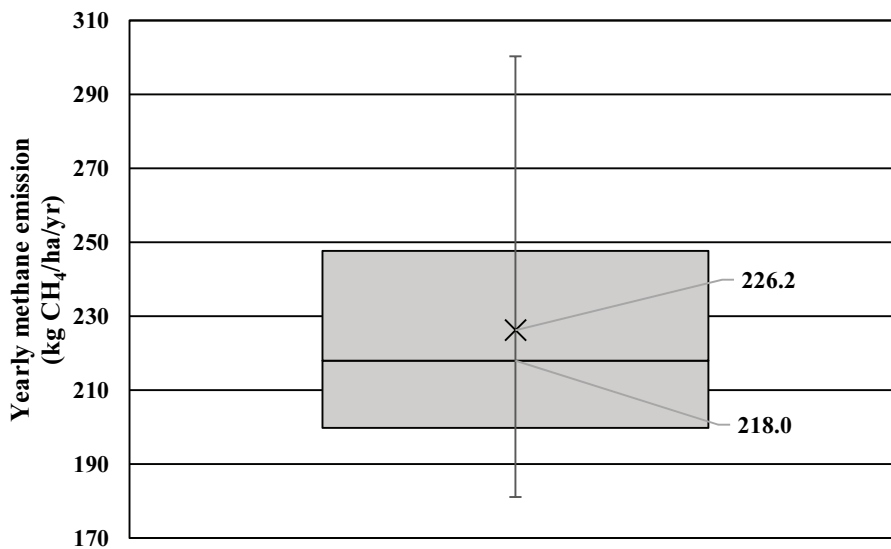


Figure 6. Box plot of the estimated yearly methane emissions over the study sites

메탄가스 배출량을 지역별로 비교하였을 때 가장 많았던 2번 지구의 메탄 배출량은 가장 적은 17번 지구의 1.66배로 산정되었다. 즉, 같은 면적이라도 지역에 따라 벗짚 환원, 동계작물 재배면적의 차이로 인해 메탄가스 배출량이 2배 가까운 차이가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 정확한 메탄가스 배출량 산정을 위해서 필지 단위로 벗짚 환원과 동계작물 재배 여부를 반영하는 것이 필요하다.

평균적으로 단위면적 당 연간 메탄가스 배출량은 상대적으로 전라남·북도와 경상남도, 경기도에서 크고, 경상북도와 충청도에서 적은 것으로 나타났다(Table 7). 이는 전라남·북도와 경상남도는 동계작물을 재배하는 논이 많고, 경기도는 벗짚을 환원하는 논이 많았기 때문이다. 반면, 경상북도와 충청도는 벗짚 환원은 물론 동계작물을 재배하는 논 면적으로 상대적으로 적었기 때문에 배출량이 적게 산정되었다. 벗짚 환원 비율이 높은 경기도만이 아니라 동계작물의 재배 비율이 높은 전라남·북도와 경상남도에서도 메탄가스의 배출량이 많이 산정되는 것은 메탄 배출량 산정 시 동계작물 재배에 영향도 고려해야 함을 보여준다. 권역 내에서도 메탄가스 배출량이 지역별로 편차가 크게 나타났다. 이는 지역 단위의 세부적인 메탄가스 배출량 평가가 필요함을 보여준다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 벗짚 환원 및 동계작물 재배를 고려하여 지역별 메탄가스 배출량을 산정하였다. 이를 위해 드론으로 하계 및 동계영상을 촬영하고, 각 영상에서 지역별 논 필지와 벗짚 수거 및 환원, 동계작물 재배 필지를 구분하였다. 그 후 기존의 방법으로 산정한 메탄 배출량과 드론 분류결과를 고려하여 산정된 메탄 배출량을 비교하였다.

먼저 하계영상을 분류한 결과 논 면적은 평균 118.9ha로 나타났다. 이는 드론의 평균 촬영면적인 180.2ha의 66.6%로, 권역별로 구분하여 보면 전라북도에서 촬영지역의 80%가 논으로 다른 지역에 비해 논의 비율이 높게 나타났다.

동계영상을 분류한 결과 벗짚을 환원하는 면적은 평균 12.0ha로 나타났다. 경기도와 충청남도에서 벗짚 환원의 비율이 높게 나타났으나 권역 내의 편차가 커 지역별 벗짚처리의 관행이 다른 것으로 보였다. 전체적인 벗짚 환원 비율은 평균 10%로 기존 방법의 통계자료인 55.62% 보다 낮게 나타났다.

동계작물을 재배하는 면적은 평균 11.3ha로 나타났다.

동계작물을 재배하는 비율은 전라남·북도와 경상남도에서 높게 나타났다. 전라남도에서는 권역 내 편차가 크게 논이 동계작물을 재배하고 있는 것으로 나타났다.

메탄가스의 연간 배출량은 기존의 방법에서 평균 331.8kg CH₄/ha/yr, 드론 영상 분류결과를 고려한 경우 평균 226.2kg CH₄/ha/yr로 드론 영상을 이용한 경우 32% 정도 적게 나타났다. 이는 드론을 통해 조사된 벗짚 환원 비율이 기존에 사용하던 비율보다 적고, 동계작물의 재배를 반영했지만 보정계수가 벗짚 환원에 비해 작아 벗짚 환원 비율이 더 큰 영향을 준 까닭이다.

권역별로 메탄가스의 배출량을 비교하면 전라남·북도와 경상남도, 경기도에서 크고, 경상북도와 충청도에서 적게 나타났다. 벗짚을 환원하는 비율이 높았던 경기도 뿐만 아니라 동계작물을 재배하는 비율이 높은 전라남·북도와 경상남도에서도 메탄가스 배출량이 많이 산정된 것은 메탄 배출량 산정 시 동계작물의 재배를 고려해야 함을 보여준다. 또한 권역 내 메탄가스 배출량의 편차가 커 지역 단위의 메탄가스 배출량 평가가 필요할 것으로 생각된다.

드론은 경제적이고 비행 및 촬영제약이 적은 항공촬영 기법으로 논에서의 벗짚 환원 및 동계작물 재배 분류를 위한 영상을 구하기 쉽다는 장점이 있었다. 그러나 드론 영상은 들녘 단위 이상의 넓은 면적의 촬영에는 어려움이 있어, 행정구역 단위의 분석을 위해서는 위성영상과 연계하는 방안의 후속연구가 필요할 것이다.

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1F1A1063327).

References

1. Choi, S. W., Kim, J., Kang, M. S., Lee, S. H., Kang, N. G., and Shim, K. M., 2018. Estimation and mapping of methane emissions from rice paddies in Korea : analysis of regional differences and characteristics. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 20(1): 88-100 (in Korean).
2. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland.

3. Jeong, H. C., Kim, G. Y., So, K. H., Shim, K. M., Lee, S. B., and Lee, D. B., 2010. Assessment on greenhouse gas(CH₄) emissions in Korean cropland sector from 1990 to 2008. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43(6) 911-916 (in Korean).
4. Ju, O. J., Won T. J., Cho K. R., Choi B. R., Seo J. S., Park I. T., and Kim G. Y., 2013. New estimates of CH₄ emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32(3): 179-184 (in Korean).
5. Kang, G. H., 2017. Aerial photography using drone. *Broadcasting and Media Magazine* 22(2) : 18-30 (in Korean).
6. Kim, G. Y., Jeong, H. C., Ju, O. J., Kim, H. K., Park, J. H., Gwon, H. S., and Kim, P. J., 2013. Establishment of baseline emission factor of methane in Korean paddy soil. *Korean Journal of Environment Agriculture* 32(4) : 359-365 (in Korean).
7. Kim, G. Y., Park S. I., Song B. H., and Shin Y. K., 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).
8. Kim, Y. G., Seong D. G., Han E. H., Cho Y. C., and Lee S. D., 2017. Effect of applicatio of unmanned helicopter on whole growing process without tillage and harvest in rice. Gyeongnam Agricultural Research and Extension Services, Jinju, Korea 27-37 (in Korean).
9. Ko, J. Y., Kang H. W., and Park K. B., 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).
10. Ku, C. Y., and Jang H. Y., 2006. Landcover classification using high-resolution satellite image with vector polygon data. *The Geograpichal Journal of Korea* 40(3) : 449-459.
11. Lee, K. D., Hong S. Y., and Kim Y. H., 2012. Farmland use mapping using high resolution images and land use change analysis. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(6): 1164-1172 (in Korean).
12. Lim, S. S., Choi W. J., and Kim H. Y., 2012. Fertilizer and Organic Inputs Effects on CO₂ and CH₄ Emission from a Soil under Changing Water Regimes. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31(2) : 104-112.
13. Ministry of Environment in Korea(ME), 2014. 2014 Greenhouse gas emission and absorpction coefficient. Greenhouse Gas Inventory and Research Center.
14. Ministry of Environment in Korea(ME), 2020. National greenhouse gas inventory report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center.
15. Nouchi, I., Mariko S., and Aoki K., 1990. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiol* 94: 59-66.
16. Park, J. S., Jang S. J., Kim H. J., Hong R. G, and Song I. H., 2020. Application of drone images to investigate biomass management practices and estimation of CH₄ emissions from paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(3) : 39-49.
17. Rural Development Administration(RDA), 2017. Standard of fertilizer input by crop. 337pp.
18. Sass, R. L., Fisher F. M., Lewis S. T., Jund M. F., and Turner F. T., 1994. Methane emissions from rice fields: effect of soil properties. *Global Biogeochemical Cycles* 8(2) : 135-140.
19. Shin, Y. K., B. L. Lee, and J. S. Suh, 1995. Influence of Soil and Air Temperature on the Diel Change of Methane Emission in a Korean Paddy Soil incorporated with Rice Straw. *Korean Jouranal of Soil Science and Fertilizer* 28(3) : 266-269.
20. Statistics Korea(KOSTAT), 2015. Guide of 2015 census of agriculture, forestry and fisheries. 228pp.
21. Statistics Korea(KOSTAT), 2018. Microdata of survey of agriculture, forestry and fisheries 2018.
22. Statistics Korea(KOSTAT), 2019. Microdata of survey of agriculture, forestry and fisheries 2019.
23. Statistics Korea(KOSTAT), 2020. Crop production survey.
24. Statistics Korea(KOSTAT), 2020. Statistical imformation report of agricultrre, forestry and fisheries. 77pp.
25. Watanabe, A., and Kimura M., 1998. Factors affecting variation in CH₄ emission from paddy soils grown with different rice cultivars: a pot experiment. *Journal of Geophysical Research* 103(15): 18947-18952.
26. Yagi, K., and Minami K., 1990. Effect of organic matter application on methae emission from some japanese paddy fields. *Soil Science and Plandt Nutrition* 36(4): 599-610.
27. Yagi, K., Tsuruta H., Kanda K., and Minami K., 1996. Effecto of water management on methane emission

from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles* 10(2): 255-267.

-
- Received 13 May 2021
 - First Revised 29 June 2021
 - Finally Revised 15 August 2021
 - Accepted 18 August 2021