Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2022;41(1):32-40, https://doi.org/10.5338/KJEA.2022.41.1.05
Published online 27 March 2022, Printed 31 March 2022

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Short Communication

Open Access

경기도 화성시 벼 재배지의 기후스마트 농업 기반의 평가

주옥정[1*], 소호섭[1], 이상우[1], 이영순[2]

[1]경기도농업기술원 연구개발국 환경농업연구과, [2]경기도농업기술원 연구개발국 작물연구과

Climate-Smart Agriculture(CSA)-Based Assessment of a Local Rice Cultivation in Hwaseong-city, Gyeonggi-do

Ok Jung Ju[1*], Hoseup Soh[1], Sang-Woo Lee[1] and Young-Soon Lee[2] ([1]Environmental Agriculture Research Division, Research and Development Bureau, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18388, Korea, [2]Crop Research Division, Research and Development Bureau, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18388, Korea)

Received: 27 January 2022/ Revised: 19 March 2022/ Accepted: 22 March 2022

Copyright ⓒ 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Ok Jung Ju
https://orcid.org/0000-0002-6345-0207

Abstract

BACKGROUND: Climate-smart agriculture (CSA) has been proposed for sustainable agriculture and food security in an agricultural ecosystem disturbed by climate change. However, scientific approaches to local agricultural ecosystems to realize CSA are rare. This study attempted to evaluate the weather condition, rice production, and greenhouse gas emissions from the rice cultivation in Hwaseong-si, Gyeonggi-do to fulfill CSA of the rice cultivation.

METHODS AND RESULTS: Over the past 3 years (2017~2019), Chucheong rice cultivar yield and methane emissions were analyzed from the rice field plot (37°13′15″N, 127° 02′22″E) in the Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services located in Gisan-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi-do. Methane samples were collected from three automated closed chambers installed in the plot. The weather data measured through automatic weather station located in near the plot were analyzed.

CONCLUSION(S): The rice productivity was found to vary with weather environment in the agricultural ecosystem. And methane emissions are high in a favorable weather condition for rice growth. Therefore, it is necessary to minimize the trade-off between the greenhouse gas emission target for climate change mitigation and productivity improvement for CSA in a local rice cultivation.

Key words: Climate-Smart agriculture, Gyeonggi-do, Methane emission, Rice cultivation

* Corresponding author: Ok Jung Ju
Phone: +82-31-229-5824; Fax: +82-31-229-5964;
E-mail: okjung3@gg.go.kr

서 론

기후스마트 농업(CSA; Climate-Smart Agriculture)은 기후변화의 새로운 현실에서 식량 안보를 위해 농업 시스템을 전환하기 위한 접근방법이다[1]. 기후스마트 농업은 변화하는 기후에 적응하며 복원력을 증진하여, 생산성과 소득을 향상시키며, 기후변화 완화를 위한 온실가스 저감까지 세 가지 목표 달성을 위한 통합적인 접근방법으로 2010년 유엔식량농업기구(FAO; Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서 제시하였다. 21세기의 광범위하고 급속한 기후변화는 지속적인 농업활동에 위기의식을 느끼게 하였으며, 기후변화로 교란되는 농업생태계에서 지속가능한 농업과 식량안보를 확보하기 위해 새로운 접근방법이 필요함을 제시한 것이다.

기후스마트 농업은 2010년에 제시된 새로운 용어이지만

Fig. 1. A picture showing the automated closed chambers system and Automatic Weather Station (AWS) located in Gyeonggi-do Agriculture Research and Extension Services.

농업 생산성을 유지·향상시키며 온실가스를 저감하는 저탄소 농업에 대한 국내 연구는 1990년대부터 이루어져 왔다. 논과 밭에서 발생하는 메탄과 아산화질소 배출량을 평가하여 토양 환경 및 기상환경에 따른 온실가스 배출 특성과 주요 배출원을 구명하여 물관리, 유기물, 비료, 녹비작물 등의 양분관리와 경운관리 및 시기에 따른 온실가스 배출량 평가 및 저감기술 개발을 개발하여 농업 활동에서 기후변화 완화를 위한 실천 기술이 국내에 많이 소개된 바 있다[2-10]. 또한 우리나라 주곡인 벼 생산성 및 적응기술에 대한 모형과 현장 평가 등을 통해 기후변화에 따라 변화하는 환경에 적응하기 위한 벼 재배방법의 변화와 신품종 육성 등이 필요함을 제시한 바 있다[11-18]. 이러한 개별적 기후변화 적응 및 완화기술 외에 2016년 한국농촌경제연구원에서 제시한 한국형 기후스마트 농업 인벤토리 가운데 농촌 현장에서 적용되며 경제적, 정책적 파급영향이 클 것으로 판단되는 기술로 논물얕게대기, 지열히트펌프, 다겹보온커튼, 맞춤형 비료, 녹비재배, 농업기상재해 조기경보시스템 등 6가지를 제시한 바 있다. 하지만 국내 소개된 기후스마트 농업 관련 기술들에서 기후 적응성, 생산성, 온실가스 저감 등 세 가지 관점의 통합적 접근방법으로 농업생태계를 평가하여 제시한 기술은 극히 드물다[19, 20]. 그러므로 본 연구에서는 기후스마트 농업 실현을 위해 선행되어야 할 벼 재배지의 농업생태계에 대한 이해를 위해 경기도 화성시 벼 재배지의 기상환경, 벼 생육 및 수량, 온실가스 배출량 세 가지 관점에서 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

시험장소 및 시험방법

본 연구는 벼 재배지 기후스마트 농업 기반의 평가를 위해 경기도 화성시 기산동에 위치한 경기도농업기술원 내 벼 재배지 시험연구포장(37°13′15″N, 127°02′22″E)에서 측정한 최근 3년(2017~2019년)의 기상자료, 메탄(CH_4) 배출량, 추청벼 생육 및 수량을 평가하였다. 연도별 추청벼 생육과 수량 및 메탄 배출량은 One-way ANOVA 분산분석과 Duncan 검정하였다. 기상자료는 벼 재배지 주변에 설치된 자동기상관측장비(AWS; Automatic Weather Station)로 관측한 평균·최고·최저기온, 지온, 일조시간 등을 분석하였으며, 메탄 배출량은 벼 재배지 시험포장에 3개 설치한 폐쇄형 자동 챔버에서 채취하여 분석하였다(Fig. 1). 시험 전 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 유기물 함량은 23 g/kg으로 벼 재배에 적당한 함량(20~30 g/kg)이며, 배수가 약간 불량인 미사질 양토이다.

시험에 처리한 화학비료는 벼 재배 표준시비량 기준으로 3요소 N-P_2O_5-K_2O = 90-45-57 kg/ha으로 시용하였다. 볏

Table 1. Physico-chemical properties of the rice paddy used in the experiment

pH (1:5)	OM (g/kg)	Av. P_2O_5 (mg/kg)	Av. SiO_2 (mg/kg)	Ex. Cations ($cmol_c$/kg)			Soil texture
				K	Ca	Mg	
6.3	23	53	217	0.59	8.0	1.6	Silt loam

짚은 전년도에 수확된 생볏짚을 가을에 콤바인으로 절단하여 토양에 시용 후 경운하였으며, 볏짚의 전질소(T-N) 함량은 1.0%, 전탄소함량(T-C)은 32.2%로 탄질비는 32.2이었다. 화학비료 처리의 경우 N은 요소, P_2O_5는 용과린, K_2O는 염화칼리로 각각 시용하였으며, N은 기비 50%, 분얼비 20%, 수비 30%로 분시하였고, 인산은 전량 기비, 칼리는 기비 70%, 수비 30%로 각각 분시하였다. 시험에 사용한 벼 품종은 경기도 내에서 가장 많이 재배하는 중만생종 추청벼로서 30×15 cm의 이앙거리로 중묘를 5월 20일 전후로 기계이앙 하였으며, 물 관리는 수확 2주전까지 상시담수를 유지하였다.

메탄 채취 및 분석방법

메탄 포집용 폐쇄형 자동 챔버는 135 m^2 (5 × 27 m) 면적의 벼논에 3개의 폐쇄형 자동 챔버(60 × 60 × 120 cm)를 벼 이앙 후 설치하였으며, 챔버 내에는 묘가 3본씩 8주가 식재되도록 조절하였다. PC (Polycarbonate) 소재 폐쇄형 자동 챔버는 챔버 상단의 문 개폐를 위한 전동실린더가 설치되어 통신으로 챔버 상단의 문 개폐를 자동으로 할 수 있으며, 테프론(Teflon) 튜브 샘플링 라인이 시험포장에서 약 3 m 떨어진 온실가스 분석실까지 이어져 진공펌프와 유량조절기를 이용하여 가스 포집과 분석기기까지 시료이송을 자동으로 할 수 있는 챔버이다(Fig. 1). 가스 포집은 주 2회, 매회 오전 10~11시 사이에 진공펌프와 유량조절기에 의해 200 mL/min의 일정한 유속으로 1분 30초간 온실가스 샘플 포집기(30 mL pyrex 관) 안으로 지나가며 약 10초간 약 30 mL의 가스 시료가 포집되어 온실가스 분석기에서 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, 논물로부터 챔버 상단까지 유효높이를 조사하여 Eq. 1에 준하여 CH_4 배출량 F (Flux)를 산정하였다. F는 단위시간 당 단위면적에서 배출되는 CH_4의 양($mgCH_4/m^2/hr$), ρ는 CH_4의 밀도를 고려한 변환계수(mg/m^3, $\rho CH_4 = 0.714$), h는 챔버 내부 유효높이(논물로부터의 높이, m), $\Delta c/\Delta t$는 챔버 내부 CH_4 농도의 평균증가속도(ppmv/hr), T는 챔버 내부 평균기온(K)이다. CH_4 분석은 12 port gas sampling valve가 장착된 GC-FID (Gas Chromatography-Flame Ionization Detector, Varian 450 GC, Scion instruments, USA)로 분석하였으며, 컬럼은 Porapack Q(80/100 mesh)이 충전된 1/8″ × 3 m의 stainless steel tubing 컬럼이며 검출기 온도는 250℃, 운반기체(carrier gas)는 질소(N2)로 유속을 분당 30 mL로 조절하였다.

$$F = \rho \times h \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \quad (1)$$

토양분석 및 기타 조사방법

토양 분석은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법(2000)에 따라 토양분석용 시료는 일체형 오가(직경 30 mm, EiJkelkam, Giesbeek, Netherlands)를 이용하여 15 cm 깊이로 토양을 채취하여 풍건한 후 2 mm 체를 통과시켜 분석하였다. 토양 pH는 증류수와 1:5 (W/V)로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 370, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 측정하였으며, 유기물(OM)은 Tyurin법, 유효인산(Av.P_2O_5)은 Lancaster법으로 분석하였다. 토양의 치환성 양이온(Exchangeable cations)은 1N-NH_4OAC (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 발광광도계 (ICP-OES; Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, Integra XMP, GBC Scientific Equipment Ltd., Australia)로 정량하였다. 토양 산화환원전위(Eh)는 백금전극을 토심 15 cm 깊이에 묻고 Eh 미터(Ecoscan, Eutech)을 이용하여 측정하였다. 총질소와 총탄소는 CNS 원소분석기(Vario MAX CNS, Elementar, Germany)로 분석하였다. 벼 생육 및 수량은 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준(2012)에 따라 조사하였다. 생육은 벼 이앙 후 30일, 60일의 초장과 분얼수를 조사하였으며, 초장은 지면에서 최장엽 선단까지의 길이를, 분얼수는 주간을 포함하지 않은 2엽 이상 출현된 얼자수를 각각 20주 3반복으로 조사하였다. 수량은 출수 후 60일이 경과한 시점에서 조곡을 수확한 후 수분함량을 15%를 기준으로 계측한 후 환산하였으며 현미는 제현기(FC2K, Yamamoto, Japan)를 이용하였고, 백미기(Toyo rice cleaning machine, JP/MC-90A, Japan)를 이용하여 10분도로 도정하여 수량분석 시료로 사용하였으며, 모든 시료는 3반복으로 조사하였다.

결과 및 고찰

경기도 화성시 벼 재배지의 기상환경

경기도 화성시 벼 재배지의 최근 3년(2017~2019년) 기상환경 분석을 위해 벼 재배기간 6~9월까지의 매월 평균·최고·최저기온 변화를 분석하였다(Fig. 2). 연도별 평균기온 6월은 23.0±2.1℃ (2017년), 23.2±1.4℃ (2018년), 22.7±1.6℃ (2019년), 7월은 27.1±1.6℃ (2017년), 28.1±3.0℃ (2018년), 26.0±1.8℃ (2019년), 8월은 25.9±3.0℃ (2017년), 28.8±3.2℃ (2018년), 27.5±2.6℃ (2019년), 9월은 21.4±1.9℃ (2017년), 21.3±2.4℃ (2018년), 22.5±2.4℃ (2019년)을 나타냈다(Fig. 2a). 연도별 평균 최고기온 6월은 30.7±3.4℃ (2017년), 30.4±2.8℃ (2018년), 29.9±2.5℃ (2019년), 7월은 31.5±3.3℃ (2017년), 34.2±4.4℃ (2018년), 31.4±3.0℃ (2019년), 8월은 30.8±3.8℃ (2017년), 34.6±4.3℃ (2018년), 33.6±3.1℃ (2019년), 9월은 28.2±2.2℃ (2017년), 27.2±3.0℃ (2018년), 28.3±3.2℃ (2019년)을 나타냈다(Fig. 2b). 연도별 평균 최저기온 6월은 16.9±2.7℃ (2017년), 17.6±2.0℃ (2018년), 17.0±2.3℃ (2019년), 7월은 23.9±1.4℃ (2017년), 23.4±2.3℃ (2018년), 21.9±2.6℃ (2019년), 8월은 22.3±3.2℃ (2017년), 24.4±2.7℃ (2018년), 22.9±2.6℃ (2019년), 9월은 15.8±3.0℃ (2017년), 16.3±3.4℃ (2018년), 18.1±3.6℃ (2019년)을 나타냈다(Fig. 2c). 벼 재배기간 동안(6~9월)의 평균기온은 24.3±2.6℃ (2017년), 25.3±3.7℃ (2018년),

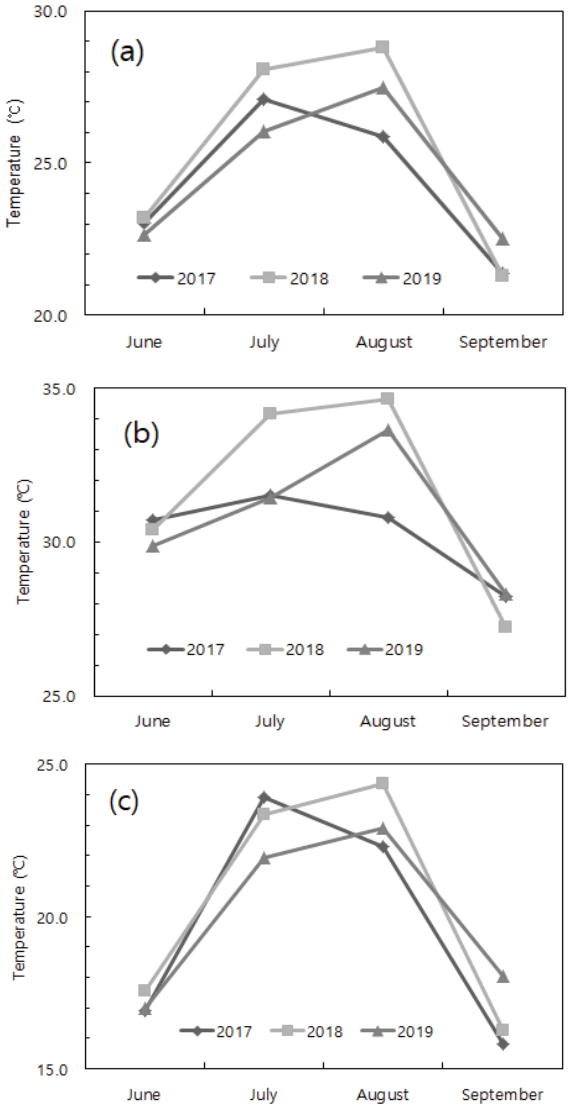

Fig. 2. Variation of the monthly mean temperature (a), maximum temperature (b), and minimum temperature (c) in June, July, August, and September in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the 3 years.

24.7±2.5℃ (2019년)을, 평균 최고기온은 30.3±5.6℃ (2017년), 31.6±6.6℃ (2018년), 30.8± 6.0℃ (2019년)을 나타냈고, 평균 최저기온은 19.7±4.0℃ (2017년), 20.4±4.1℃ (2018년), 20.0±2.9℃ (2019년)을 나타냈다. 벼 재배기간 동안(6~9월) 평균지온은 24.0±2.2℃ (2017년), 24.2±3.0℃ (2018년), 23.8±2.3℃ (2019년)을 나타냈고, 지온의 변화는 기온의 변화와 유사한 경향을 나타냈으며, 3년 동안의 변화는 적었다(Fig. 3).

경기도 화성시 벼 재배지의 최근 3년(2017~2019년) 월 누적일조시간과 월 평균일조시간 변화는 Fig. 4와 같다. 연도별 월별 평균 일조시간은 각각 6월 9.6±2.6시간(2017년), 8.6±3.7시간(2018년), 8.4±2.5시간(2019년), 7월 4.9±4.1시간(2017년), 8.8±4.1시간(2018년), 5.4±4.0시간(2019년), 8월 5.7±4.3시간(2017년), 7.7±3.8시간(2018년), 7.9±3.1시간

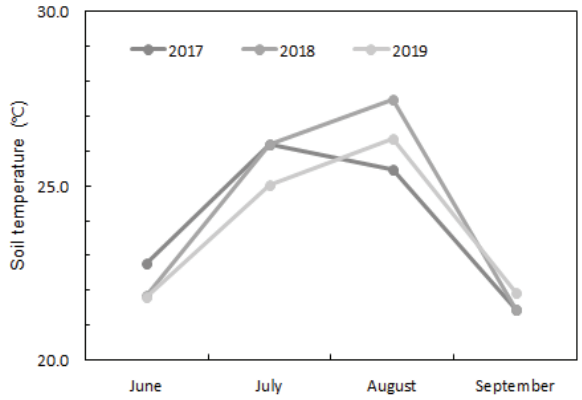

Fig. 3. Variation of the monthly mean soil temperature in June, July, August, and September in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the 3 years.

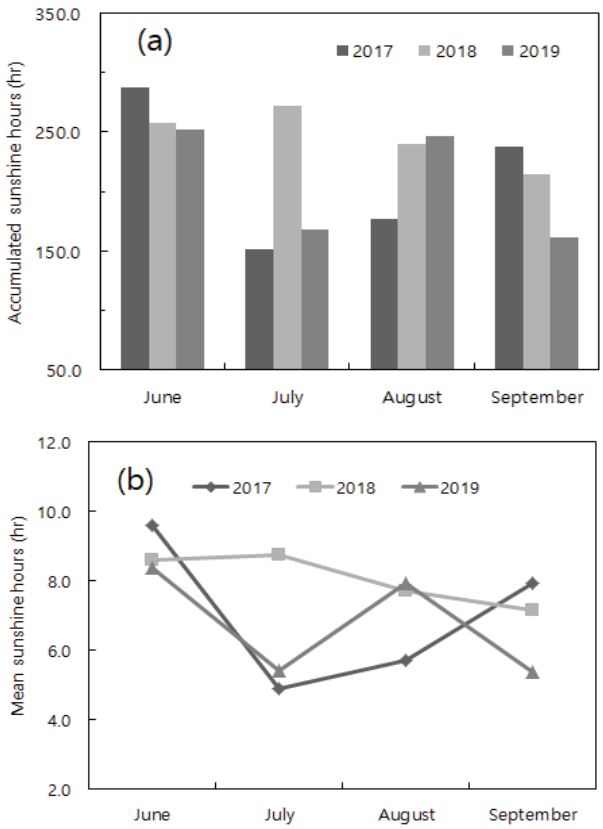

Fig. 4. Variation of the monthly accumulated sunshine hours (a) and mean sunshine hours (b) in June, July, August, and September in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the 3 years.

(2019년), 9월 7.9±3.9시간(2017년), 7.1±4.2시간(2018년), 5.4±4.5시간(2019년) 이다. 벼 재배기간 동안(6~9월) 월 평균 누적일조시간은 213.6±61.4시간(2017년), 245.7±24.8시간(2018년), 206.7±49.0시간(2019년)으로 2018년에 가장 많고 연차별 편차는 가장 적었으며, 연도별 월별 누적일조시간은 2017년 6월에 가장 많았다. 벼 재배기간 평균일조시간은 7.0±2.1시간(2017년), 8.1±0.8시간(2018년), 6.8±1.6시간

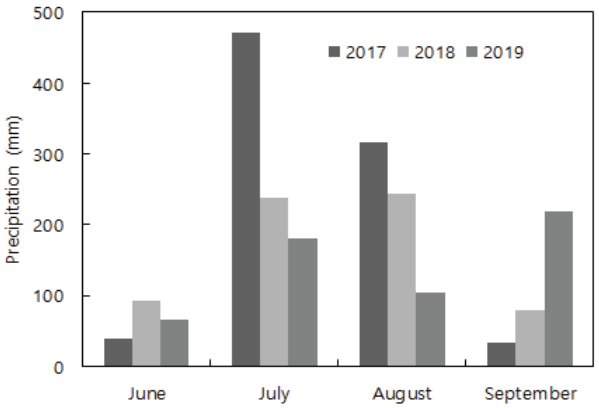

Fig. 5. Variation of the monthly precipitation in June, July, August, and September in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the 3 years.

(2019년)으로 누적일조시간과 같이 2018년에 평균일조시간이 가장 많고 연차별 편차는 가장 적었으며, 연도별 월별 평균일조시간도 2017년 6월에 가장 많았다. 한편 최근 3년 월강수량 변화는 Fig. 5와 같다. 벼 재배기간 동안(6~9월) 강수량은 860.2±216.4 mm (2017년), 652.8±89.2 mm (2018년), 571.1±69.3 mm (2019년)을 나타냈다.

경기도 화성시 벼 재배지의 벼 생육 및 수량

2017년부터 2019년까지 최근 3년간 경기도 화성시 벼 재배지에서 조사한 추청벼의 생육시기별(이앙후 30일, 60일: DAT30, DAT60) 초장과 분얼수 변화는 Fig. 6과 같다. 연도별 벼 이앙 후 30일 초장은 28.7 cm (2017년), 33.6 cm (2018년), 30.4 cm (2019년)로 2018년에 가장 컸으나, 벼 이앙 후 60일 초장은 71.6 cm (2017년), 70.1 cm (2018년), 63.9 cm (2019년)으로 2017년에 가장 컸다. 벼 이앙 후 30일 분얼수는 2017년에 17.0개로 가장 많았으며, 벼 이앙 후 60일 분얼수는 2019년에 18.8개로 가장 많았으나 연도별 분얼수의 차이는 통계적으로 유의미한 차이는 아니었다. 연도별 추청벼 백미 수량은 각각 421.7 kg/10a (2017년), 508.5 kg/10a (2018년), 543.8 kg/10a (2019년)으로 2017년에 수량이 적고 2019년에 수량이 많았으며 2018년과 2019년의 수량 차이는 통계적으로 유의미한 차이는 아니었다. 한편, 경기도농업기술원 내 벼 작황시험포장에서 표준재배법으로 재배한 추청벼의 지난 10년(2001~2010년) 동안 평균으로 산정한 평년 백미 생산량은 511.5±20.2 kg/10a로 2018년 조사된 수량은 평년 수준인 것으로 알 수 있다.

경기도 화성시 벼 재배지의 메탄 배출량

최근 3년간 벼 재배기간 동안의 메탄 배출량과 토양 산화환원전위(Eh) 변화는 Fig. 8과 같다. 담수토양에서 혐기성 세균이 유기물 분해와 호흡을 위해 전자 수용체를 이용하는데 메탄은 토양 산화환원전위 −100 mV 이하부터 생성된다고 한 바 있으며[21], 본 연구에서는 이앙 전부터 담수하여 이앙 후 메탄 배출량 측정시기부터 −100 mV 이하의 값을 보

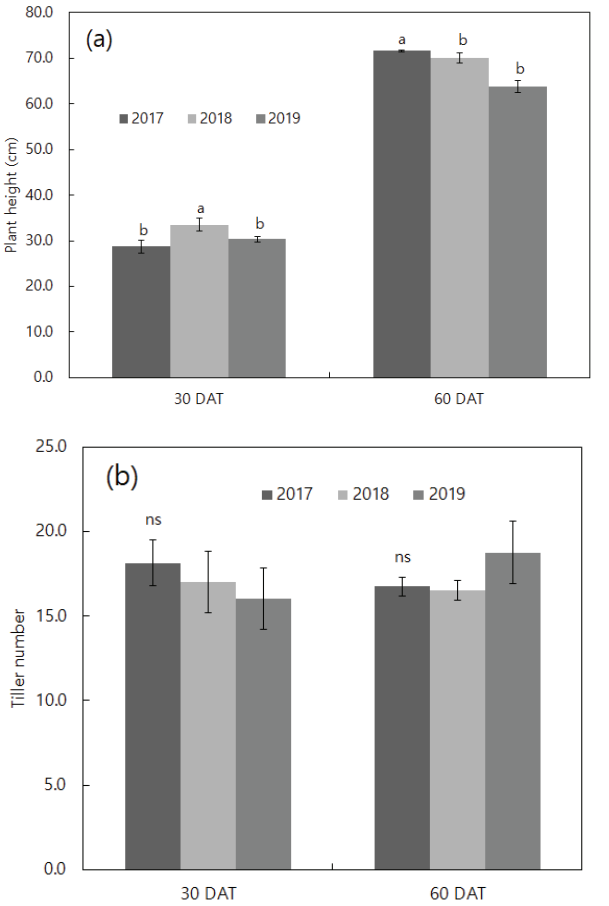

Fig. 6. Variation of the plant height (a) and tiller number (b) at 30 days after transplanting (DAT) and 60 days after transplanting (DAT) by the year in Hwaseong-si Gyeonggi-do.

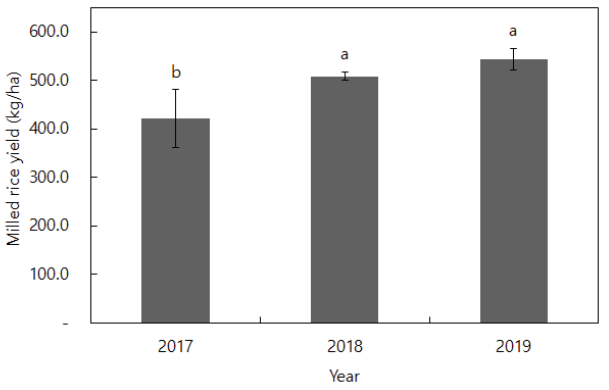

Fig. 7. Variation of the milled rice yield by the year in Hwaseong-si Gyeonggi-do.

였다. 메탄 배출량은 벼 이앙 후 영양생장기를 거쳐 생식생장기인 이앙 후 60~90일까지 상승하여 최대에 달하였으며, 이후 감소하는 경향으로 최근 3년 모두 유사한 메탄 배출량 변화 양상을 보였으며 이는 국내·외 벼 재배지 메탄 배출량 변화와도 유사하다[22, 23]. 벼 생육시기별 메탄 배출량 분석을 위해 벼 이앙 후 30일부터 120일까지 30일 단위 누적 메

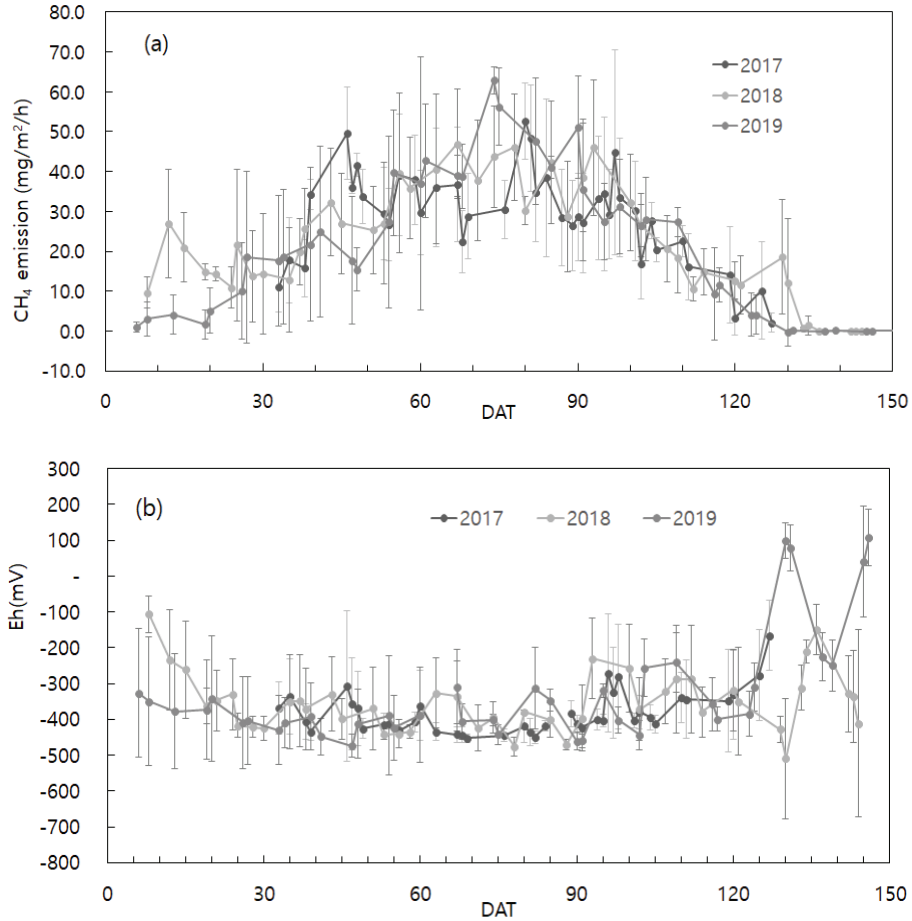

Fig. 8. Variation of the methane emissions (a) and soil Eh (b) after transplanting (DAT) over the 3 years.

탄 배출량을 살펴보았다(Fig. 9). 연도별 벼 이앙 후 30일부터 60일 동안의 누적 메탄 배출량은 212.7±40.0 kgCH_4/ha (2017년), 171.2±78.1 kgCH_4/ha (2018년), 159.5±111.6 kgCH_4/ha (2019년), 벼 이앙 후 60일부터 90일 동안의 누적 메탄 배출량은 245.2±80.1 kgCH_4/ha (2017년), 274.2±93.9 kgCH_4/ha (2018년), 339.6±50.3 kgCH_4/ha (2019년)이며, 벼 이앙 후 90일부터 120일 동안의 누적 메탄 배출량은 177.2±76.1 kgCH_4/ha (2017년), 215.8±72.3 kgCH_4/ha (2018년), 180.4±48.0 kgCH_4/ha (2019년)으로 나타났으나 연도별 생육시기별 메탄 배출량은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 벼 재배기간 총 누적 메탄 배출량은 635.0±177.2 kgCH_4/ha (2017년), 661.2±239.2 kgCH_4/ha (2018년), 679.4±205.4 kgCH_4/ha (2019년)으로 나타났으며 연도별 메탄 배출량의 차이는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다(Fig. 9).

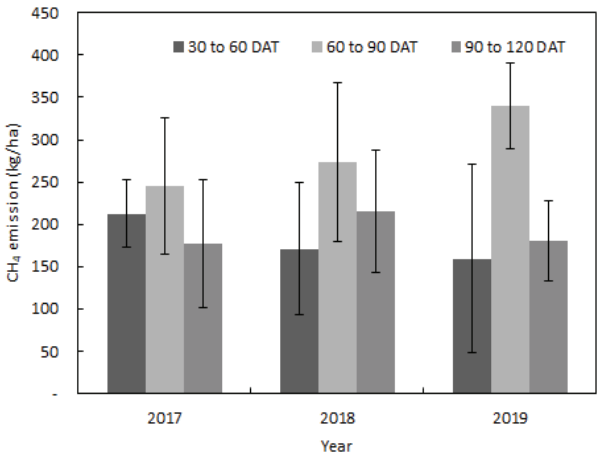

Fig. 9. Variation of the methane emissions for 30 to 60, 60 to 90, and 90 to 120 days after transplanting (DAT) for each year over the 3 years.

경기도 화성시 벼 재배지의 기후스마트 농업

본 연구에서는 기후스마트 농업 세 가지 관점에서의 평가를 위해 경기도 화성시 벼 재배지 최근 3년의 기상환경, 벼 생육 및 수량, 메탄 배출량을 평가하였다. 벼 수량에 영향을 미치는 기상요소에 관한 선행연구에 따르면, 중만생종 벼의 쌀 수량은 등숙기의 일조시간과 높은 상관을 보인 바 있으며 [24, 25], 우리나라 17개 지역 13년의 벼 작황조사를 통한 벼의 수량구성요소와 기상과의 관계 분석에 따르면, 7월 평균

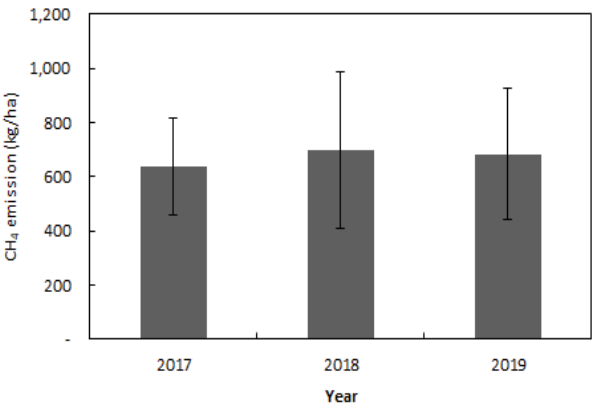

Fig. 10. Total methane emissions during the rice cultivation period over the 3 years.

일조시간, 8월 하순부터 9월 중순까지의 일조시간이 높은 상관을 보인 바 있다[26]. 본 연구에서 분석한 최근 3년 중 7월 평균 일조시간은 2018년에, 8월 일조시간은 2019년에 가장 많았고 벼 수량은 2019년에 가장 많았으나 2018년과 2019년의 벼 수량은 통계적으로 유의미한 차이는 아니었다. 메탄 배출량은 반복간 편차가 커서 연도별 벼 생육시기별 통계적 유의한 차이는 보이지 않았으나, 벼 이앙 후 30일부터 60일의 누적 메탄 배출량 평균값은 2017년에, 벼 이앙 후 60일부터 90일의 누적 메탄 배출량 평균값은 2019년에, 90일부터 120일의 누적 메탄 배출량 평균값은 2018년에 가장 크게 나타났다. 메탄 배출량은 벼 식물체의 통기조직을 통한 배출이 가장 많은 부분을 차지한다고 제시된 바 있으며[27, 28], 이에 벼 이앙 후 90일까지는 벼 생육에 의한 영향으로 2017년 벼 이앙 후 60일의 초장이 가장 큰 것과 2019년분얼수가 많았던 것이 해당시기 메탄 배출량 평균값이 가장 크게 나타난 요인이 될 수 있을 것으로 판단되며, 2018년은 해당시기에 다른 해에 비하여 가장 높았던 기온이 영향인자가 되었을 것으로 판단된다. 이를 통해 최근 3년에 경기도 화성시에서 나타난 기상환경, 벼 생육 및 수량, 메탄 배출량의 주요 특성은 2017년에는 6월 일조시간이 평년(2001~2010년, 6.0±1.3시간) 대비 3.6시간 많아 벼 영양생장에 유리하여 초장이 크고, 해당기간에 메탄 배출량도 많았다. 반면에 벼 재배기간 누적 메탄 배출량은 평균·최고·최저기온이 가장 높았던 2018년에 가장 많았으며 벼 수량은 평년 수준이었다. 벼 수량이 가장 많았던 2019년은 8월 일조시간이 가장 많았다. 이와 같이 농업생태계는 기상환경 변화에 따라 벼 생산성과 메탄 배출량이 유기적으로 연결되어 기후스마트 농업 기술 개발을 위한 기후 적응성, 생산성, 온실가스 저감의 세 가지 통합적 분석이 필요하다. 벼 생육에 유리한 기상환경에서는 메탄 배출량도 많이 나타나 기후변화 완화를 위한 온실가스 저감 목표와 생산성 향상에서 발생되는 상충관계를 최소화하는 것이 기후스마트 농업 기술로 필요한 것으로 판단된다. 본 연구는 최근 3년이라는 제한된 기간에 대한 분석으로 생산성과 기후 적응성에 대한 상관관계는 10년 이상의 장기적 연구를 수행한 선행연구 결과와 비교 분석하는 것만 가능하였으며, 세 가지 요소에 대한 상관분석을 위해서는 중장기적인 연구가 필요하다. 그러나 본 연구에서 제시하는 벼 재배지 기후스마트 농업 평가 기법은 기후스마트 농업 실현을 위해 선행되어야 할 지역 농업 생태계에 대한 과학적 이해와 필요한 관리기술을 개선하기 위한 기초 정보로 활용할 수 있다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Lipper L, Thornton P, Campbell BM, Baedeker T, Braimoh A, Bwalya M, Caron P, Cattaneo A, Garrity D et al. (2014) Climate-smart agriculture for food security. Nature Climate Change, 4(12), 1068-1072. https://doi.org/10.1038/nclimate2437.
2. Shin YK, Kim KS (1994) Methods for measurement of methane and nitrous oxide emissions from agricultural fields. Korean Journal of Environmental Agriculture, 13(3), 359-372.
3. Ko JY, Kang HW, Kang UG, Park HM, Lim DK, Park KB (1998) The effects of nitrogen fertilizers and cultural patterns on methane emissions from rice paddy fields. Korean Journal of Environmental Agriculture, 17(3), 227-233.
4. Kim GY, Park SI, Song BH, Shin YK (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. https://doi.org/10.5338/KJEA.2002.21.2.136.
5. Shin YK, Lee YS, Ahn JW, Koh MH, Eom KC (2003) Seasonal change of rice-mediated methane emission from a rice paddy under different water management and organic amendments. Korean Journal of Environmental Agriculture, 36(1), 41-49.
6. Muhammad AA, Lee CH, Kim PJ (2007) Effect of phosphogypsum on reduction of methane emission from rice paddy soil. Korean Journal of Environmental Agriculture, 26(2), 131-140. https://doi.org/10.5338/KJEA.2007.26.2.131.
7. Gwon HS, Kim GY, Choi EJ, Lee SI, Lee JS (2019) Evaluation of greenhouse gas emission characteristics and intensity by management of water and nutrients in rice paddy soil during cropping season. Journal of Climate Change Research, 10(4), 351-359. https://doi.org/10.15531/KSCCR.2019.10.4.351.
8. Lim SS, Choi WJ, Kim HY (2012) Fertilizer and organic

inputs effects on CO_2 and CH_4 emission from a soil under changing water regimes. Korean Journal of Environmental Agriculture, 31(2), 104-112. https://doi.org/10.5338/KJEA.2012.31.2.104.

9. Park WJ, Choi YH, Shin MH, Won CH, Park KW, Choi JD (2011) Evaluation on feasibility of system of rice intensification (SRI) for reduction of irrigation water in South Korea. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 53(4), 49-57. https://doi.org/10.5389/KSAE.2011.53.4.049.
10. Seo JY, Park BK, Park WJ, Lee SI, Choi YH, Shin MH, Choi JD (2018) Effect of SRI water management on the reduction of greenhouse-gas emissions and irrigation water supply in paddy. Journal of Korean Society of Agricultural Engineers, 60(1), 79-87.
11. Yun SH, Lee JT (2001) Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 3(1), 55-70.
12. Kim YH, Kim HD, Han SW, Choi JY, Koo JM, Chung U, Kim JY, Yun JI (2002) Using spatial data and crop growth modeling to predict performance of South Korean rice varieties grown in western coastal plains in North Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 4(4), 224-236.
13. Kim CS, Lee JS, Ko JY, Yun ES, Yeo US, Lee JH, Kwak DY, Shin MS, Oh BG (2007) Evaluation of optimum rice heading period under recent climatic change in Yeongnam area. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 9(1), 17-28. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2007.9.1.017.
14. Seo YH, Lee AS, Cho BO, Kang AS, Jeong BC, Jung YS (2010) Adaptation study of rice cultivation in Gangwon Province to climate change. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 12(2), 143-151. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2010.12.2.143.
15. Lee CK, Kim JW, Shon JY, Yang WH, Yoon YH, Choi KJ, Kim KS (2012) Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 14(4), 207-221. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2012.14.4.207.
16. Kim JH, Sang W, Shin P, Cho H, Seo MC, Yoo BH, Kim KS (2015) Evaluation of regional climate scenario data for impact assessment of climate change on rice productivity in Korea. Journal of Corp Science and Biotechnology, 18(4), 257-264. https://doi.org/10.1007/s12892-015-0103-z.
17. Sang WG, Cho HS, Kim JH, Shin P, Baek JK, Lee YH, Cho JI, Seo MC (2018) The change of grain quality and starch assimilation of rice under future climate conditions according to RCP 8.5 scenario. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 20(4), 296-304. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2018.20.4.296.
18. Seo MC, Kim JH, Choi KJ, Lee YH, Sang WG, Cho HS, Cho JI, Shin P, Baek JK (2020) Review on adaptability of rice varieties and cultivation technology according to climate change in Korea. Korean Journal of Crop Science, 65(4), 327-338. https://doi.org/10.7740/kjcs.2020.65.4.327.
19. Kim HY, Kim J, Choi SW, Indrawati YM (2016) The study of MP-MAS utilization to support decision-making for climate-smart agriculture in rice farming. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 18(4), 378-388. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2016.18.4.378.
20. Indrawati YM, Kim J, Kang M (2018) Assessment of ecosystem productivity and efficiency using flux measurement over Haenam Farmland site in Korea (HFK). Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 20(1), 57-72. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2018.20.1.57.
21. Lindau, CW, Bollich, PK, Delaune, RD, Patrick WH, Law VJ (1991) Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH_4 emission from a Louisiana, USA rice field. Plant and Soil, 136, 195-203. https://doi.org/10.1007/BF02150050.
22. Smita S, Singh JS, Kashyap AK (1999) Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. Soil Biology and Biochemistry, 31, 1219-1228. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00027-9.
23. Kim GY, Jeong HC, Ju OJ, Kim HK, Park JH, Gwon HS, and Kim PJ (2013) Establishment of baseline emission factor of methane in Korean rice paddy soil. Korean Journal of Environmental Agriculture, 32(4), 359-365. https://doi.org/10.5338/KJEA.2013.32.4.359.
24. Yun SH, Lee JT (2001) Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 3(1), 55-70.
25. Shin JH, Han CM, Kwon JB, Kim SK (2019) Effect of climate on the yield of different maturing rice in the Yeongnam inland area over the past 20 years. Korean Journal of Crop Science, 64(3), 193-203. https://doi.org/10.7740/kjcs.2019.64.3.193.

26. Kim JH, Sang WG, Shin P, Cho HS, Seo MC (2017) A meteorological analysis on high rice yield in 2015 in South Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 19(2), 54-61. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2017.19.2.54.
27. Cicerone RJ, Shetter JD (1981) Sources of atmospheric methane: measurements in rce paddies and a discussion. Journal of Geophysical Research, 86, 7203-7209. https://doi.org/10.1029/JC086iC08p07203.
28. Wassmann R, Aulakh MS (2000) The role of rice plants in regulating mechanisms of methane missions. Biology and Fertility of Soils, 31(1), 20-29. https://doi.org/10.1007/s003740050619.