

DNDC 모델을 활용한 공통사회경로 기후변화 시나리오별 국내 벼 재배 부문 온실가스 배출량 시공간적 변화 분석

김준* · 김희진** · 이수종*** · 조현우**** · 이우균*****†

*고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, **고려대학교 오정리질리언스연구원 박사후연구원, ***고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, ****국제응용시스템연구소 박사후연구원, *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Analysis of spatio-temporal changes in greenhouse gas emissions from the domestic rice cultivation sector by according to Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios using the DeNitrification-DeComposition (DNDC) model

Kim, Joon* · Kim, Whijin** · Lee, Sujong*** · Jo, Hyun-Woo**** and Lee, Woo-Kyun*****†

*Research Professor, OJEong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

**Post-doctoral Researcher, OJEong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

***PH.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

****Post-doctoral Researcher, International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria

*****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Rice cultivation is a significant source of methane emissions, contributing substantially to the agricultural sector's greenhouse gas inventory. In this study, we applied the DeNitrification-DeComposition (DNDC) model to simulate greenhouse gas emissions from rice paddies in South Korea, analyzing spatial and temporal changes under various Shared Socioeconomic Pathways (SSP) climate scenarios. Our results indicate that soil organic carbon is the most influential factor driving emissions, with regions rich in organic carbon showing the highest levels of methane emissions. Under the SSP1-2.6 scenario, which assumes strong climate mitigation efforts, emissions increase slightly in early decades (2030s~2050s) but stabilize in later decades (2050s~2070s). In contrast, the SSP5-8.5 scenario, characterized by minimal climate action, projects a significant rise in emissions throughout the 21st century. Spatial analysis reveals that regions with high emissions per hectare do not necessarily have the highest total emissions, as total emissions are also influenced by the extent of cultivated land. Traditional rice-growing regions along the west coast, despite lower per-hectare emissions, show higher total emissions due to their larger cultivation areas. These findings underscore the need for targeted mitigation strategies that address both emission intensity and scale, highlighting the importance of soil organic carbon management. Our study offers valuable insights for sustainable agricultural policies aimed at reducing greenhouse gas emissions while maintaining productivity in the face of climate change.

Key words : Climate Change, Rice Paddy, Greenhouse Gas Emission, DNDC Model, SSP Scenario

†Corresponding author : leewk@korea.ac.kr (145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3470)

ORCID 김 준 0000-0001-8741-2523

김희진 0000-0002-7093-7312

이수종 0000-0002-6383-805X

조현우 0000-0001-6127-883X

이우균 0000-0002-2188-359X

1. 서론

농업은 인류의 식량을 공급하는 필수적인 경제 활동으로, 토지와 기후에 깊이 의존하여 이루어진다(Kim, 2021). 지역의 기후, 토양, 지형 조건은 재배 가능한 작물의 종류와 생산량, 품질에 직접적인 영향을 미치며, 이러한 환경적 요소의 변화에 따라 농업 생산성은 크게 변동될 수 있다(Haque et al., 2015). 또한 농업 활동은 CO₂, CH₄, N₂O와 같은 온실가스를 배출하는 주요 배출원 중 하나로, 특히 벼농사와 가축 사육에서 다량의 온실가스가 발생하여 기후변화에 영향을 준다. 기후변화는 다시 농업 환경에 영향을 미치며, 결과적으로 농업은 기후와 복잡한 상호작용 속에서 지속 가능성을 모색해야 한다(Ikhwal et al., 2022; Kim et al., 2013). 따라서 안정적인 식량 공급을 유지하면서도 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화하려는 노력이 요구되며, 이는 친환경 농업 기술 개발과 기후 적응 전략을 통해 이루어져야 한다(Kong et al., 2013; Kwon and Lee, 2012). 지속 가능한 농업은 인류의 미래를 보장하는 중요한 과제로, 전 세계적 협력과 혁신이 필수적이다. 이러한 지속 가능한 농업의 일환으로 유럽연합은 기후스마트농업 개념을 제시하여 농업 부문의 저탄소화를 도모하고 있으며, 우리나라 또한 저탄소 농법 개발, 농지 물 관리, 비료 사용 절감 등 다양한 방면으로 농업 부문의 저탄소화를 위해 노력하고 있다(Jeong and Kim, 2015; Morkunas and Volkov, 2023; Verschuuren, 2018).

DeNitrification-DeComposition(DNDC) 모델은 토양 내 미생물 활동과 생물학적 및 화학적 과정을 정밀하게 모의하여, 농업 활동으로 인한 온실가스 배출을 예측하는 데 주로 사용되는 모델이다(Hwang et al., 2017; Jeong et al., 2014). 이 모델은 기후 조건, 토양 특성, 비료 사용량, 작물 유형 등의 다양한 농업 관련 입력 변수를 통합적으로 고려함으로써, 농업 활동에서 발생하는 CO₂, CH₄, N₂O 등 다양한 유형의 온실가스 배출을 정밀하게 예측할 수 있다(Oh et al., 2010, 2011). 특히, DNDC 모델은 농업 활동의 공간적 차이를 반영할 수 있어, 특정 지역의 토양 특성이나 기후 조건에 따른 온실가스 배출의 차이도 평가 가능하다. 이로 인해 DNDC 모델은 농업 부문에서의 환경 연구에 폭넓게 활용되며, 다양한 환경적 차이를 반영한 결과를 제공함으로써 정책 수립이나 농업 관리 전략 수립에 중요한 정보를 제공한다(Fumoto et al., 2008; Hwang et al., 2021; Minamikawa et al., 2014). 본 연구에서는 이러한 DNDC 모델의 특성을 활용하여 논 분포에

따른 농업 환경의 차이와 기후적 변동성을 고려한 온실가스 배출량을 산정하고자 한다. 이를 통해 다양한 농업 환경에서의 온실가스 배출 특성을 파악하고, 기후변화에 대응하는 지속 가능한 농업 정책을 모색할 수 있을 것이다(Min et al., 2018; Shin et al., 2014).

우리나라의 논 면적은 전체 농지 면적의 50.5%로 다양한 작물을 생산하는 밭에 비해 주식인 쌀은 생산 비율과 생산량이 매우 높다. 벼 재배과정에서 배출되는 메탄은 이산화탄소에 비해 온실효과 더 크다(Lee et al., 2012). 우리나라의 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 농업 부문에서 배출하는 온실가스의 약 50%가 벼 재배를 통해 배출되며, 전체 온실가스의 약 1.5%가 배출된다(Seo et al., 2022). 따라서 본 연구는 우리나라의 지속 가능한 벼 재배 및 온실가스 배출 저감을 위하여 논에서 발생하는 온실가스의 배출 특성을 DNDC 모델을 활용하여 모의하고, 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)에서 제시한 기후변화 시나리오인 Shared Socioeconomic Pathways(SSP)를 활용하여 미래 변화를 모의하고자 한다.

기후변화가 인류의 미래에 미치는 영향은 다양한 시나리오를 통해 분석되고 있으며, SSP 시나리오는 이러한 분석에서 핵심적인 역할을 한다(Meinshausen et al., 2020). SSP 시나리오는 미래의 사회경제적 발전 경로와 기후변화를 통합적으로 고려하여 다양한 가능성을 제시하는데, 인구 증가, 경제성장, 기술 발전, 그리고 정책 대응의 차이에 따라 여러 경로로 나뉜다. 이러한 경로들은 각기 다른 기후변화 양상을 초래하며, 특히 농업 부문에 미치는 영향이 매우 크다(Wiebe et al., 2015). 기온 상승, 강수 패턴의 변화, 그리고 극단적인 기상 현상의 빈도 증가 등은 작물 생육 환경을 크게 변화시켜 농작물의 생산성에 직접적인 영향을 미친다. 이는 결국 식량 안보와 글로벌 식량 공급망에 중대한 위협을 가하게 될 가능성이 크다. 또한, 기후변화로 인한 농업 생산성의 저하는 경제적으로 취약한 지역에 더 큰 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 변화에 대응하기 위한 농업 정책의 중요성은 그 어느 때보다 강조되고 있다(Chae et al., 2020). 따라서, SSP 시나리오를 통해 농업 부문에서 기후변화의 영향을 세밀하게 분석하고, 이에 기반한 지속 가능한 농업 전략과 식량 안보 강화 방안을 모색하는 것은 필수적인 과제로 대두되고 있다(An et al., 2022; Kim et al., 2022).

우리나라에서의 벼 재배는 주식량인 쌀을 생산하는 핵심 농업 활동으로, 국가 식량 안보와 직결된다는 점에서 앞으로도 지속될 가능성이 높다(Hong and Jeon, 2021;

Shin et al., 2015). 그러나 벼 재배 과정에서 발생하는 온실가스 배출은 기후변화의 주요 원인 중 하나로 지목되고 있으며, 이러한 배출 현황과 지역적 특성을 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다(Yun et al., 2001). 기후변화로 인해 재배 환경이 변화함에 따라, 벼 재배지의 기후적 조건도 변동될 가능성이 크기 때문에, 미래의 온실가스 배출 특성을 예측하고 이에 적합한 재배 지역을 선정하는 것은 필수적이다(Seo et al., 2020). 따라서 본 연구는 SSP 기후변화 시나리오에 따른 벼 재배 부문의 온실가스 배출 특성 변화를 분석함으로써, 농업 부문에서 기후변화가 미치는 영향을 체계적으로 파악하고, 이를 바탕으로 지속 가능한 저탄소 농업 정책 수립을 위한 과학적 근거를 제공하고자 한다. 이러한 결과는 벼 재배의 효율성을 유지하면서도 온실가스 배출을 최소화하는 전략을 마련하는데 기여할 것이다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 연구 대상지

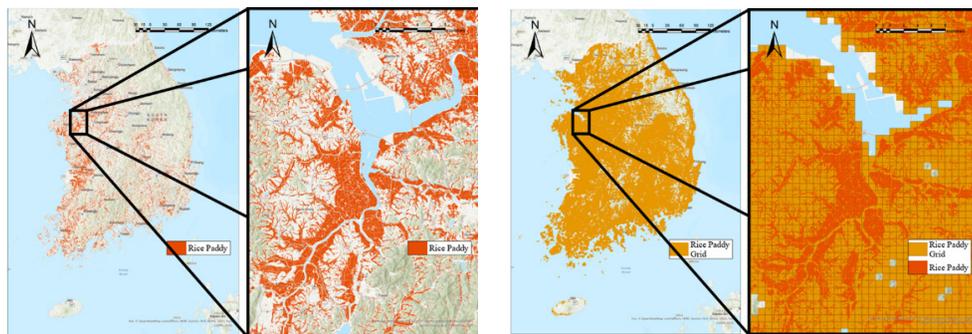
본 연구는 우리나라의 논을 대상으로 온실가스 배출량을 평가하기 위하여 Jo et al. (2023)의 연구에서 산출한 위성영상 기반의 논 실제 경작지를 공간자료로 활용하였다. Jo et al. (2023)의 연구는 Synthetic Aperture Radar (SAR) 위성영상과 딥러닝을 활용하여 실제 경작중인 논을 분류하였으며, 이를 바탕으로 유향 농지를 제외한 정확한 논 분포와 면적을 산출하였다. DNDC 모델은 지점을 기반으로 구동되기 때문에 전국에 1 km 격자를 생성하여 Jo et al. (2023)의 결과에서 논이 있는 격자만 추출하였으며, 총 82,911개의 격자에 고유번호를 부여하여 활용

하였다(Fig. 1).

2.2. 연구 재료 및 방법

본 연구는 국내 논에서의 온실가스 배출량과 기후변화 시나리오에 따른 변화를 분석하기 위하여 DNDC 모델을 활용하였다. DNDC 모델은 미국 뉴햄프셔 대학에서 개발되었으며, 농업 부문에서 탄소와 질소 순환의 상호작용 및 온실가스 배출을 예측하는 컴퓨터 모델이다(Li, 1996). 기후, 토양, 작물 관리 데이터를 기반으로 물리적 및 생화학적 과정을 계산하고 이를 통해 농업 활동의 환경 영향을 평가한다. DNDC는 전 세계 다양한 지역과 농업 시스템에 적용되어 신뢰성을 검증받았으며, 온실가스 배출 저감 및 지속 가능한 농업 관리 방안 제시에 중요한 도구로 활용되고 있다(Abdalla et al., 2009; Gilhespy et al., 2014; Tang et al., 2006; Zhang and Niu, 2016). 국내 선행연구는 DNDC 모델을 활용하여 농업 부문에서 배출되는 온실가스를 모의하고 배출량 저감을 위한 전략을 도출하는 등의 연구가 수행되었다(Hwang et al., 2019, 2021).

DNDC 모델 구동을 통한 온실가스 배출량 모의를 위하여 자료 구축, 검증이 가능한 2019년을 대상 연도로 설정하였다. 먼저 DNDC 모델의 구동 결과를 활용하여 온실가스 배출량과 가장 연관성이 높은 입력자료를 파악하고, 이후 토양 환경과 농업 기술이 변하지 않는다는 가정하에 기후 자료를 SSP 기후 시나리오로 대체하여 미래 기후변화에 따른 온실가스 배출량 변화를 모의하였다. 모의한 결과를 활용하여 기후 환경의 변화에 따라 논에서의 온실가스 배출 경향의 변화를 분석하고, 이에 따른 대응 방안을 검토하였다.



(a) Rice paddies under cultivation of Jo et al. (2023) (b) Grid cells with rice paddies of Jo et al. (2023)

Fig. 1. Study area

2.2.1. DNDC 모델을 통한 벼 재배 부문 온실가스 배출량 산정

본 연구는 논외 온실가스 배출 특성을 모의하기 위해 2019년을 기준으로 DNDC 모델의 입력자료를 구축하였다. DNDC 모델의 입력자료는 Table 1과 같으며 Hwang et al. (2021)의 연구에서 제시한 다양한 통계자료와 현장 조사 기반의 국가 공인자료를 바탕으로 수집하였다. 또한 논외 온실가스 배출에 큰 영향을 미치는 관개 사항은 최적화되었다고 가정하여, 농촌 진흥청의 쌀 품질 고급화기술에서 제안하는 값을 활용했다(RDA, 2019). 이외에 수집이 어려운 입력자료의 경우 DNDC 모델에서 제공하는 기본값을 활용하였다. 각각의 입력자료 중 공간적 차이가 크고 공간적 표출이 가능한 자료는 Fig. 2와 같다.

Table 1에서 구축한 입력자료를 활용하여 DNDC 모델을 구동하였으며, 그 결과로 산출되는 값 중 벼 재배로 인해 논 토양에서 발생하는 토양 CO₂와 작물에서 발생하는 CH₄, N₂O에 각각 Global Warming Potential (GWP)을 곱

해 CO₂-eq로 환산, 합산하여 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’을 산정하였다(Fig. 3). 또한 산정 결과 중 온실가스 배출량과 가장 관련 있는 인자를 파악하기 위하여 입력 데이터와 결과 데이터를 활용해 다중회귀분석으로 상관성을 분석하였다. 산정 결과를 검증하고 온실가스 배출량을 산정하기 위하여 Jo et al. (2023)의 연구에서 산출한 면적을 격자에 곱하여, ‘실질 온실가스 배출량’을 산정하였다(Jo et al., 2023). 이를 2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 제시하는 지자체별 온실가스 배출량과 비교 분석하여 검증을 수행하였다.

2.2.2. DNDC 모델과 SSP 시나리오를 활용한 온실가스 배출 경향 분석

DNDC 모델을 활용하여 미래 기후변화에 따른 온실가스 배출 특성의 변화를 분석하기 위하여 기후변화에 대한 대응 정도가 다른 SSP1-2.6 시나리오와 SSP5-8.5 시나리오를 적용하여 논 온실가스 배출량을 산정하였다. SSP1-2.6

Table 1. Input data list of DNDC model

Input	Unit	Source
Yearly Soil Organic Carbon	kg C/kg	Soil Chemical Test from National Institute of Agricultural Science
Yearly Soil Acidity	pH	Soil Chemical Test from National Institute of Agricultural Science
Yearly Clay Content	%	Precision Soil Map from National Institute of Agricultural Science
Yearly Bulk Density	g/cm ³	Precision Soil Map from National Institute of Agricultural Science
Yearly Fertilizer	kg N/ha	Rice Quality Improvement Technology from Rural Development Administration
Optimized Paddy Irrigation	Day	Rice Quality Improvement Technology from Rural Development Administration
Daily Maximum Temperature	℃	Meteorological Administration
Daily Minimum Temperature	℃	Meteorological Administration
Daily Precipitation	mm	Meteorological Administration

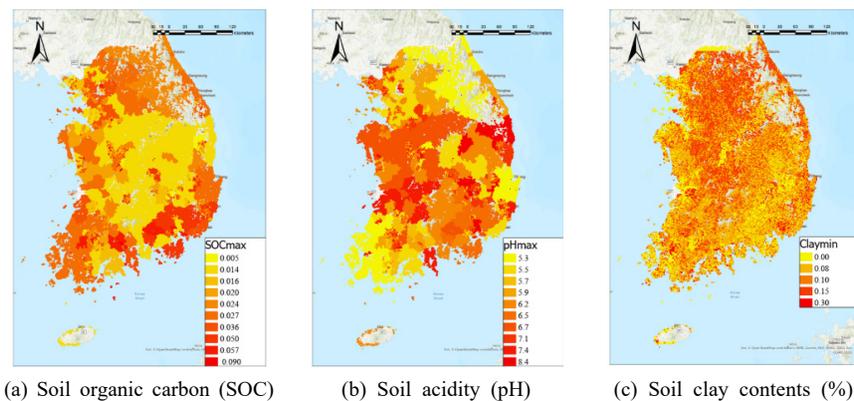


Fig. 2. Spatialization of input data

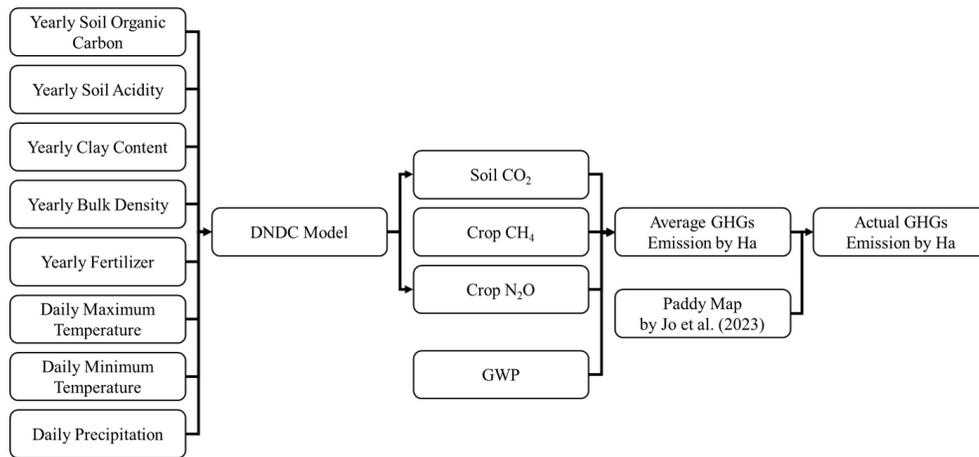


Fig. 3. Data flow

시나리오의 경우 기후변화를 최소화하기 위해 강력한 정책을 실시한 경우이고, SSP5-8.5 시나리오의 경우 경제성장을 중점적으로 기후변화를 고려하지 않은 시나리오다. 본 연구는 기후변화의 영향만 반영하기 위하여 2019년의 토양 화학성과 재배 농법이 변하지 않는다는 가정하에 위에서 구축한 토양, 농법 입력자료를 동일하게 활용하고, 기후자료만 기후변화 시나리오 자료로 대체하여 DNDC 모델을 구동하였다. 기후변화 시나리오는 미래의 기후변화의 경향성을 반영하기 위하여 2030년대(2031년~2040년), 2050년대(2051년~2060년), 2070년대(2071년~2080년)의 일별 기후 시나리오 데이터를 일간 평균하여 활용하였다. 모델에 입력되는 자료는 기존 기후 입력자료와 동일하게 최고기온, 최저기온, 강수량이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. DNDC 모델을 활용한 국내 논 온실가스 배출 현황 및 검증

DNDC 모델을 활용하여 국내 논에서 벼 재배로 인해 발생하는 온실가스를 모의한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 ‘헥타르 당 온실가스 배출량(Kg CO₂/ha)’으로, 경상북도 김천시, 경상남도 진주시, 밀양시, 의령군, 창녕군 일대와 전라남도 순천시와 나주시 일대의 배출량이 높은 것으로 나타났다. 이때 DNDC 모델의 결과는 범주형으로 산출되기 때문에 평균값을 계산하여 표출하였다. 헥타르 당 온실가스 배출량의 공간분포와 입력자료의 공간분포

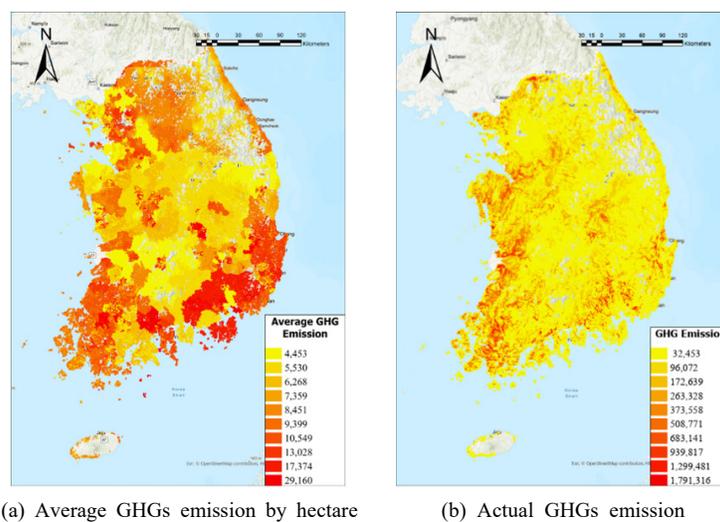


Fig. 4. Result of DNDC model in 2019

특성을 시각적으로 비교했을 때 토양 유기물(Fig. 2(a))과의 공간분포 특성이 가장 유사한 것으로 나타났다. 이를 검증하기 위하여 82,911개의 격자 별 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’과 입력자료 중 토양 유기물과 토양산도, 점토 비율에 대해 Statsmodels 라이브러리의 Ordinary Least Squares 모델을 활용한 다중 회귀 분석(Multiple Regression Analysis)을 수행했다. 회귀 분석 결과, 토양 유기물이 헥타르 당 온실가스 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 나타났다. 상관 행렬을 파악한 결과 헥타르 당 온실가스 배출량과 토양 유기물, 토양 산도, 점토 비율의 각 상관관계는 0.314, -0.075, -0.059로 토양 유기물만이 유의미한 상관관계가 있는 것으로 파악되었다. 또한 다중회귀분석 결과 토양 유기물의 회귀 계수는 약 4,871,000으로, 토양 유기물이 1 단위 증가할 때 헥타르 당 온실가스 배출량이 평균적으로 4,871,000 단위만큼 증가하는 것으로 분석되었다. 반면, 토양 산도와 점토 비율은 음의 영향을 미치며, 각각의 회귀 계수는 -1,379와 -260,500으로 나타났다. 이는 토양 산도와 점토 비율이 증가할 때 배출량이 감소하는 경향이 있음을 의미하지만, 그 영향력은 토양 유기물에 비해 상대적으로 작다. 따라서 온실가스 배출량을 관리하거나 예측하는 데 있어 토양 유기물의 역할이 가장 중요하다는 결론을 내릴 수 있다. ‘헥타르당 온실가스 배출량’과 실제 경작중인 논 면적을 곱하여 산출한 ‘실질 온실가스 배출량’은 Fig. 4(b)와

같다. ‘실질 온실가스 배출량’은 앞선 결과와 다르게 실제 경작 면적이 넓은 충청남도 당진시와 서산시를 시작으로 서해안 일대의 전통적인 곡창지대에서 높은 값을 나타냈다. 이에 따라 총 온실가스 배출량은 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’이 높더라도 실제 경작 면적에 큰 영향을 받는 것으로 나타난다. 경작 면적이 높은 나주시를 제외하면 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’이 높은 것으로 나타난 지역 중 ‘실질 온실가스 배출량’이 높은 지역은 없는 것으로 나타났다.

위의 결과를 검증하기 위하여 ‘2021 국가 온실가스 인벤토리 공표(1990~2019)’의 ‘지역별 온실가스 배출량’ 벵 재배 부문과 본 연구의 결과를 비교 분석하였다. ‘실질 온실가스 배출량’ 자료를 활용하여 전체 배출량과 지자체에 따른 배출량 범위를 산정하였다. ‘2021 국가 온실가스 인벤토리 공표(1990~2019)’에서 제시한 2019년 벵 재배 부문 온실가스 배출량은 5,913 GgCO₂-eq이며, DNDC 모델의 산출 결과는 6,022~7,887 GgCO₂-eq이다. 국가 산출 값은 벵 재배로 인한 CH₄ 배출량만 산정된 것이다. 국가 온실가스 인벤토리 산정 방법론에 따르면, 현재 우리나라는 논 재배 면적과 재배일수를 바탕으로 한 단순한 방법론으로 배출량을 산정했다. 결과적으로 국가 산출 값은 기후 자료와 공간자료가 사용되지 않아 지역에 따른 기후 및 토양 환경의 차이가 고려되지 않은 결과다. 따라서 두 산출 값을 단순 비교하여 검증하는 것에는 무리가 있다. 따라서 현재 활용 가능한 데이터 상에서 최대한 검증을 수행하기 위하여, 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 지역별 온실가스 배출량을 활용하였다. 지역별 온실가스 배출량을 활용하여 본 연구결과와 지자체별 비교를 수행한 결과 모든 지자체에서 배출량이 범주에 포함됐다. 위 결과를 바탕으로 DNDC 모델의 산출결과와 신뢰성을 확보했다.

Table 2. Comparison of GHGs Emission (GgCO₂-eq)

	Maximum	Minimum	Average
National Inventory Report	-	-	5,913
Soil CO ₂ of DNDC Model (a)	3,530	3,286	3,408
Crop CH ₄ of DNDC Model (b)	3,493	2,170	2,832
Crop N ₂ O of DNDC Model (c)	863	565	714
DNDC Model Total (a+b+c)	7,886	6,003	6,995

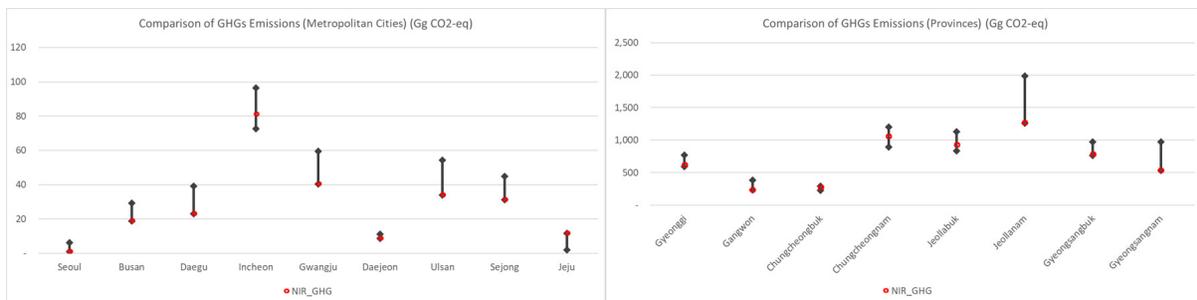


Fig. 5. Comparison of GHGs emission by local governments

3.2. SSP 시나리오에 따른 미래 논 온실가스 배출 변화

SSP 시나리오에 따른 미래 논 온실가스 배출의 변화는 Fig. 6과 같다. SSP 1-2.6 시나리오에 따른 결과는 2030년대에서 2070년대로 갈수록 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’의 지역간 차이가 커진다. 이 공간적 분포는 경상남도와 전라남도 그리고 서해안 일대가 높은 토양 유기물의 공간적 분포와 유사하다. 또한 2030년대는 경상남도 진주와 창원 일대를 제외한 지역에서 배출량의 차이가 미미하지만, 2050년~2070년대로 갈수록 토양 유기물의 분포와 유사하게 배출량의 지역적 차이가 나타난다. SSP5-8.5 시나리오에 따른 결과는 SSP1-2.6 시나리오의 결과에 비해 전체 배출량이 높고 2030년대부터 토양 유기물과 같은 공간적 분포를 보인다. 2070년대로 갈수록 배출량이 높지 않았던 지역 또한 높은 배출량을 보인다.

3.3. 고찰

‘헥타르 당 온실가스 배출량’과 ‘실질 온실가스 배출량’의 결과를 비교하여 분석한 결과 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’이 높은 지역이더라도 경작 면적이 넓지 않은 경우 ‘실질 온실가스 배출량’이 많지 않다. 결과적으로 효과적인 저탄소 농업 정책을 마련하기 위해서는 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’과 ‘실질 온실가스 배출량’을 전부 고려하여 생산량을 높이면서 배출량을 줄이는 방안을 모색해야 한다.

본 연구 결과, 토양 유기물이 온실가스 배출에 큰 영향을 미치는 요소로 확인되었으며, 특히 토양 유기물 함량이 높은 지역에서 온실가스 배출량이 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. Fig. 5에서 DNDC 모델의 산출 결과 최소값과 최대값의 범위가 넓게 나타난 전라남도, 경상남도, 인천광역시에 대한 토양 특성과 비료 특성을 분석한 결과 다른 지역에 비하여 토양 유기물의 값이 높고 점토 비율

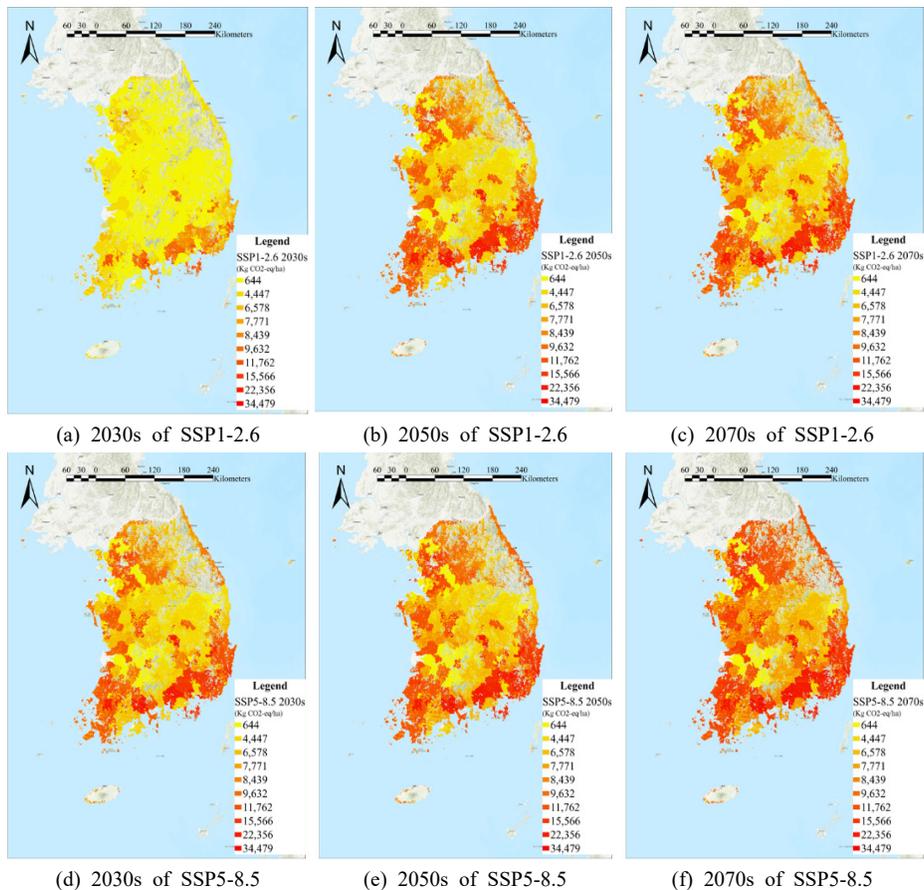


Fig. 6. GHGs emission by hectare according to SSP scenarios

과 토양 산도가 낮았으며 비료 사용량이 적은 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 다양한 유기물 증가 요인 중 비료 사용 또한 토양 유기물의 증가에 기여하고, 이로 인해 온실가스 배출이 촉진될 수 있음을 시사한다. 여러 선행 연구 또한 토양 유기물과 온실가스 배출량 사이에 유의미한 상관관계가 있는 것으로 나타났다(Choi et al., 2013; Ko et al., 2011). 따라서 지속 가능한 농업을 위해서는 비료 사용을 적절히 줄이고, 토양 유기물의 관리에 신중을 기할 필요가 있다. 비료 사용을 최적화하여 필요 이상의 토양 유기물 증가를 지양하고, 나아가 토양 건강을 유지하면서도 온실가스 배출을 줄일 수 있는 관리 전략을 개발하는 것이 중요하다. 또한 토양 및 비료 관리 뿐 아니라 논외의 물관리를 통해 쌀의 품질을 향상하면 탄소배출을 줄이는 방법이 개발되어 활용되고 있다(Geum and Sin, 2022; Shin et al., 1995). 이러한 접근은 기후변화에 대응하는 저탄소 농업을 실현하는 데 기여할 것이다.

SSP1-2.6 시나리오의 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’ 변화 추이는 전기(2030년 ~ 2050년)보다 후기(2050년 ~ 2070년)에 증가 폭이 작고, SSP5-8.5 시나리오의 경우는 전기의 상승 폭보다 후기의 상승 폭이 크다. 이는 기후변화 적응 및 완화 조치가 장기적으로 기후변화에 미치는 영향으로 인한 것으로 미루어 볼 수 있다. SSP1-2.6 시나리오는 기후변화 완화를 목표로 강력한 정책이 수반된 경우의 시나리오이기 때문에 시간이 지날수록 기후변화 정도가 완화된다. 따라서 전기에는 배출량이 다소 상승하지만, 후기에는 기후변화 완화 정책으로 인해 상승 폭이 줄어든다. SSP5-8.5 시나리오는 경제성장을 우선시하여 기후변화에 대한 정책과 조치가 상대적으로 부족하다. 결과적으로 전기와 후기 모두 배출량이 큰 폭으로 상승하고 2070년대에는 전국에 걸쳐 높은 수준의 ‘헥타르 당 온실가스 배출량’이 나타난다. 이러한 경향의 원인은 입력자료로 활용한 SSP 시나리오 중 최고기온, 최저기온에서 찾을 수 있다. 최고기온과 최저기온의 평균값(Raster Mean Value)을 선형으로 나열하고 추세선을 나타냈을 때 SSP1-2.6 시나리오에 비해 SSP5-8.5 시나리오의 상승 폭이 크고 값 또한 크다.

이러한 분석 결과는 기후변화 대응 정책의 강도와 지속성이 장기적인 온실가스 배출량 감소에 결정적인 역할을 한다는 점을 시사한다. 특히 SSP1-2.6 시나리오에서 나타난 후기의 배출량 증가 둔화는 적극적인 기후변화 완화 노력이 장기적으로 긍정적인 효과를 가져올 수 있음을 보여준다. 반면, SSP5-8.5 시나리오에서 나타난 후기의 급격

한 배출량 증가는 기후변화에 대한 미흡한 대응이 장기적으로 얼마나 심각한 영향을 미칠 수 있는지를 경고한다.

본 연구 결과는 DNDC 모델을 활용하여 벼 재배 부문의 온실가스 배출량에 가장 영향이 큰 환경적 요인을 파악하였다. 또한 SSP 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화 대응 정책에 따른 온실가스 배출량의 변화를 파악할 수 있었다. 하지만 본 연구의 한계는 작물 재배 부문에서 중요한 지표인 생산량과 품질을 모델에 반영하기 어려워, 단순히 지역별 온실가스 배출량만 산출한 것이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 기후, 토양, 작물 데이터를 기반으로 쌀 생산량을 산정할 수 있는 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) 모델과 연계하여 생산량과 배출량을 산정하여 생산량 대비 온실가스 배출량을 모의할 수 있는 방안을 제안한다. 이러한 방안을 통해 생산량과 배출량을 비교 분석하여 쌀 생산이 적합한 지역과 부적합한 지역을 기후변화 시나리오에 따라 파악하고, 저탄소 농업 정책을 지원할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 DNDC 모델을 활용하여 우리나라의 논에서 발생하는 온실가스 배출 특성을 분석하고, SSP 기후변화 시나리오에 따른 미래 배출 변화를 예측함으로써, 벼 재배 부문에서의 기후변화 영향과 대응 방안을 제시하였다. 연구 결과, 토양 유기물 함량이 온실가스 배출에 중요한 영향을 미치며, 기후변화 대응 정책의 강도에 따라 미래 배출량의 증가 폭이 달라질 수 있음을 확인하였다. SSP1-2.6 시나리오에서는 강력한 기후변화 완화 정책이 시행될 경우 배출량 증가가 둔화되는 반면, SSP5-8.5 시나리오에서는 미흡한 대응으로 인해 배출량이 급격히 증가할 것으로 예측되었다.

이러한 결과는 기후변화 대응 정책이 장기적인 온실가스 배출량에 결정적인 영향을 미친다는 점을 시사하며, 특히 벼 재배 부문에서 지속 가능한 저탄소 농업을 구현하기 위한 과학적 근거를 제공한다. 그러나 본 연구는 온실가스 배출량에 집중하였으며, 생산량과 품질과 같은 중요한 농업 지표를 포함하지 못했다는 한계가 있다. 따라서 EPIC 모델과의 연계를 통해 쌀 생산량과 배출량을 종합적으로 고려하는 연구가 필요하다. 이러한 접근을 통해 기후변화 시나리오에 따른 지역별 농업 적합성을 평가하고, 저탄소 농업 정책 수립을 위한 구체적이고 실질적인 전략을 마련할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생태계 기반 탄소흡수원 조성관리 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었으며(RS-2023-00218243), 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(RS-2020-KA158194)을 받아 수행되었고, 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었습니다(NRF-2021K1A3A1A78097879).

Reference

- Abdalla M, Wattenbach M, Smith P, Ambus P, Jones M, Williams M. 2009. Application of the DNDC model to predict emissions of N₂O from Irish agriculture. *Geoderma* 151(3-4): 327-337. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2009.04.021
- An S, Park G, Jung H, Jang D. 2022. Assessment of future drought index using ssp scenario in Rep. of Korea. *Sustainability* 14(7): 4252. doi: 10.3390/SU14074252
- Chae Y, Choi SH, Kim YJ. 2020. Climate change policy implications of sustainable development pathways in Korea at sub-national scale. *Sustainability* 12(10): 4310. doi: 10.3390/SU12104310
- Choi IY, Kang MK, Choi JH. 2013. Change of organic matter decomposition rates and greenhouse gas emission of the soil of Gyeongan Stream under different environmental conditions (in Korean with English abstract). *Korean J Ecol Environ* 46(1): 75-85. doi: 10.11614/KSL.2013.46.1.075
- Fumoto T, Kobayashi K, Li C, Yagi K, Hasegawa T. 2008. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Glob Chang Biol* 14(2): 382-402. doi: 10.1111/J.1365-2486.2007.01475.X
- Geum D-H, Sin M-H. 2022. Contributing to water conservation and carbon reduction through water management in rice fields. *Mag Korean Soc Agric Eng* 64(2): 20-27.
- Gilhespy SL, Anthony S, Cardenas L, Chadwick D, del Prado A, Li C, Misselbrook T, Rees RM, Salas W, Sanz-Cobena A, et al. 2014. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution. *Ecol Model* 292: 51-62. doi: 10.1016/J.ECOLMODEL.2014.09.004
- Haque MM, Kim SY, Ali MA, Kim PJ. 2015. Contribution of greenhouse gas emissions during cropping and fallow seasons on total global warming potential in mono-rice paddy soils. *Plant Soil* 387(1-2): 251-264. doi: 10.1007/S11104-014-2287-2
- Hong SC, Jeon SH. 2021. Will the climate change reduce rice production in Korea? (in Korean with English abstract). *Korea Rev Appl Econ* 23(1): 5-48.
- Hwang W, Kim C, Cho K, Hyun S. 2021. Characteristics of greenhouse gas emissions from rice paddy fields in South Korea under climate change scenario RCP-8.5 using the DNDC model. *Pedosphere* 31(2): 332-341. doi: 10.1016/S1002-0160(20)60068-6
- Hwang W, Kim YS, Min H, Kim J-G, Cho K, Hyun S. 2017. Evaluating the applicability of the DNDC model for estimation of CO₂ emissions from the paddy field in Korea (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Biol* 35(1): 13-20. doi: 10.11626/KJEB.2017.35.1.013
- Hwang W, Park M, Cho K, Kim JG, Hyun S. 2019. Mitigation of CO₂ and N₂O emission from cabbage fields in Korea by optimizing tillage depth and N-fertilizer level: DNDC model simulation under RCP 8.5 scenario. *Sustainability* 11(21): 6158. doi: 10.3390/SU11216158
- Ikhwal MF, Nur S, Darmansyah D, Hamdan AM, Ersan NS, Aida N, Yusra A, Satria A. 2022. A review of climate change studies on paddy agriculture in Indonesia. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 1116: 012052. doi: 10.1088/1755-1315/1116/1/012052
- Jeong H, Kim C. 2015. Greenhouse gas reduction targets and response strategies of agricultural sector. *Naju, Korea: Korea Rural Economic Institute. KREI*

- Agri-Policy Focus No. 115.
- Jeong HC, Lee JS, Choi EJ, Kim GY, Seo SU, So KH. 2014. Evaluation of greenhouse gas emissions using DNDC model from paddy fields of 16 local government levels (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 5(4): 359-366. doi: 10.15531/KSCCR.2014.5.4.359
- Jo HW, Park E, Sitokonstantinou V, Kim J, Lee S, Koukos A, Lee WK. 2023. Recurrent U-Net based dynamic paddy rice mapping in South Korea with enhanced data compatibility to support agricultural decision making. *GISci Remote Sens* 60(1): 2206539. doi: 10.1080/15481603.2023.2206539
- Kim E-J. 2021. Climate crisis, agriculture and food sovereignty (in Korean with English abstract). *Bio-Med Law* 26: 171-206.
- Kim HY, Ko J, Kang S, Tenhunen J. 2013. Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate. *Glob Chang Biol* 19(2): 548-562. doi: 10.1111/GCB.12047
- Kim JH, Sung JH, Shahid S, Chung ES. 2022. Future hydrological drought analysis considering agricultural water withdrawal under SSP scenarios. *Water Resour Manag* 36(9): 2913-2930. doi: 10.1007/S11269-022-03116-1
- Ko J-Y, Lee J-S, Woo K-S, Song S-B, Kang J-R, Seo M-C, Kwak D-Y, Oh B-G, Nam M-H. 2011. Effects of soil organic matter contents, paddy types and agricultural climatic zone on CH₄ emissions from rice paddy field (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 44(5): 887-894.
- Kong KS, Lee CL, Lee MH. 2013. Evaluating multifunctionality of rice-farming as regards climate change (in Korean with English abstract). *Korean J Agric Manag Policy* 40(2): 352-380.
- Kwon OS, Lee HB. 2012. Climate change, agricultural productivity, and their general equilibrium impacts: A recursive dynamic CGE analysis (in Korean with English abstract). *Environ Resour Econ Rev* 21(4): 947-980.
- Lee DB, Jung SC, So KH, Jeong JW, Jung HC, Kim GY, Shim KM. 2012. Evaluation of mitigation technologies and footprint of carbon in unhulled rice production (in Korean with English abstract). *Clim Change Res* 3(2): 129-142.
- Li C. 1996. The DNDC model. In: Powlson DS, Smith P, Smith JU (eds). *Evaluation of soil organic matter models*. Berlin/Heidelberg: Springer. p. 263-267. doi: 10.1007/978-3-642-61094-3_20
- Meinshausen M, Nicholls ZRJ, Lewis J, Gidden MJ, Vogel E, Freund M, Beyerle U, Gessner C, Nauels A, Bauer N, et al. 2020. The Shared Socio-economic Pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci Model Dev* 13(8): 3571-3605. doi: 10.5194/GMD-13-3571-2020
- Min H, Kim M-S, Kim J-G, Hwang W. 2018. DNDC modeling for greenhouse gases emission in rice paddy of South Korea and the effect of flooding management change and RCP 8.5 scenario (in Korean with English abstract). *Ecol Resilient Infrastruct* 5(3): 189-198. doi: 10.17820/ERI.2018.5.3.189
- Minamikawa K, Fumoto T, Itoh M, Hayano M, Sudo S, Yagi K. 2014. Potential of prolonged midseason drainage for reducing methane emission from rice paddies in Japan: A long-term simulation using the DNDC-Rice model. *Biol Fertil Soils* 50(6): 879-889. doi: 10.1007/S00374-014-0909-8
- Morkunas M, Volkov A. 2023. The progress of the development of a climate-smart agriculture in Europe: Is there cohesion in the European Union? *Environ Manag* 71(6): 1111-1127. doi: 10.1007/S00267-022-01782-W
- Oh Y, Choi J-Y, Yoo S-H, Lee T-S. 2010. Estimations of GHG emissions in paddies using DNDC model. *Proceedings of 2010 KSAE Annual Conference*; 2010 Oct 5~Oct 6; Konkuk University. Seoul, Korea: The Korean Society of Agricultural Engineers. p. 189.
- Oh Y-G, Choi J-Y, Yoo S-H, Lee T-S, Park N-Y. 2011. Estimation of GHG emissions by flooding water depth in a rice paddy soil using DNDC. *Proceedings of*

- 2011 KWRA Academic Conference; 2011 May 17~May 18; EXCO. Daegu, Korea: The Korea Water Resources Association. p. 462.
- RDA (Rural Development Administration). 2019. Rice quality improvement technology. Agricultural technology guide.
- Seo HW, Choi HW, Kim DW, Lee HH, Min SY, Park SK, Lee SH, Kim MJ, Kim JY. 2022. 2021 National greenhouse gas inventory report of Korea. Cheongju, Korea: Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. 11-1480906-000002-10.
- Seo M-C, Kim JH, Choi KJ, Lee Y-H, Sang W-G, Cho HS, Cho J-I, Shin P, Baek JK. 2020. Review on adaptability of rice varieties and cultivation technology according to climate change in Korea (in Korean with English abstract). *Korean J Crop Sci* 65(4): 327-338. doi: 10.7740/KJCS.2020.65.4.327
- Shin D-H, Lee M, Park J-H, Lee Y-S. 2015. A meta analysis of the climate change impact on rice yield in South Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Data Inf Sci Soc* 26(2): 355-365.
- Shin MH, Jang JR, Won CH, Kum DH, Jung YH, Lee SI, Lim KJ, Choi JD. 2014. Simulation of GHG emission from paddy field using DNDC model (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Agric Eng* 56(2): 47-57. doi: 10.5389/KSAE.2014.56.2.047
- Shin YK, Yun SH, Park ME. 1995. Estimation of methane emission by water management and rice straw application in paddy soil in Korea. *Korean J Soil Sci Fert* 28(3): 261-265.
- Tang H, Qiu J, Van Ranst E, Li C. 2006. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model. *Geoderma* 134(1-2): 200-206. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2005.10.005
- Verschuuren J. 2018. Towards an EU regulatory framework for climate-smart agriculture: The example of soil carbon sequestration. *Transnatl Environ Law* 7(2): 301-322. doi: 10.1017/S2047102517000395
- Wiebe K, Lotze-Campen H, Sands R, Tabeau A, Van Der Mensbrugge D, Biewald A, Bodirsky B, Islam S, Kavallari A, Mason-D'Croz D, et al. 2015. Climate change impacts on agriculture in 2050 under a range of plausible socioeconomic and emissions scenarios. *Environ Res Lett* 10(8): 085010. doi: 10.1088/1748-9326/10/8/085010
- Yun S-H, Im J-N, Lee J-T, Shim K-M, Hwang K-H. 2001. Climate change and coping with vulnerability of agricultural productivity (in Korean with English abstract). *Korean J Agric For Meteorol* 3(4): 220-237.
- Zhang Y, Niu H. 2016. The development of the DNDC plant growth sub-model and the application of DNDC in agriculture: A review. *Agric Ecosyst Environ* 230: 271-282. doi: 10.1016/J.AGEE.2016.06.017