



## DNDC를 이용한 논외 온실가스 배출량 모의

### Simulation of GHG Emission from Paddy Field using DNDC Model

신민환\* · 장정렬\*\* · 원철희\* · 금동혁\* · 정영훈\* · 이수인\* · 임경재\* · 최중대\*†

Shin, Min Hwan · Jang, Jeong Ryeol · Won, Chul Hee · Kum, Dong Hyuk ·

Jung, Young Hun · Lee, Su In · Lim Kyoung Jae · Choi, Joong Dae

#### ABSTRACT

This study was conducted to predict greenhouse gas (GHG) emission from paddy by future climate change scenario in Korea. Chuncheon city in Kangwon province were selected as study area. A1B Special Report on Emission Scenario (SRES) of the IPCC (Intergovernmental panel on climate change) was used to assess the future potential climate change. The rainfall and temperature was projected to increase by 8.4 % and 1.9 % (2040s), 35.9 % and 27.0 % (2060s), 19.2 % and 30.8 % (2090s), respectively, compare to the 2010s value. Under the climate change, Denitrification-Decomposition (DNDC) predicted an increase in N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from paddy. The simulations resulted in annual net emissions of 0.4~2.4, 500.5~734.5 and 29.4~160.4 kg/ha/year of N<sub>2</sub>O-N, CH<sub>4</sub>-C and CO<sub>2</sub>-C, respectively, with a cumulated global warming potential (GWP) of 14.5~21.7 t·CO<sub>2</sub>/ha/year were affected by rainfall, temperature, manure amendment and fertilizer amount. The simulation results suggested that implementation of manure amendment or reduction of water consumption instead of increased fertilizer application rates would more efficiently mitigate GHG emissions.

**Keywords:** Climate change; GHG; Paddy; Rainfall; SRES

## 1. 서 론

농업분야에서 기후변화에 따른 강수량 증가로 인해 농지가 유실되고, 온도변화로 인해 작물의 주산지가 북상하는 등 재배적지가 변화하며, 농산물의 수량과 품질에 영향을 미친다. 따라서 농업분야에서 기후변화에 대한 대응책으로 기후변화에 영향을 끼치는 탄소 배출을 모의하여 탄소배출량 저감을 위한 노력이 필요하다. 논이나 밭 등 농경지에서 배출되는 온실가스는 크게 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O로 구분된다. 이중 우리나라의 논은 담수상태에서 벼를 재배하기 때문에 대기로부터 산소공급이 원활하지 않아 토양 내 유기물은 혐기적 분해과정을 거쳐 밭 토양에서 발생되지 않는 미량기체들이 배출되며, CH<sub>4</sub>의 주 배출원으로 알려져 있다. 또한 CO<sub>2</sub> 대비 310배에 달하는 N<sub>2</sub>O의 주 배출원은 가축분뇨나

농경지에 사용되는 질소질 비료이기 때문에 (IPCC, 1996), 농경지에서 발생하는 온실가스를 효과적으로 저감하기 위해서는 담수상태로 유지되는 논에서 배출되는 온실가스를 저감시켜야 한다. 그러나 아직까지 논에서 배출되는 온실가스에 대한 정량적인 연구가 미흡하며, 정량적인 연구가 이루어진 연구 또한 일 1회 또는 주 1회 측정하여 월별이나 연간 배출량으로 환산하여 연간 온실가스 배출량을 평가한다 (Kim et al., 2012; Kim and Oh, 2003). 따라서 농경지에서 발생하는 온실가스의 정량적인 연구가 필요한 실정이며, 이를 이용한 온실가스 배출특성을 분석할 필요가 있다.

농업지역에서 발생하는 온실가스 배출모의를 위해 최근에는 캐나다, 미국, 중국, 유럽 등 세계각지에서 Denitrification-Decomposition (DNDC) 모델을 이용하고 있다 (Dai et al. 2012; Follador et al. 2011; Gregorich et al. 2005; Wang et al. 2011). DNDC 모델은 토양 중 질소와 탄소 순환과정의 생지화학적 (biogeochemical) 모의를 목적으로 개발되었으며 (ISE, 2009), 논과 밭, 산림, 초지 등에서 발생하는 온실가스 (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>)를 모의하는데 사용되어 왔다 (Li et al., 2006; Xu et al., 2011; Abdalla et al., 2011). 따라서 국내의 토양특성과 영농활동 그리고 기후변화에 따른 농업지역의 온실가스 배출특성을 분석하여 이를 저감시키는 방안을 연구할 필요가 있다.

\* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

\*\* 한국농어촌공사 농어촌연구원

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6464

Fax: +82-33-251-1518

E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

2013년 10월 22일 투고

2014년 2월 24일 심사완료

2014년 2월 24일 게재확정

따라서, 본 연구에서는 연구지역의 기후변화에 따른 논 의 온실 가스 배출량 모의하고 온실가스 배출량을 저감하기 위한 대책을 모색하였다. 이를 위해 1) 기상청에서 제공되는 Special Report on Emission Scenarios (SRES) A1B 시나리오를 이용하여 2020s (2010~2039), 2050s (2040~2069), 2080s (2070~2099) 의 기간에 변화되는 강수량과 온도의 변화를 분석하였으며, 2) 강 수량과 온도변화 그리고 실제 측정된 논 의 영농활동자료 (입력자 료) 등을 이용하여 DNDC 모델의 입력자료를 구축하여, 논에서 발생하는 온실가스 배출량의 변화를 모의하였다.

## II. 연구방법

### 1. 기후변화 시나리오

본 연구에서는 춘천시 (연구지역)의 미래 기후변화를 분석하기 위하여 기상청 기후변화정보센터 (Climate change information change, CCIC)에서 SRES A1B 시나리오에 대한 기후변화 자료를 제공받았다. 여기서 기상청에서 제공되는 기후변화 시나리오는 크게 Representative Concentration Pathway (RCP)와 SRES 시나리오로 구분이 되며, 세부적으로 공간범위와 시간범위 그리고 공간해상도에 따라 전지구 전망자료, 한반도 전망자료, 고해상 도 전망자료, 그리고 기후 극한지수로 구분이 된다. 그러나 RCP 시나리오의 경우 편이보정을 위한 시간범위가 충분하지 않으며, SRES 시나리오 중 고해상도 전망자료나 기후 극한지수 시나리오는 시간범위와 공간해상도가 편이보정과 해상도에서 한반도 전망 자료 시나리오보다 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 SRES A1B 시나리오 중 한반도 전망자료 (공간해상도: 약 27 km)를 선 정하여 분석하였다. A1B 시나리오의 경우 현실에 가장 잘 부합 되는 시나리오로써 많은 연구자들에 의해 사용되었다 (Kwon et al., 2008; Park et al., 2010; Yun et al., 2011).

SRES A1B 시나리오 모의 결과를 이용하여, 월별 및 일별 강우 량 자료와 최고온도, 최저온도의 데이터를 2020s (2010~2039), 2050s (2040~2069), 2080s (2070~2099)으로 구분하여 미 래의 강우량과 기온의 변화를 분석하였다. 기상청에서 제공하는 한반도 전역의 기후변화 자료 (강수량, 기온 등)는 GIS 프로그램을 이용하여 사용할 수 있는 ESRI ascii grid 파일 형태로 저장되어 있다. 기후변화자료를 추출하기 위해 프로그래밍 언어인 C#과 Fortran을 이용하여 자동적으로 데이터를 생성하는 프로그램을 개발하여 이용하였다. 인터페이스 구성에는 C#을 이용하였으며, Fortran은 시나리오에서 데이터를 추출하는 엔진을 개발하여 이 용하였다. 기상자료 추출방법은 인터페이스 상에서 해당 연구지 역의 포인트 ID (해당 지역의 격자번호)를 입력하고 버튼을 클릭 하면 자동으로 해당지점의 데이터가 47,482개의 ascii파일에서

하나의 기상자료 (연별) 파일에 저장된다. 이때 연구지역의 포인 트 ID를 알기 위해서 기상청에서 제공받은 A1B 한반도 시나리오 를 GIS 데이터로 변환하여 격자별 포인트 ID를 부여하였다.

Carter et al. (1999)에 따르면 본 연구에서와 같이 기상청에서 제공하는 기후모델의 결과물 등을 사용하여 기후변화를 해석할 경우 신뢰성을 높이기 위하여 기후 모델 결과와 실제 관측자료를 비교하여 확인하는 과정이 필요하다고 하였다. 따라서 Alcamo et al. (1997)과 Park et al. (2009)이 사용한 편이보정 (Bias Correction) 방법을 이용하여 미래 기후변화 자료를 작성하였다. 작성방법은 시나리오에 의한 과거기후변화 32년 (1980~2011) 자료와 기상청의 과거 32년 (1980~2011)자료의 강수량과 기 온 자료를 비교하여 편이보정 하였으며 이때 사용된 식은 식 (1) ~ (2)와 같다.

$$P' \text{ GCM.fut} = P\text{mean} \times (PGCM.fut/PGCM.pas) \quad (1)$$

여기서, P' GCM.fut는 보정된 미래의 강수량, Pmean는 과거 30년 기간의 관측된 강수량, PGCM.fut는 시나리오에 의해 모의 된 미래 강수량 평균, 그리고 PGCM.pas는 과거 30년 동안의 시 나리오 모의된 강수량의 평균값이다.

$$T' \text{ GCM.fut} = T\text{mean} + (TGCM.fut - TGCM.pas) \quad (2)$$

여기서 T' GCM.fut는 보정된 미래의 온도, Tmean은 시나리오 에 의해 모의된 미래 온도의 평균, TGCM.pas는 과거 30년 동안 의 시나리오에 의해 모의된 온도의 평균값이다.

### 2. DNDC를 이용한 논 의 온실가스

DNDC 모델은 농업 생태계의 탄소 (C)와 질소 (N)의 생지화학 적 과정에 기반을 둔 모델로써, 탄소와 농업 생태계의 질소 생지 화학의 프로세스 중심의 컴퓨터 시뮬레이션 모델로 두 개의 성분 으로 구성되어 있다 (Fig. 1). 토양기상과 작물의 성장 및 분해 등의 부모모델로 구성된 첫 번째 구성 요소는 토양온도, 수분, pH, 산화환원전위 (Eh)와 생태활동 (예: 기후, 토양, 식물 및 인위적 활동에 의해 발생)등의 변화요소에 따라 모의한다. 질화, 탈질 및 발효 부 모델로 이루어진 두 번째 구성 요소는 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>), 메탄 (CH<sub>4</sub>), 암모니아 (NH<sub>3</sub>), 질소산화물 (NO), 아산화질소 (N<sub>2</sub>O) 및 이질소 (N<sub>2</sub>)의 배출량을 모의한다. 각 부 모델은 실험 연구에서 도출한 경험적 방정식뿐만 아니라 물리, 화학 및 생물학 등의 고전법칙 등을 결합하여 각 생지화학적 반응의 매개변수를 모델 내에 결합한다. 강우 발생시 질산성 질소는 토양내의 깊은 층으 로 스며들게 된다. 즉, 암모늄 이온 농도가 높고 토양유기물의 탄

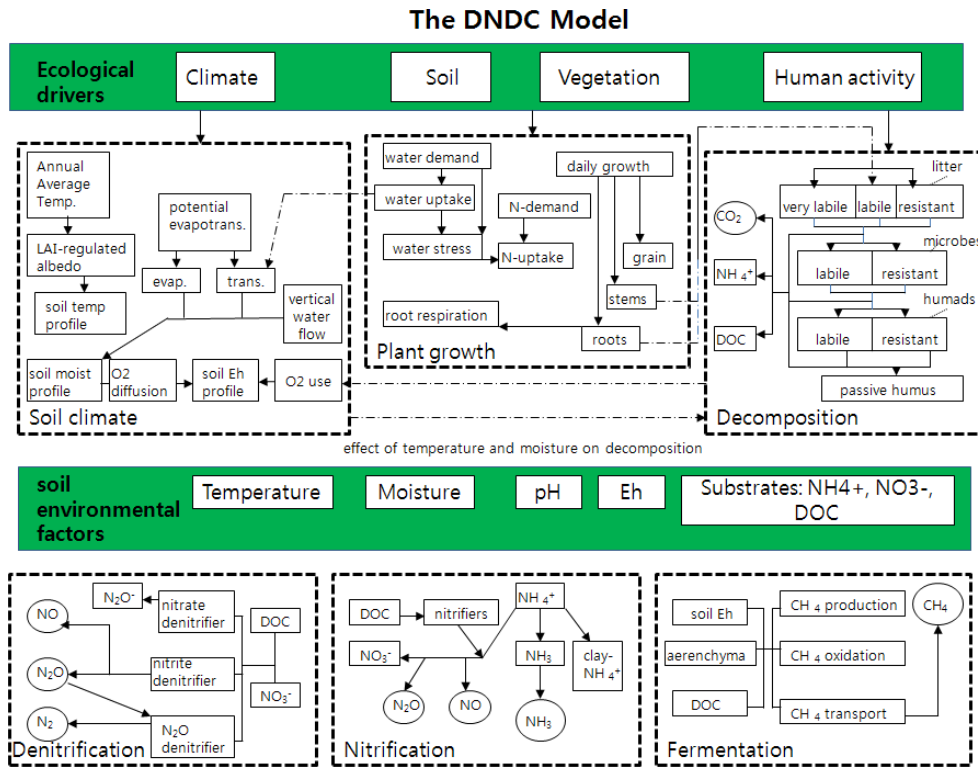


Fig. 1 Structure of the DNDC model (<http://www.dndc.sr.unh.edu>)

Table 1 Characteristics of the paddy field experimental site in this study

Climate	Site		Latitude		N concentration in rainfall (ppm)		Atmospheric background CO <sub>2</sub> con. (ppm)	
	Chuncheon		37		1.6		395.7	
Soil	Land-use type	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	pH		SOC		Field capacity	
	Loam	1.42	5.9		0.014152		0.49	
Crop	Crop	Tillage	Fertilizer (kg/ha)	Planting month	Harvest month	Biomass fraction (Grain)	Biomass fraction (root)	biomass C/N ratio (grain)
	Rice paddy field	deep ploughing, 30 cm	Nitrate: 110	May. 13	Sep. 08	0.41	0.05	45
Tillage	How many applications in this year		Tilling		Month		Tilling method	
	1		1		Apr. 28		deep ploughing, 30 cm	
Fertilization	Application date	Application depth	depth (cm)	Applied amount of fertilizers - Urea	Applied amount of fertilizers - Anhydrous ammonia	Applied amount of fertilizers - ammonium bicarbonate	Applied amount of fertilizers - Nitrate	
	Apr. 29	injection	20	0	0	0	110	

질비가 낮거나 pH의 중성화, 통기성, 수분함량 및 온도조건에 따라 질산화가 일어나게 된다. 모델의 모의과정에서 혐기성 상태의 간단한 유도방식은 토양구성내의 산소 또는 다른 이산화질소 성분을 계산함으로써 예측한다. 혐기성 상태가 증가할 경우 용해유기물탄소, 암모늄, 질소 등의 물질은 탈질화반응을 높여 혐기성 미세공극으로 구분되어진다. 그러나 혐기성 상태가 감소할 경우,

호기성 미세공극 내에 물질들의 재 구분으로 질산화를 높이게 된다. NO와 N<sub>2</sub>O 가스는 질화작용과 탈질작용에 의해 토양에서 발생하게 된다.

DNDC 모델의 기후자료 (최고온도, 최저온도, 강수량)는 기상청에서 제공하는 자료를 편이보정 하여 활용하였으며, 토양자료는 한국토양정보시스템 (<http://asis.rda.go.kr/>)에서 제공하는 자

**Table 2 Condition for analysing GHG emission under different cropping system**

Soil Land-use type	Cropping	
	Fertilizer (kg/ha)	Flooding
Loam	90	Conventional
Clay loam	110	Rainfed
	130	Marginal

료와 연구대상지역에서 분석한 자료를 이용하여 입력 자료를 구축하였다. 또한 Table 1과 같이 기후, 토양, 작물, 경운방법, 비료 등의 모델 입력자료를 구축하였으며, 이는 2011년도 강원대학교 농장의 논에서 썩래질, 파종일, 수확일, 관개일수 등 영농활동을 정리한 결과이다.

### 3. 기후변화에 따른 논 의 온실가스 모의

기후변화에 의한 논 의 온실가스 변화를 모의하기 위하여 기후 변화 자료 (최고온도, 최저온도, 강수량)와 Table 1의 입력자료를 활용하였으며, Table 2와 같이 토성을 롬 (Loam)에서 점토질 롬 (Clay loam)으로 변경할 경우와 비료의 사용량이 110 kg/ha에서 90 kg/ha 또는 130 kg/ha로 감소 또는 증가할 경우, 그리고 물관리 방법을 일반 답수방법 (Conventional)에서 천수답 (Rainfed, 벼농사에 필요한 물을 빗물에만 의존하는 경우)이나 절수관개 (Marginal, 관개수 부족으로 인한 최소 관개)으로 변경하였을 때 발생하는 온실가스 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 배출량의 변화를 모의하였다. 또한 온실가스 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)의 배출량을 모두 CO<sub>2</sub> 상당량으로 환산하여 지구온난화잠재력 (GWP, Global Warming Potential)을 산정하였다. 여기서 GWP는 CO<sub>2</sub> 배출량은 1배, CH<sub>4</sub> 배출량은 21배, N<sub>2</sub>O 배출량은 310배를 곱하여 합한 값으로 산정이 된다 (IPCC, 1996).

## III. 결과 및 고찰

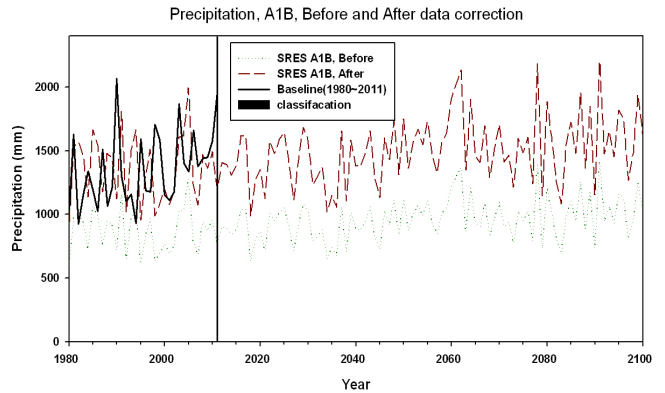
### 1. 편이보정

연구지역의 편이보정에 따른 강수량과 온도의 보정 전후 결과를 나타냈다 (Fig. 2~3). 결과와 같이 기상청에서 제공하는 A1B 시나리오 기후자료 결과는 보정을 위한 기준년도가 되는 2011년을 기준 (Classification)으로 과거 32년 기후자료 데이터에 비해 강수량과 온도 모두 과소 추정된 것으로 나타나, 편이보정 하였다. 이때 사용된 보정 값은 강수량은 1.56, 온도는 4.32이다.

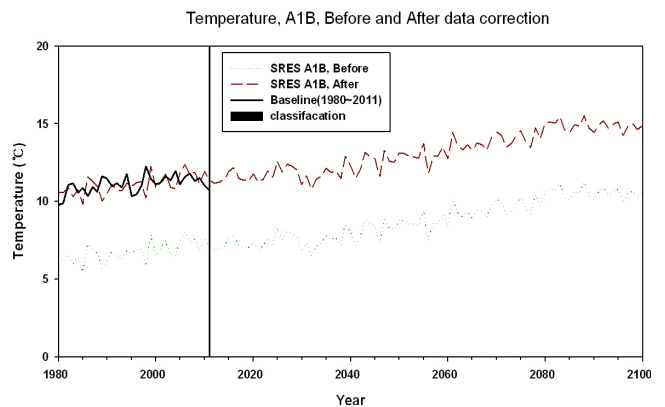
### 2. 기후변화에 의한 강수량 변화

연구지역의 기후변화 데이터를 편이보정 한 후 나타난 데이터

를 분석한 결과 Table 3과 Fig. 4와 같다. 과거 32년 연평균 강수량은 1,356.8 mm인 것으로 나타났으며, 기후변화에 의한 연평균 강수량은 1,371.4 mm (2020s), 1,557.2 mm (2050s), 1,566.5 mm (2080s)로 각각 1.1 %, 14.8 %, 그리고 15.5 %가 증가하는 것으로 나타났다. 계절적인 영향을 보면 Table 4와 Fig. 6과 같이 우리나라의 계절적 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났으며, 기후변화에 의한 여름철 강수량이 연평균 강수량의 34.8 % (2020s), 37.2 % (2050s), 36.3 % (2080s)를 차지하는 것으로 나타났다.



**Fig. 2 Adjusted precipitation data using 32 years (1980~2011) historical data**



**Fig. 3 Adjusted temperature data using 32 years (1980~2011) historical data**

**Table 3 The annual mean precipitation on study area by climate change**

Period	Annual mean precipitation (mm)	Percent of increase based on baseline(%)
Baseline (1980-2011)	1,356.8	-
2020s (2010-2039)	1,371.4	1.1
2050s (2040-2069)	1,557.2	14.8
2080s (2070-2099)	1,566.5	15.5

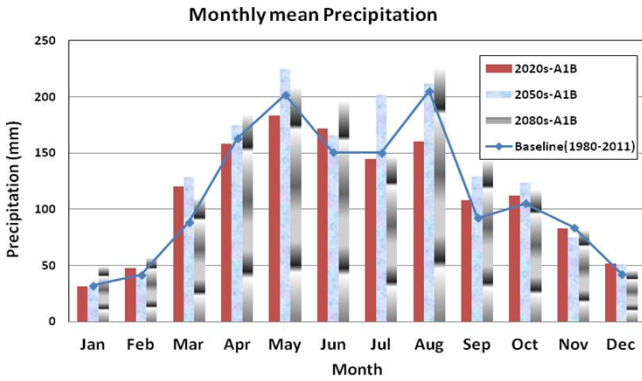


Fig. 4 Monthly mean precipitation on study area by climate change

3. 기후변화에 의한 온도 변화

강수량과 동일한 방법으로 기후변화 데이터를 편이보정 한 후 연평균 기온과 변화량 그리고 월평균 기온을 분석하였다. Table 4 와 Fig. 5는 기후변화에 의한 연평균 기온과 월평균 기온이다. 결과와 같이 과거 32년 평균 온도는 6.8 °C로 나타났다. 기후변화에 의한 평균온도는 강수량과 동일하게 우리나라의 계절적 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났으며, 기준 년 (1980~2011)에 비해 7.4 °C (2020s), 8.7 °C (2050s), 10.3 °C (2080s)로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화에 의해 각각 0.6 °C, 1.9 °C, 그리고 3.5 °C가 증가하는 것이다.

본 연구에서의 강수량과 온도변화는 Lee et al. (2012)이 A1B 시나리오를 이용하여 수인지역의 기후변화를 분석한 결과 강수량은 21.5 %, 온도는 2.8 °C (2085s) 증가한다는 결과와 유사한 결과이며, Jang and Ahn (2012)이 A1B 시나리오를 이용하여 낙동강 유역의 기후변화를 분석한 결과 강수량 25.1 %와 1.86 °C (2080s) 증가한다는 결과와 유사한 결과이다.

선행연구와 본 연구결과와 같이 우리나라 지역의 월평균 기온이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 기온상승에 따른 기후변화는 식량, 건강, 수자원 등의 다양한 환경에 큰 영향을 끼칠 수 있으며, Chae and Youm (2010)에 따르면 기온상승에 따라

Table 4 The annual mean temperature on study area by climate change

Period	Annual mean temperature (°C)	Percent of increase based on baseline (%)	Amount of increase based on baseline (°C)
Baseline (1980-2011)	6.8	-	-
2020s (2010-2039)	7.4	9.3	0.6
2050s (2040-2069)	8.7	28.4	1.9
2080s (2070-2099)	10.3	52.2	3.5

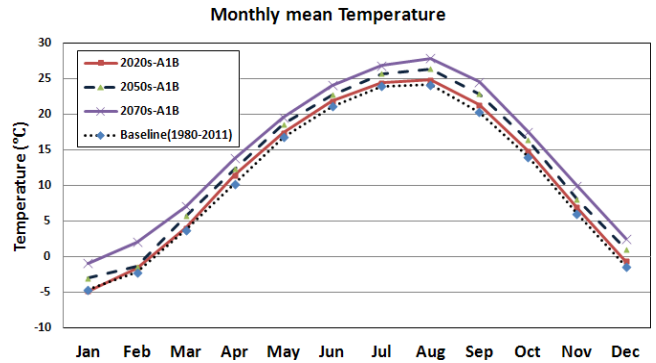


Fig. 5 Monthly mean temperature on study area by climate change

극심한 물 부족에 시달릴 뿐만 아니라 말라리아의 위험에 처한 인구가 증가한다고 하였다. 이러한 기후변화는 특정 지역이나 국가에 국한 될 뿐만 아니라 전 세계적으로 위험에 빠지게 된다. 특히, 농업분야를 살펴보면 우리나라의 벼 생산량이 온도의 1 °C 상승시 약 2.93 % 감소하는 것으로 예측하고 있어, 이에 대한 대책이 시급할 것으로 보여진다 (KEI, 2009).

4. 논의 온실가스 모의

논에서 실제 측정된 입력자료 (영농활동 자료)와 최근 10년간 (2001~2010)의 기후 (강수량, 온도)자료를 이용한 온실가스 배출량을 산정하였다 (Fig. 6). 연구지역의 2002년부터 2011년까지의 평균 강우량과 평균기온은 1,444.8 mm와 11.5 °C 이었으며, 이때 논에서 배출되는 CO<sub>2</sub>는 평균 66.9 kg C/ha/yr, CH<sub>4</sub>는 평균 585.0 kg C/ha/yr, N<sub>2</sub>O는 평균 1.0 kg N/ha/yr의 양을 배출하는 것으로 나타났다 (Table 5). 이를 이용하여 산정된 GWP는 17.1 t

Table 5 The simulated results of GHG and biomass according to measured data at paddy field

Date	Precip. (mm)	Temp. (°C)	Biomass	CO <sub>2</sub> (kg/ha/yr)	N <sub>2</sub> O (kg/ha/yr)	CH <sub>4</sub> (kg/ha/yr)
2002	1,177.7	11.6	4,032	35.0	0.8	576.8
2003	1,868.3	11.4	4,536	62.0	1.5	528.5
2004	1,405.0	12.0	4,556	61.0	0.6	588.8
2005	1,334.8	11.1	4,560	96.0	1.3	628.2
2006	1,659.4	11.6	4,498	71.0	1.0	555.0
2007	1,374.9	11.8	4,639	56.0	0.9	597.4
2008	1,439.4	11.4	4,626	78.0	0.8	571.6
2009	1,446.9	11.5	4,612	122.0	0.8	566.0
2010	1,581.4	11.0	4,614	29.0	1.7	663.0
2011	1,200.3	11.4	4,695	59.0	0.2	574.7
Ave.	1,448.8	11.5	4,598	66.9	1.0	585.0

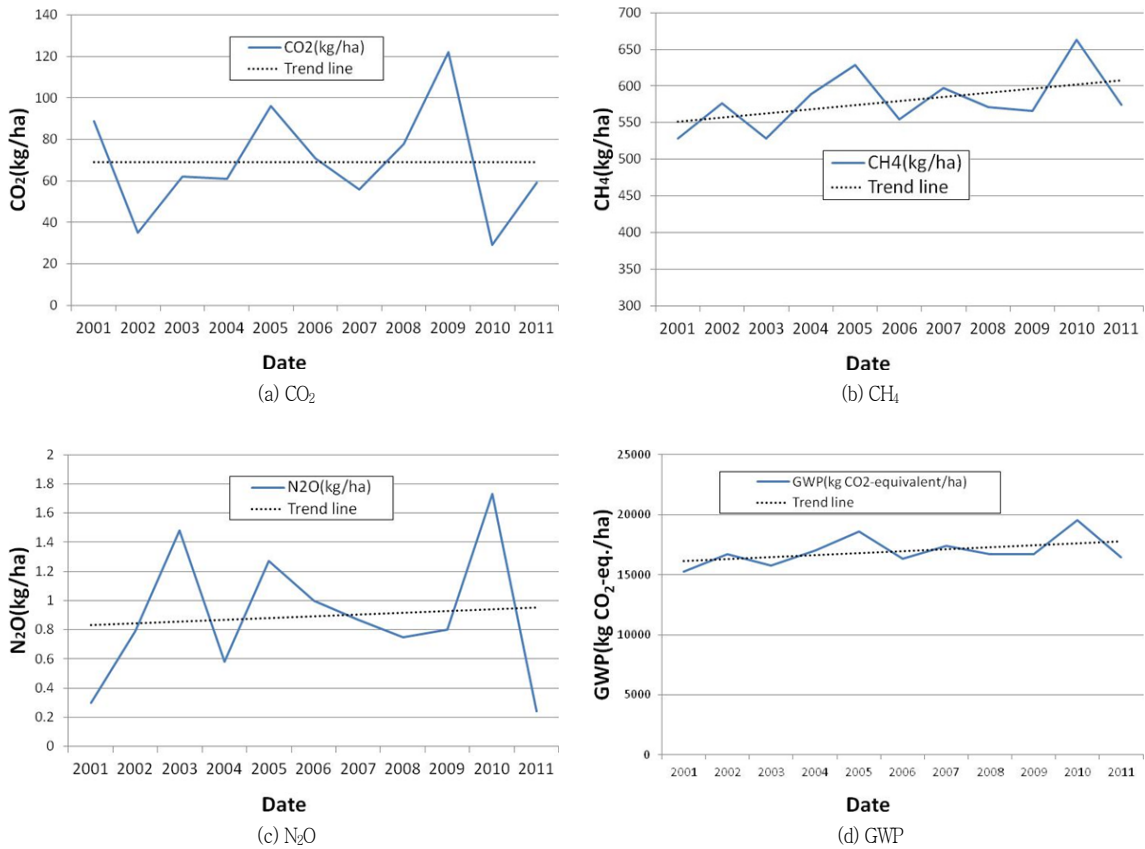


Fig. 6 The simulated results of GHG according to measured data at paddy field

Table 6 The simulated results of GWP and Net GWP according to measured data at paddy field

Date	GWP (kg CO <sub>2</sub> -equivalent/ha/yr)			Net GWP (t CO <sub>2</sub> -eq./ha/yr)
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	
2002	128.2	384.8	16,179.2	16.7
2003	227.2	721.0	14,824.2	15.8
2004	223.5	282.5	16,515.2	17.0
2005	351.7	618.7	17,620.9	18.6
2006	260.1	487.1	15,566.1	16.3
2007	205.2	423.8	16,755.6	17.4
2008	285.8	365.4	16,033.1	16.7
2009	447.0	389.7	15,875.2	16.7
2010	106.3	842.8	18,596.4	19.5
2011	216.2	116.9	16,120.3	16.5
Ave.	245.1	463.3	16,408.6	17.1

CO<sub>2</sub>-eq./ha/yr의 배출량으로 나타났다 (Table 6). 온실가스 배출량의 변화 경향을 살펴보면 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등 배출량의 증감이 뚜렷한 경향을 나타나지 않았으며, 강수량이 가장 많았던 2003년

도에 GWP의 값이 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 10년의 짧은 기간에 변화하는 온실가스의 경향을 분석한 결과로써, 강우량과 기온의 영향과 온실가스의 상관성을 분석하는데 문제가 있을 것으로 판단된다.

### 5. 기후변화에 따른 논외 온실가스 모의

기후변화에 따른 논외 온실가스 배출모의를 위해 연구지역에서 실제 측정된 입력자료 (영농활동 자료)와 기후변화자료 (2011 ~ 2099)를 이용하여 2020s (2010 ~ 2039), 2050s (2040 ~ 2069), 2080s (2070 ~ 2099)로 구분하여 온실가스 배출량을 분석하였다. 논외 온실가스 배출량의 변화는 Fig. 7 ~ 11과 Table 7 ~ 8과 같다. 연구지역의 N<sub>2</sub>O 배출량은 0.4 ~ 2.4 kg N/ha/yr로 나타났다으며, 기간별로 살펴보면 평균 1.0 kg N/ha/yr (2020s), 평균 1.2 kg N/ha/yr (2050s), 그리고 평균 1.5 kg N/ha/yr (2080s)로 나타나 연구지역은 강수량과 온도 등의 기후변화에 의해 N<sub>2</sub>O 발생량이 점차 증가하는 것으로 나타났다. CH<sub>4</sub> 배출량은 500.5 ~ 734.5 kg C/ha/yr의 범위로 배출되는 것으로 나타났으며, 기간별로 살펴보면 평균 577.0 kg C/ha/yr (2020s), 평균 613.6 kg C/

ha/yr (2050s), 그리고 평균 679.6 kg C/ha/yr (2080s)의 양을 배출 하는 것으로 나타났다. 또한 CO<sub>2</sub> 배출량은 29.4~160.4 kg C/ha/yr의 범위로 배출되는 것으로 나타났으며, 기간별로 살펴보면 평균 81.9 kg C/ha/yr (2020s), 평균 93.4 kg C/ha/yr (2050s), 그리고 평균 107.3 kg C/ha/yr (2080s)의 양을 배출하는 것으로 나타나 CO<sub>2</sub> 배출량 또한 기후변화에 의해 점차 증가하는 것으로 나타났다.

N<sub>2</sub>O와 CH<sub>4</sub> 그리고 CO<sub>2</sub>의 배출량을 고려한 온실가스 배출량 (GWP)의 경우 14.5~21.7 t CO<sub>2</sub>/ha/yr의 범위로 나타났으며, 기간별로 평균 17.0 t CO<sub>2</sub>/ha/yr (2020s), 18.6 t CO<sub>2</sub>/ha/yr (2050s), 그리고 20.2 t CO<sub>2</sub>/ha/yr (2080s)의 온실가스가 배출 되는 것으로 나타나 기후변화에 의해 논에서 발생하는 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 논에서 발생하는 온실가스 저감을 위해서는 강수량과 온도를 증가시키는 인자들의 저감을 위한 노력이 필요할 것으로 보여진다. Kim et al. (2012)

의 연구에 의하면 물관리 방법에 따른 온실가스 (메탄 및 아산화 질소) 저감효과를 평가하기 위해 5월 13일~9월 5일까지 관행 (상시답수), 관행모내기+중간낙수 2회 그리고 SRI (System of Rice Intensification) 시험포에서 주기적으로 온실가스 배출량을 측정하여 온실가스 배출 저감효과를 평가한 결과 SRI 시험포에서 가장 낮은 값을 보였으며, SRI 벼 재배는 관행 (상시답수) 대비 71.8 %의 온실가스 감축효과가 있다고 하였다 (Table 9). 선행 연구와 같이 실제 영농에서 측정된 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 그리고 CO<sub>2</sub>가 458.4 kg/ha와 0.000028 kg/ha, 그리고 14.2 ton/ha로 측정 되었으나, 본 연구에서 모의한 온실가스 배출량과 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이는 모의 결과의 경우 1년간 또는 일별로 산정된 온실가스 배출량 값으로써 실제 측정된 값과 차이가 난 것으로 보여진다. 그러나 Kim et al. (2012)의 연구결과와 같이 벼의 수확량에 감소가 없고, 물 절약에 효과가 있으며, 호기성 상태를 유지함으로써 온실가스 배출량이 저감된다면 아직까지 구체적인

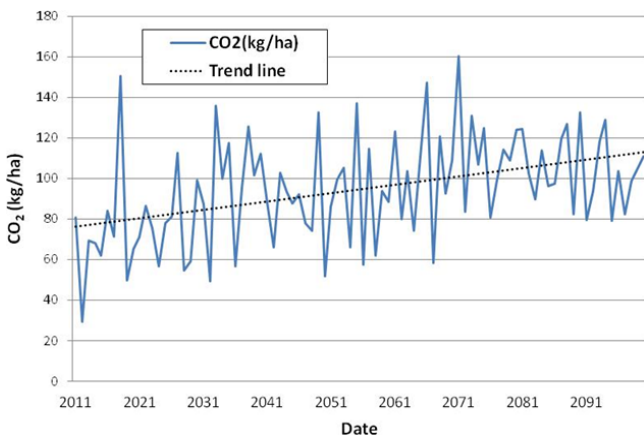


Fig. 7 The simulated results of CO<sub>2</sub> according to SRES A1B at paddy field

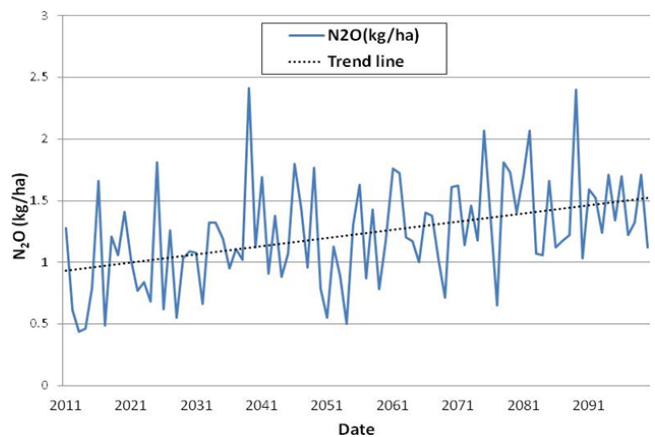


Fig. 9 The simulated results of N<sub>2</sub>O according to SRES A1B at paddy field

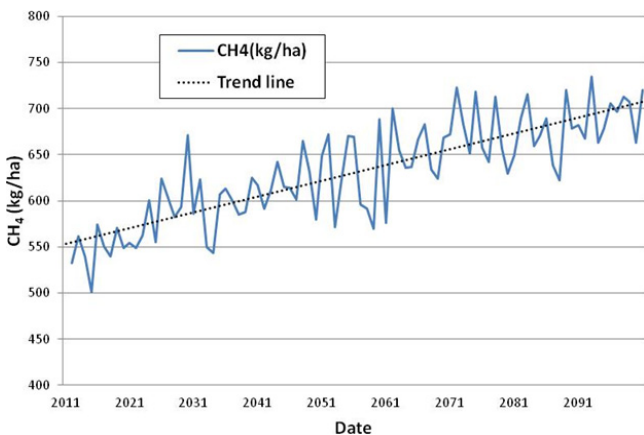


Fig. 8 The simulated results of CH<sub>4</sub> according to SRES A1B at paddy field

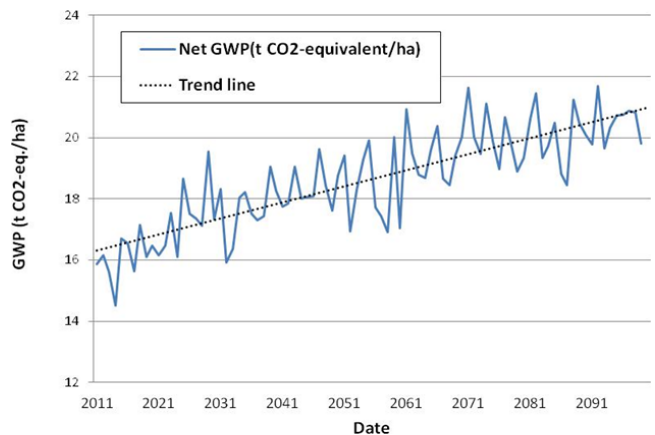


Fig. 10 The simulated results of GWP according to SRES A1B at paddy field

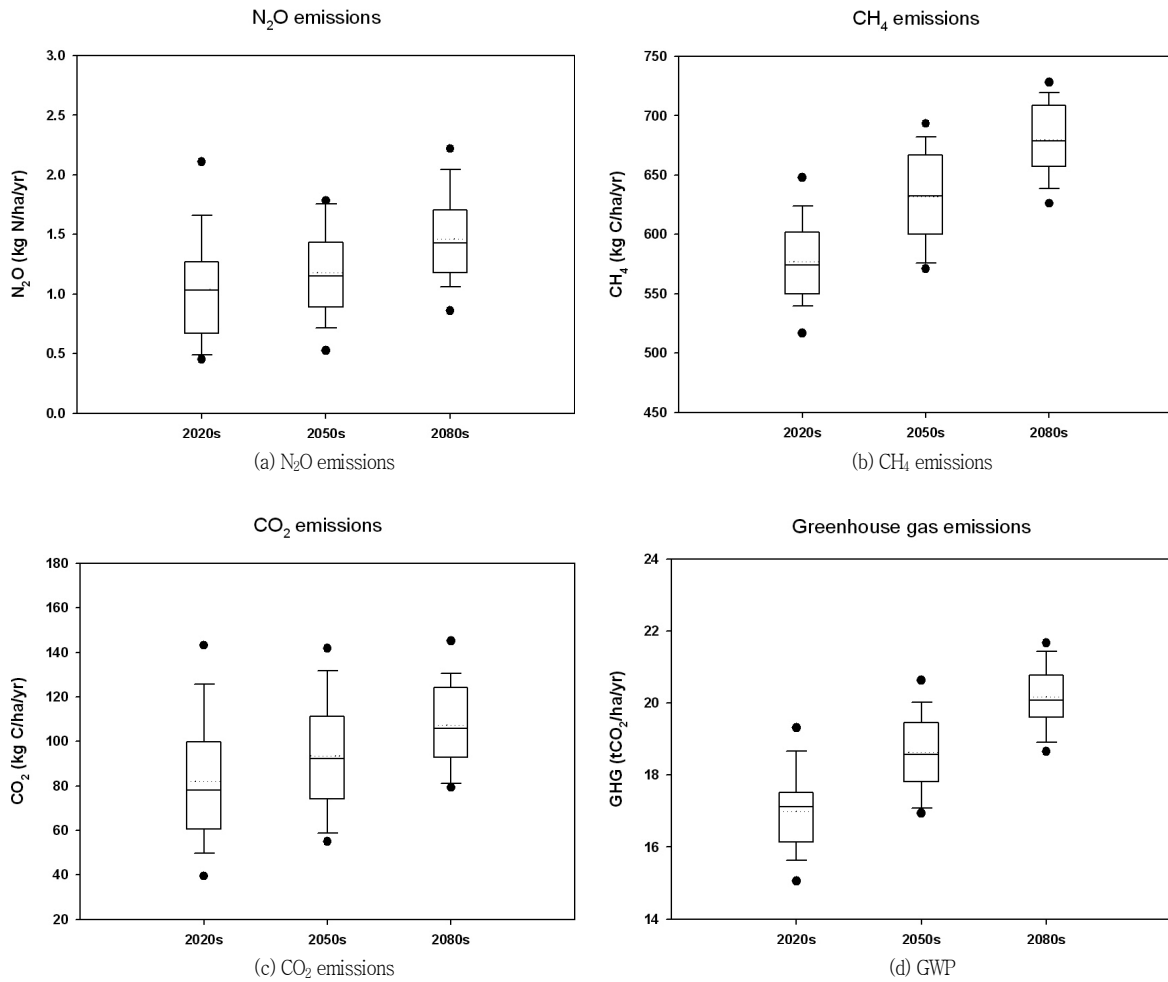


Fig. 11 The simulated results of GHG according to SRES A1B at paddy field

Table 7 The simulated results of GHG and biomass according to SRES A1B

Date		Precip. (mm)	Temp. (°C)	Biomass	CO <sub>2</sub> (kg/ha/yr)	N <sub>2</sub> O (kg/ha/yr)	CH <sub>4</sub> (kg/ha/yr)
2020s	Ave.	1,367.7	11.72	4,614	81.9	1.0	577.0
	Max	1,684.8	12.89	4,729	150.6	2.4	671.4
	Min	987.0	10.82	4,337	29.4	0.4	500.5
2050s	Ave.	1,557.8	13.02	4,566	93.4	1.2	631.6
	Max	2,136.2	14.44	4,668	147.3	1.8	699.7
	Min	1,134.1	11.50	4,256	51.7	0.5	570.0
2080s	Ave.	1,567.1	14.63	4,511	107.3	1.5	679.6
	Max	2,203.7	15.60	4,626	160.4	2.4	734.5
	Min	1,084.1	13.47	4,421	79.0	0.7	621.8

Table 8 The simulated results of GWP and Net GWP according to SRES A1B

Date		GWP (kg CO <sub>2</sub> -equivalent/ha/yr)			Net GWP (t CO <sub>2</sub> -eq./ha/yr)
		CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	
2020s	Ave.	300.2	506.3	16,184.0	17.0
	Max	551.7	1,174.0	18,831.1	19.5
	Min	107.6	214.3	14,037.7	14.5
2050s	Ave.	342.2	575.3	17,713.8	18.6
	Max	539.7	876.9	19,625.2	20.9
	Min	189.4	243.6	15,987.6	16.9
2080s	Ave.	393.1	712.5	19,061.1	20.2
	Max	587.8	1,169.1	20,602.1	21.7
	Min	289.5	316.6	17,440.2	18.5

농업계 온실가스 감축계획이 없는 현 실정에서 SRI 벼재배 기술의 도입이 좋은 대안일 것으로 판단된다.

Table 10은 기후변화에 의해 실제 영농활동에 따라 논에서 발

생하는 온실가스를 모의하고, 기후변화 이외에 토양특성, 비료 사용량 등의 변화에 따라 발생하는 온실가스 배출량을 모의하였다.



모의 결과 비료량을 110 kg/ha에서 130 kg/ha로 증가할 경우 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 그리고 CH<sub>4</sub> 등이 모두 증가하여 지구온난화 잠재력 (GWP)도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 비료의 양이 감소할 경우 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O의 배출량은 증가하지만, CH<sub>4</sub>의 배출량이 급격히 감소하여 지구온난화 잠재력은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Gregorich et al. (2005)의 연구에서 질소질 비료 사용량과 N<sub>2</sub>O 배출량이 비례하여 배출된다는 결과와 동일한 결과이다. 또한 토양을 점토질 립으로 변경할 경우 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 그리고 CH<sub>4</sub> 등 항목의 배출량이 감소하여 지구온난화 잠재력이 감소하는 것으로 나타났다. 관개방법에서는 일반 답수방법에서 천수답으로 변경할 경우 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 배출량이 감소하고, N<sub>2</sub>O 배출량이 소량 증가하지만 지구온난화 잠재력이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 절수관개로 변경할 경우 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 배출량이 증가하

지만, CH<sub>4</sub> 배출량이 크게 감소하여 지구온난화 잠재력도 감소되는 것으로 나타났다. 이는 Pathak et al. (2005)의 연구에서 상시 답수 (Continuous flooding)와 중간낙수 (Midseason drainage)의 온실가스 배출량을 분석한 결과 중간낙수의 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>의 배출량이 감소하고, N<sub>2</sub>O 배출량은 유사하게 나타났으며, 지구온난화 잠재력이 감소하였다는 결과와 유사한 결과이다.

이와 같이 논에서 발생하는 배출량은 강수량과 온도에 의한 영향 뿐 아니라 비료와 토양특성 그리고 관개방법에 따라 온실가스 배출량이 변화하기 때문에 논에서 발생하는 배출량을 줄이기 위해서는 벼를 재배하기 위한 적절한 비료량을 사용하고, 논에서 사용되는 관개수의 사용량을 줄일 수 있는 방안을 모색해야 할 것으로 판단된다. 또한 미래 기후변화에 따른 적절한 대응책으로 온실가스 배출량을 저감할 필요가 있을 것으로 보여진다.

**Table 9 Comparison of total GHG according to water management of paddy**

Water management	Total emission (kg/ha)		CO <sub>2</sub> ton/ha	Mean water quantity (m <sup>3</sup> )	index
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Conventional	458.4	0.000028	14.2	46.6	100
Midseason drainage 2 times	157.7	0.007	4.9	39.5	34.5
SRI method	126.8	0.074	4.0	24.5	28.2

- Reference: Kim et al. (2012)

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 연구지역의 기후변화에 따른 강수량과 온도변화를 분석하였으며, 기후변화에 따른 논외 온실가스 배출량 모의하고 온실가스 배출량을 저감하기 위한 대책을 모색하였다. 연구결과 기후변화에 의한 연평균 강수량은 1,371.4 mm (2020s), 1,557.2 mm (2050s), 1,566.5 mm (2080s)로 각각 1.1 %, 14.8 %, 그리고 15.5 %가 증가하는 것으로 나타났으며, 연평균

**Table 10 The simulated results of GHG according to cropping at rice paddy field**

Date	Tillage	Land-use	Fertilizer (kg N/ha)	Flooding	CO <sub>2</sub> (kg/ha)	N <sub>2</sub> O (kg/ha)	CH <sub>4</sub> (kg/ha)	Net GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq./ha)		
2020s	Deep ploughing, 30cm	loam	110	Conventional	81.9	1.0	577.0	17.0		
2050s					93.4	1.2	631.6	18.6		
2080s					107.3	1.5	679.6	20.2		
2020s			90		84.25	1.03	470.71	14.0		
2050s					94.60	1.17	514.63	15.4		
2080s					108.17	1.45	552.79	16.6		
2020s			130		79.40	1.04	679.27	19.9		
2050s					92.62	1.19	744.77	21.8		
2080s					106.63	1.47	801.60	23.6		
2020s		clay loam	loam	Marginal	- 11.48	0.56	205.86	6.0		
2050s					46.85	0.81	234.43	7.1		
2080s					91.90	1.11	256.38	8.1		
2020s		110			Rainfed	72.73	4.05	- 0.77	2.2	
2050s						76.09	3.55	- 0.73	2.0	
2080s						85.26	5.72	- 0.80	3.1	
2020s		loam			110	Marginal	107.03	3.95	87.55	4.8
2050s							99.27	3.97	88.87	4.8
2080s							109.04	4.23	92.60	5.1

온도는 7.4 °C (2020s), 8.7 °C (2050s), 10.3 °C (2080s)로 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따른 논 의 온실가스 배출량을 모의한 결과 N<sub>2</sub>O와 CH<sub>4</sub> 그리고 CO<sub>2</sub>의 배출량은 0.4~2.4 kg N/ha/yr와 500.5~734.5 kg C/ha/yr 그리고 29.4~160.4 kg C/ha/yr의 범위로 강수량과 온도 등의 기후변화에 의해 발생량이 점차 증가하는 것으로 나타났다.

N<sub>2</sub>O와 CH<sub>4</sub> 그리고 CO<sub>2</sub>의 배출량을 고려한 온실가스 배출량(GWP)의 경우 14.5~21.7 t CO<sub>2</sub>/ha/yr의 범위로 나타났으며, 기간별로 평균 17.0 t CO<sub>2</sub>/ha/yr (2020s), 18.6 t CO<sub>2</sub>/ha/yr (2050s), 그리고 20.2 t CO<sub>2</sub>/ha/yr (2080s)의 온실가스가 배출되는 것으로 나타나 기후변화에 의해 논에서 발생하는 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 논에서 발생하는 온실가스 저감을 위해서는 강수량과 온도를 증가시키는 인자들의 저감을 위한 노력이 필요할 것으로 보여진다. 또한 논에서 발생하는 배출량은 강수량과 온도에 의한 영향 뿐 아니라 비료와 토양특성 그리고 관개방법에 따라 온실가스 배출량이 변화하기 때문에 논에서 발생하는 배출량을 줄이기 위해서는 벼를 재배하기 위한 적절한 비료량을 사용하고, 논에서 사용되는 관개수의 사용량을 줄일 수 있는 방안을 모색해야 할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구결과는 영농기에 소수의 샘플링을 통해 측정된 결과를 바탕으로 분석하여 정확한 온실가스 배출량을 비교 또는 검증할 수 없었기 때문에, 장기적인 모니터링을 통해 일별 또는 월별 등 주기적인 모니터링을 통한 온실가스 배출량 분석 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 보여진다.

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원 에서 지원되는 “새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Abdalla, M., S. Kumar, M. Jones, J. Burke, and M. Williams, 2011. Testing DNDC model for simulating soil respiration and assessing the effects of climate change on the CO(2) gas flux from Irish agriculture, *Global and Planetary Change* 78(3-4): 106-115.
2. Alcamo, J., P. Doll, F. Kaspar, and S. Siebert, 1997. Global change and global scenarios of water use and availability: An application of WaterGAP1.0. Report A9701, *Center for Environmental Systems Research*, University of Kassel, Germany.
3. Carter, T. R., M. Hulme, and M. Lal, 1999. IPCC-TG CIA Guidelines on the use of Scenario data for climate impact and adaptation assessment, version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
4. Chae, Y. and Y. Youm, 2010. Economic Analysis of Climate Change to Establish Effective Adaptation Policies. *Korean Society of Environ. Engineers, Special Feature*: 818-829. (in Korean)
5. Climate Change Information Center (CCIC), 2012. <https://www.climate.go.kr>. (in Korean)
6. Korea Environment Institute (KEI), 2009. Economic analysis of climate change in Korea ( I ).
7. Dai, Z., C. C. Trettin, C. Li, H. Li, G. Sun, and D. M. Amatya, 2012. Effect of Assessment Scale on Spatial and Temporal Variations in CH(4), CO(2), and N(2)O Fluxes in a Forested Wetland, *Water Air and Soil Pollution* 223(1): 253-265.
8. Follador, M., A. Leip, and L. Orlandini, 2011. Assessing the impact of Cross Compliance measures on nitrogen fluxes from European farmlands with DNDC-EUROPE, *Environmental Pollution* 159(11): 3233-3242.
9. Gregorich, E. G., P. Rochette, A. J. VandenBygaart, and D. A. Angers, 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil & Tillage Research* 83: 53-72.
10. IPCC, 1996). Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventoried: Reference Manual, revised in 1996.
11. ISE (2009). DNDC User's Guide, Institute for the study of Earth, Oceans, and Space, University of New Hampshire, Durham, NH 03824, USA.
12. Jang, J. H. and J. H. Ahn, 2012. Assessing Futere Climate Change Impact on Hydrologic and Water Quality Components in Nakdong River Basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(11): 1121-1130. (in Korean)
13. Kim, D. S. and J. M. Oh, 2003. N2O Emissions from Agricultural Soils and Their Characteristics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 19(5): 529-540. (in Korean)
14. Kim, G. Y., S. B. Lee, J. S. Lee, E. J. Choi, J. H. Ryu, W. J. Park, and J. D. Choi, 2012. Mitigation of Greenhouse Gases by Water Management of SRI(System of Rice Intensification) in Rice Paddy Fields, *Korean J. Soil Sci.*

- Fert.* 45(6): 1173-1178. (in Korean)
15. Korean Soil Information System (<http://asis.rda.go.kr/>).
  16. Kwon, Y. A., W. T. Won, and K. O. Boo, 2008. Future Projections on the Spatial Distribution of Onset Date and Duration of Natural Seasons Using SRES A1B Data in South Korea, *Korean Geographical Society* 43(1): 36-51. (in Korean)
  17. Lee, T. S., J. Y. Choi, S. H. Lee, S. H. Lee, and Y. K. Oh, 2012. Analyzing Consumptive Use of Water and Yields of Paddy Rice by Climate Change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(1): 47-54. (in Korean)
  18. Li, C., N. Farahbakhshazad, D. B. Jaynes, D. L. Dinnes, W. Salas, and D. McLaughlin, 2006. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in IOWA. *ECOLOGICAL MODELING* 196: 116-130.
  19. Park, J. Y., M. J. Park, S. R. Ahn, and S. J. Kim, 2009. Watershed Modeling for Assessing Climate Change Impact on Stream Water Quality of chungju Dam Watershed, *JKWRA* 42(10): 877-889. (in Korean)
  20. Park, K. S., E. S. Chung, S. U. Kim, and K. S. Lee, 2010. Impact Analysis of Construction of Small Wastewater Treatment Plant Under Climate Change, *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(2): 268-278. (in Korean)
  21. Pathak, H., C. Li, and R. Wassmann, 2005. Greenhouse gas emission from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model, *Biogeosciences* 2: 113-123.
  22. Wang, X., B. Zhu, C. Li, M. Gao, Y. Wang, Z. Zhou, and H. Yuan, 2011. Dissecting soil CO<sub>2</sub> fluxes from a subtropical forest in China by integrating field measurements with a modeling approach, *Geoderma* 161(1-2): 88-94.
  23. Xu, S. X., X. Z. Shi, Y. C. Zhao, D. S. Yu, S. H. Wang, L. M. Zhang, C. S. Li, and M. Z. Tan, 2011. Modeling Carbon Dynamics in Paddy Soils in Jiangsu Province of China with Soil Database Differing in Spatial Resolution, *Pedosphere* 21(6): 696-705.
  24. Yun, D. K., S. O. Chung, and S. J. Kim, 2011. Climate Change Impacts on Paddy Water Requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 39-47. (in Korean)