



---

# PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung  
Director, APEC Climate Center

---

# CONTENTS

---

## LSM-Biogeochemistry 연계모형을 이용한 토지이용 별 온실가스 배출 추정

■■ 전종안 | 기후변화연구팀

1. 서론	141
2. 연구 자료 및 방법	144
2.1 자료수집	144
2.2 LSM-Biogeochemistry 연계모형	148
3. 연구결과 및 토의	157
3.1 LSM-Biogeochemistry 연계모형	157
4. 요약 및 결론	169



APCC  
RESEARCH REPORT 2013-05

---

# LSM-Biogeochemistry 연계모형을 이용한 토지이용 별 온실가스 배출 추정

---

전종안 | 기후변화연구팀

**ABSTRACT**

It is widely known that greenhouse gas (GHG) emissions contribute to global climate change. Soil respiration is known to be one of the largest CO<sub>2</sub> fluxes to the atmosphere. In the Korean Peninsula, rice is generally cultivated in rice paddy fields, whose flooding conditions create anaerobic systems below the soil surface. Due to these conditions of rice paddy fields, these fields are one of the major sources of methane (CH<sub>4</sub>) emissions to the atmosphere. However, rice paddy ecosystems are not adequately represented in most Land Surface Models (LSMs). Most LSMs are limited in predicting GHG effluxes from the soil surface. The objectives of this study are to link an LSM with biogeochemistry models, and to estimate the land surface states and fluxes including evapotranspiration, soil temperature, and CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> effluxes from various types of landcover, including rice paddy fields, for the Korean Peninsula, by applying the tool to the region.

Agroclimatic Zones (ACZs) were initially classified into 19 zones for rice cultivation. However, it is difficult to collect all the required information for each of the 19 ACZs to estimate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> effluxes from the soil surface using biogeochemistry models. Therefore, for this study, we designated 9 new agroclimatic zones which were classified ACZ1 to ACZ9. Estimation of soil respiration for urban regions was not included in this study. Representative cells for each landuse type, including paddy fields, upland, and forest, in each ACZ were selected based on landuse and soil characteristics. This selection was performed using vector types of landuse and detailed soil maps. Additionally, we checked if the landuse of selected representative cells at a 5-km resolution on a raster type of landuse map were the same as on the vector type of landuse map, since NOAH-LSM was simulated with a 5 km resolution. Because only 39 grid cells with a 5 km resolution were identified and this number of upland cells was much less than the 2,985 forest cells and 503 paddy field cells, the upland cells were excluded for the GHGs estimation. Even though we initially tried to use observed meteorological datasets from the Automated Surface Observing System (ASOS), due to the relatively long distances between the representative cells and the nearest ASOSs, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 and NCEP Global Data Assimilation System (GDAS) were used for this study instead.

NOAH-LSM has been developed by a number of groups, including the NCEP Environmental Modeling Center (NCEP/EMC), Oregon State University (OSU), the NWS Hydrology Lab (HRL), the Air Force Weather Agency (AFWA), and the Air Force Research Lab (AFRL). It is able to simulate land surface states and fluxes, including soil moisture (both liquid and frozen), soil temperature, skin temperature, snowpack depth, snowpack water equivalent, canopy water content, evapotranspiration, and runoff and has been operationally used in NCEP models since 1996. For this study, NOAH-LSM (version 3.2), a 1-dimensional column model, was used to provide evapotranspiration and soil temperatures at multiple depths below the soil surface for the SOILCO2. The National Centers for Environmental Prediction Global Data Assimilation System (NCEP GDAS) forcing dataset was used to drive the simulations. The precipitation field, taken from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 dataset, was used for supplemental forcing sources. The U.S. Geological Survey (USGS) landcover dataset, The United Nations' Food and Agriculture



Organization (FAO) soil data for sand-, clay-, and silt-fraction maps, and GTOPO30 were also used for the NOAH-LSM simulation. NOAH-LSM was simulated with a 5-km resolution and 1-hr time step size. We checked if the resolutions of the landcover, soil, and Digital Elevation Model (DEM) were sufficiently high for the simulation at 5-km resolution. We found that the FAO soil fractions were too coarse for the simulation. The FAO soil fractions were replaced with a detailed soil map of Korea for the simulation domain (33-38.5° N and 125-130° E).

Numerical modeling approaches were used to estimate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> effluxes from the soil surface. The SOILCO2 model, a one-dimensional process-based model, is one of the components of the HYDRUS-1D software package. HYDRUS-1D simulates water flow, heat, solute, and CO<sub>2</sub> transport. The Denitrification-Decomposition (DNDC) model is a process-based model to simulate carbon and nitrogen dynamics of agricultural fields, including rice paddy fields. Agricultural management specifications, including fertilization and irrigation, are used as inputs for the DNDC model, as well as meteorological datasets, such as daily precipitation and air temperature. The SOILCO2 model has been used to estimate CO<sub>2</sub> efflux from the soil surface and carbon production in soils. The SOILCO2 and DNDC models were applied to estimate CO<sub>2</sub> effluxes from forests and CH<sub>4</sub> effluxes from paddy fields. The DNDC model was used to estimate CH<sub>4</sub> effluxes from paddy fields, since the DNDC model considers flooding conditions and various agricultural management techniques. For the simulation of the SOILCO2 model, evaporation, transpiration, and soil temperature were used. However, these datasets were not easy to observe. Furthermore, evapotranspiration is difficult to divide into two separate variables: evaporation and transpiration. The daily evaporation and transpiration and soil temperature resulting from the NOAH-LSM simulations were fed into the SOILCO2 model. We applied this linked model framework to the representative cells in each ACZ and estimated the annual CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions (kg C yr<sup>-1</sup>) from paddy fields and forest at the “gun”-level by multiplying CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> effluxes (kg C ha<sup>-1</sup>) by area of paddy fields and forest, respectively. The observed data from the Gimje flux site were used to evaluate these models’ performance.

The daily net radiation observed at the Gimje flux tower site was used to evaluate NOAH-LSM. 3-hour interval outputs from NOAH-LSM were aggregated to produce daily and monthly outputs and daily net radiation (the difference between daily net longwave radiation and net shortwave radiation), which was compared with the observed daily net radiation. The residual of the daily net radiation in winter was somewhat higher than in summer. NOAH-LSM simulated daily net radiation with 28.82 Wm<sup>-2</sup> RMSE. Monthly mean evapotranspiration in July and August 2012 was higher than that in June and September 2012 over the country. Monthly mean soil temperature at the first layer ranged from 259.5 to 304.9 K and at the fourth layer it ranged from 271.5 to 300.7 K. These values were used to simulate CO<sub>2</sub> effluxes from forests using the SOILCO2 model. The range of CO<sub>2</sub> effluxes from forests in ACZ2 was from 4.27 to 134.97 kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. The estimated annual cumulative CO<sub>2</sub> emissions from forests at the “gun”-level ranged from approximately 2.7 × 10<sup>6</sup> to 113.7 Ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. The maximum annual cumulative CO<sub>2</sub> emissions were estimated at Hongchun-gun in Ganwond-do and the minimum annual cumulative CO<sub>2</sub> emissions were estimated at Dong-gu in Incheon. The DNDC model was used to estimate CH<sub>4</sub>

effluxes from rice paddy fields. The model results were evaluated with the observed  $\text{CH}_4$  effluxes from the Gimje flux tower site. The RMSE for daily  $\text{CH}_4$  effluxes from transplanting to harvesting in 2012 was  $1.4 \text{ kg C ha}^{-1}$ . The estimated annual cumulative  $\text{CH}_4$  emissions from rice paddy fields at the "gun"-level showed that Haenam-gun in Jeonnam-do was the largest  $\text{CH}_4$  emitting "gun" and Gurae-gun in Jeonnam-do was the smallest  $\text{CH}_4$  emitting "gun", not counting urban regions.

The conclusions of this study are as follows:

1. Since agricultural management techniques, including fertilization and irrigation, are used to estimate  $\text{CH}_4$  emissions from rice paddy fields using the DNDC model, it is concluded that the DNDC model can be used for effective adaptation plans for the reduction of  $\text{CH}_4$  emissions from rice paddy fields in Korea.
2. This result suggests that long-term monitoring of GHG emissions contributes to the improvement and evaluation of biogeochemistry models, such as DNDC.
3. It is concluded that since soil respiration is one of the major factors for estimating Net Ecosystem Exchange (NEE), this study can be useful for understanding whether the forest ecosystem is a source or sink of carbon.
4. We hope that this study can be used to provide effective GHG reduction plans by revealing the local characteristics of GHG emissions by providing GHG emissions at the "gun"-level.

## 1. 서론

온실가스 배출량의 증가는 기후변화의 주요한 원인으로 여겨지고 있다. 주요한 온실가스로는 이산화탄소 ( $\text{CO}_2$ ), 메탄 ( $\text{CH}_4$ ), 아산화질소 ( $\text{N}_2\text{O}$ ), 수소불화탄소 (hydrofluorocarbons, HFC), 과불화탄소 (perfluorocarbons, PFC), 육불화황 (Supphur hexafluoride,  $\text{SF}_6$ )의 6가지가 있다. 이 중 수소불화탄소 (hydrofluorocarbons, HFC), 과불화탄소 (perfluorocarbons, PFC), 육불화황 (Supphur hexafluoride,  $\text{SF}_6$ )는 인간이 인공적으로 합성한, 산업공정에서 발생하는 온실가스이며, 농경지에서는 주로 메탄이나 아산화질소 등이 주로 배출이 되고 있는 것으로 보고되고 있다. 쌀은 전 세계에서 뿐 만 아니라 우리나라에서도 가장 중요한 식량중의 하나이다. 그러나, 논은 주요한 메탄 배출원으로 여겨지고 있다. 논은 인공적인 메탄 배출량의 약 10에서 12 % 정도를 차지하는 것으로 보고된 바 있다 (Prather et al., 2001; IPCC, 2007).

수치모델 (탄소순환모형 등)을 활용하여 이산화탄소 배출량을 추정하는 방법이 사용

되기도 한다. 예를 들면, RothC (Coleman and Jenkinson, 2005), CANDY (Franko et al., 1997), CENTURY (Parton et al., 1994)와 같은 토양유기물분해모형 (Soil Organic Matter (SOM) decomposition)은 대개 무차원의 모형으로 토양온도, 토양수분, 토양유기물함량 등의 공간적 분포를 고려하지 않는 모형들이다 (Bauer et al., 2008). 반면에, 프로세스기반모형은 수분, 열, 이산화탄소 등의 이송을 모의할 수 있는 모형으로 SOILCO<sub>2</sub> (Simunek and Suarez, 1993) 모형이 여기에 속 한다 (Bauer et al., 2008). SOILCO<sub>2</sub> 모형은 1차원 프로세스기반모형으로, HYDRUS-1D 소프트웨어 패키지 (Simunek et al., 2005)의 한 컴포넌트이다. HYDRUS-1D를 이용하여 수분의 흐름, 용질이나 이산화탄소 등의 이송을 모의할 수 있다. SOILCO<sub>2</sub> 모형은 토양으로부터 이산화탄소 배출량과 토양 내 카본 생성 (Carbon production)등을 추정하는데 이용되었다 (Bauer et al., 2012; Bauer et al., 2008; Herbast et al., 2008; Buchner et al., 2008). Buchner et al. (2008)은 HYDRUS-1D 소프트웨어 패키지에서 제공되는 열이송이나 이산화탄소 생성 및 이송 등의 매개변수들의 기본값을 사용해서 SOILCO<sub>2</sub> 모형으로부터 추정치가 실측치와 근사하게 모의할 수 있다고 보고한 바 있다.

여러 포장규모의 모형들이 논에서 메탄 배출량을 추정하는데 이용되어왔다. 예를 들어, DNDC (Li et al., 1992), CASA (Potter et al., 1993), MERES (Matthew et al., 2000), DAYCENT (Del Grosso et al., 2002) 등을 들 수 있다. Matthews et al. (2000)은 CERES-Rice 작물모형과 담수상태에서 메탄과 산소의 정상상태 농도를 계산하는 모형과 연계하는 방법으로 논에서 메탄 배출량을 추정한 바 있다. DNDC 모형은 논에서 담수상태의 토양 내 질소 (N)와 탄소 (C)의 기작을 모의할 수 있도록 설계되어있으며, 시비자료 및 물관리 등의 영농관리 등을 입력자료로 사용 한다 (User's guide for the DNDC Model, 2012). 따라서 논에서 메탄 배출량을 감축하는 여러 가지 방법 들 중 시비방안 및 물관리 등을 통한 효율적인 메탄 배출량 감축 방안을 제시할 수 있다. 또한 일별 강수 및 기온 등 기상자료를 입력자료로 사용하므로 기상 조건에 대해 적절한 메탄 배출량 감축 방안을 제시가 가능할 것이다. Babu et al. (2005)은 인도의 논에서 메탄 배출량을 DNDC 모형을 이용하여 추정한바 있으며, DNDC 모형을 통하여 기후변화의 영향과 그에 대한 대응 정책 등을 제시하는 데 사용할 수 있을 것이라고 보고한 바 있다. Pathak et al. (2005)은 DNDC 모형을 인도의 논에 적용해 다양한 영농활동에 따른 메탄 등 온실가스 배출량을 추정하였

으며, DNDC 모형을 벼 재배시스템에서 온실가스 추정을 연구하는 활용할 수 있다고 제안하였다. 논에서 메탄 배출은 기상, 토양, 영농활동 등에 영향을 받는다. 영농활동은 기상조건에 따라서 다양하게 이루어질 있고, 메탄 배출 형태 또한 기상 및 영농활동 의 조합에 의해 다양하게 이루어질 수 있다. 따라서 연간 총배출량이 아닌 벼 생육기간 내에 다양한 기상조건과 영농활동을 같이 고려해서 메탄 배출특성과 총 배출량을 산정하는 것이 메탄 배출량 저감 대책 제시에 필요하다고 할 수 있다. 하지만, 지자체 온실가스 배출량 산정지침의 방법은 년 총배출량 산정에는 도움이 되지만, 벼 생육기간의 메탄배출특성을 파악하는 데는 한계가 있다.

기후변화에 대응하기 위한 효율적인 온실가스 감축방안은 실행주체인 지방자치단체의 노력이 더욱 중요하다 (국립환경과학원, 2010b). 따라서 지방자치단체는 실효성 있는 감축목표와 감축목표 달성을 위해서는 관할 지역 내 온실가스 배출 정보를 정확히 파악하는 것이 선행되어야 한다. 국립환경과학연구원은 GHG-CAPSS (Greenhouse gas Clean Air Policy Support System) 시스템을 활용하여 지자체별 온실가스배출량 산정하였다 (국립환경과학원, 2010b). GHG-CAPSS 시스템은 1996 IPCC 온실가스 배출량 산정지침을 기반으로 설계된 시스템으로 2006 IPCC 지침서의 산정지침을 대비할 수 있도록 구축되었다 (국립환경과학원, 1010a). 그러나 GHG-CAPSS시스템에서 산정방법은 연간 총 배출량을 모의할 수 있도록 설계되어있어서, 일별 배출량 산정 등에는 적합하지 않다. 농경지에서는 온실가스 배출 저감방안과 함께 작물의 생산량을 함께 고려해야 하므로 시비방안이나 물 관리 등을 저감방안으로 사용할 경우, 작물생산량을 어느 정도 유지하기위해 저감방안의 적용 시점이 중요할 수 있다. 프로세스기반 모델링기법은 일별기상자료 및 영농활동 관리방안 등이 입력자료로 사용되므로, 시기별 저감방안 등의 온실가스 감축대책과 작물 생산량을 동시에 고려가 가능하다.

따라서 본연구의 목적은 Land Surface Model (LSM)과 프로세스기반 Biogeochemistry 모형을 연계하여 우리나라의 토지이용별 온실가스 배출량을 추정하고, 이를 통하여 군 단위 온실가스 배출량을 산정하는 데에 있다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 2.1 자료수집

#### 2.1.1 농업기후지대

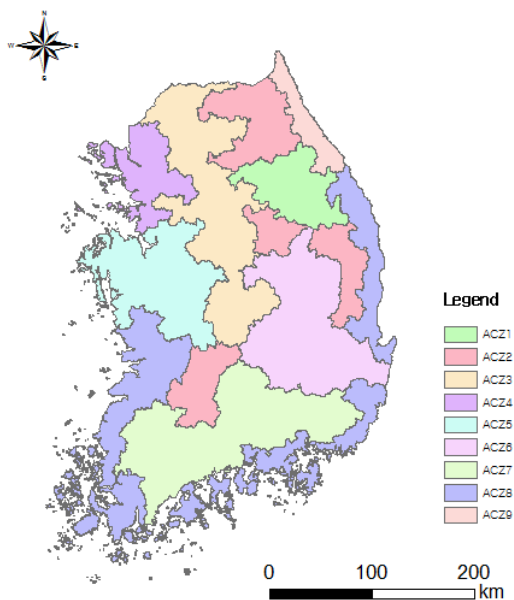
농작물의 생육이나 수문순환 등을 모의하기 위해서는 기상자료가 필수적이다. 그러나 기상요소는 각 측정별로 관측되지만, 농작물생산량은 행정구역단위로 수집되므로 측정별 기상요소를 바로 모형에 적용하는 것은 바람직하지 않다 (정유란, 2006). 시비 및 물 관리 등의 영농활동정보 또한 농경지에서 물질 및 에너지 순환을 모의하는데 필요한 자료이나, 모든 포장 별 영농정보를 수집하여 모형에 적용하는 것은 사실상 불가능에 가깝다. 따라서 본 연구에서는 인위적인 행정경계보다는 기후조건이 유사한 구역으로 분류한 기후경계를 사용하기로 하였다. 1986년 한반도의 농업생산기반을 구축하고 기후특성을 파악하여 작물의 적지과약 등을 목적으로 농업기후지대가 제작되었다 (농업기술연구소, 1986; 최돈향, 윤성호, 1989). 특히, 벼농사의 경우 이앙기의 강수량과 한발지수, 생육유효온도의 출현시기와 그 지속기간, 저온출현율, 기온과 일조시수 등의 분포와 변동 폭을 분석하여 19개의 농업기후지대로 구분하였다. 그러나 19개의 농업기후지대는 기상요소를 모형에 적용하기에는 적합할 수 있으나, 시비 및 물 관리 등의 영농활동정보 확보에는 여전히 너무 세분화되어 있어 어려움이 있다. 이러한 어려움 때문에 나상일 (2012)이나 통계청 (2011)에서는 9개의 지대로 작부체계 농업지대를 재분류하여 모형개발에 적용한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 9개의 작부체계 농업지대를 사용하였다 (Figure 1). 9개의 작부체계 농업지대에서는 ACZ1은 산간고냉지대, ACZ2는 산간지대, ACZ3는 중북부내륙지대, ACZ4는 중북부서부해안지대, ACZ5는 중남부서부해안지대, ACZ6는 경북내륙지대, ACZ7은 남부내륙지대, ACZ8은 남부해안지대, ACZ9은 동해안지대를 나타낸다.

벡터 형태의 토지이용도와 정밀토양도를 작부체계 농업지대별로 나누고 각 토지이용별 최대 토양통을 구하고 그 위치를 5km 해상도의 래스터 형태의 토지이용을 확인하여 최종 농업지대의 각 토지이용별 대표 셀을 선정하였다. 선정한 토지이용별 대표 셀은 Table 1에 요약하여 제시하였다. 이 연구에서는 지표모형 (Land Surface Model, LSM)의 공간해상도 (5km)를 고려해서 토지이용도를 5km 해상도의 격자자료로 변환하였다. 5km

격자자료에서는 총 39개의 격자가 밭으로 분류되었고, 이는 논외의 경우 503개, 산림의 경우 2,985개의 격자와 비교하여 매우 작은 면적으로, 본 연구에서는 밭의 경우를 제외하였다. 예를 들어, 비교적 농경지가 비율이 높은 ACZ7에서와 같이 5km격자 자료로 변환했을 경우에는 2개의 셀에서만 밭으로 분류가 되었다. ACZ1과 ACZ9의 토지이용도를 5km 격자자료로 변환했을 경우 논이 각각 0개와 1개로 분류되어, 논에서 온실가스플럭스 추정에는 이 두 개의 농업지대를 제외하였다. Table 2에 제시한 바와 같이, 각 대표 셀에서 가장 가까운 지역별 종관기상관측장비(Automated Surface Observing System, ASOS)과의 거리가 최대 약 34km 정도로 비교적 원거리에 위치해 있으므로, 각 대표 셀의 강우량 및 기온의 기상자료는 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B42 (Huffman et al., 2007)과 NCEP Global Data Assimilation System (GDAS, Abreu et al., 2012; Parrish & Derber, 1992)의 격자자료를 사용하였다.

**Table 1** Selected representative cells in the Agroclimatic zone.

ACZ	Landuse	Soil Name	Latitude [°]	Longitude [°]	Area (km <sup>2</sup> )
ACZ1	Paddy	GANGSEO	37.3	128.3	9.8
	Forest	SAMGAG	37.3	128.2	298.9
ACZ2	Paddy	SACHON	35.9	127.6	84.4
	Forest	SONGSAN	35.9	127.5	1020.7
ACZ3	Paddy	SACHON	36.3	127.5	154.7
	Forest	SAMGAG	36.4	127.5	897.4
ACZ4	Paddy	MANGYEONG	37.2	126.7	151.8
	Forest	SONGSAN	37.5	126.6	288.6
ACZ5	Paddy	JISAN	36.6	126.4	282.4
	Forest	OSAN	36.6	126.8	453.2
ACZ6	Paddy	JISAN	35.9	128.2	124.3
	Forest	DAEGU	35.8	128.2	791.4
ACZ7	Paddy	JISAN	34.8	127.0	208.7
	Forest	DAEGU	35.2	127.1	576.7
ACZ8	Paddy	JISAN	34.9	126.1	349.5
	Forest	HAENGSAN	34.4	126.1	454.6
ACZ9	Paddy	YEcheon	38.0	128.7	23.0
	Forest	SAMGAG	38.0	128.5	373.2



**Figure 1** Reclassification of the Agroclimatic Zone in Korea.

**Table 2** Distance from each representative cell to its nearest ASOS.

ACZ	Landuse	ASOS ID	Distance (km)
ACZ1	Forest	238	25.1
ACZ2	Paddy	133	14.0
	Forest	119	26.0
ACZ3	Paddy	129	20.2
	Forest	279	26.7
ACZ4	Paddy	260	15.2
	Forest	165	26.2
ACZ5	Paddy	221	16.7
	Forest	238	22.4
ACZ6	Paddy	133	12.1
	Forest	112	3.8
ACZ7	Paddy	129	34.3
	Forest	285	27.9
ACZ8	Paddy	256	18.7
	Forest	175	21.7
ACZ9	Forest	90	28.1

### 2.1.2. 김제플렉스타워

국가 표준의 농경지 온실가스 수지 및 발생량 추정모형을 개발할 목적으로 전북 김제에 농경지의 온실가스 발생량을 자동으로 측정할 수 있는 분석시스템(이산화탄소 플럭스 관측시스템과 메탄 자동화 포집 시스템) 설치하고 벼·보리 재배지에서 이산화탄소와 메탄의 발생량을 관측하고 있다 (Figure 2). 10m 높이의 타워형 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 플럭스 관측 시스템은 농경지에서 발생하는 수증기 및 이산화탄소의 농도와 에너지 교환량을 초당 10회의 속도로 관측할 수 있다. 이 시스템을 이용한 관측자료는 농작물의 생육과 생산량을 추정하는 기초자료로도 활용이 가능하며, 나아가 농업생태계가 이산화탄소의 흡수원인지, 발생원인지를 평가하는 중요한 자료이다. 메탄 자동화 포집 시스템은 농경지에서 발생하는 자동화 챔버를 이용하여 메탄을 모아 1일 8회 메탄농도를 자동으로 분석할 수 있는 시스템으로, 인력과 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 분석시스템의 관측자료는 NOAA-LSM과 DNDC모형을 검증하는 자료로 사용되었다.

플렉스타워는 35.7° (위도), 126.8° (경도)에 설치하였으며, 해당 논은 2011-2012년에 보리-벼 이모작 경작지이다. 보리의 경우 2011년 10월 27일에 파종을 하여 이듬해인 2012년 6월 5일에 수확을 하였고, 벼의 경우는 2012년 6월 10일에 모내기를 하여 같은 해 10월 17일에 수확을 하였다. 해당 논의 토양특성은 Table 3에 제시한 바와 같이 전북통의 토양과 미사실 양토 (Silt Loam)의 토성을 보였으며, pH는 5.8로 약산성의 토양이다.

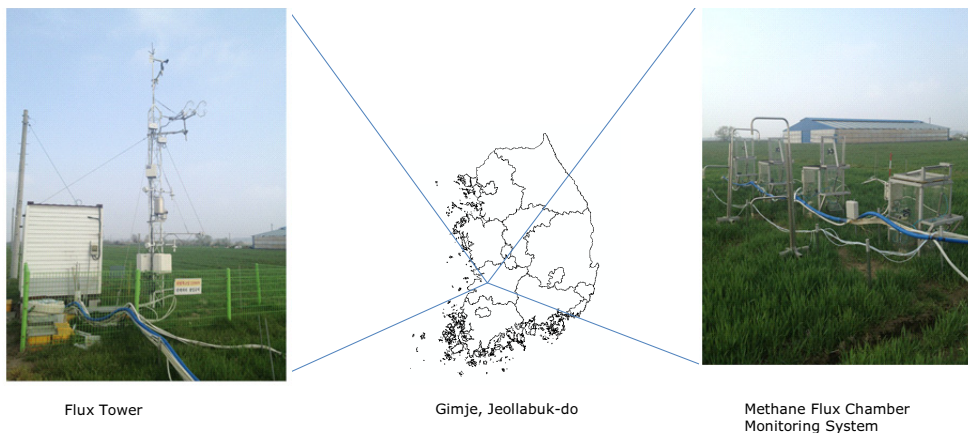


Figure 2 Location map of the flux tower in Gimje, Jeollabuk-do, Korea.

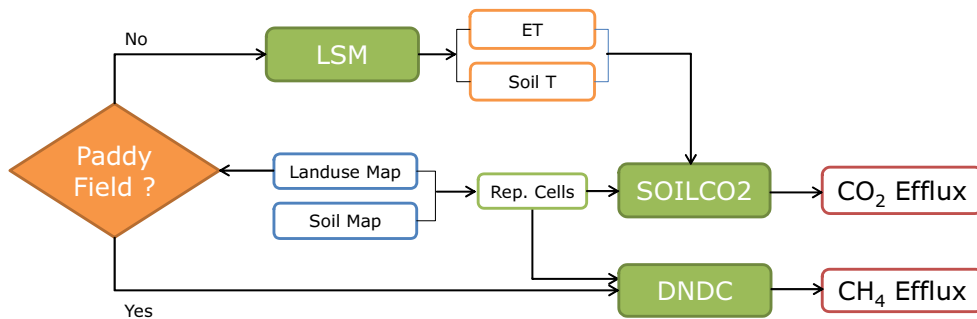


**Table 3** Soil characteristics of the Gimje flux site.

Soil Name	Soil Texture	pH	OM	TN	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ex. Cation (cmol <sup>+</sup> /kg)		
		[1:5, H <sub>2</sub> O]	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(mgkg <sup>-1</sup> )	K	Ca	Mg
JeonBuk	Silt Loam	5.8	30.2	0.9	166.4	0.22	9.22	2.32

## 2.2 LSM-Biogeochemistry 연계모형

본 연구에서는 SOILCO2 모형과 DNDC 모형을 이용하여 토지이용별 온실가스 추정하였다. SOILCO2 모형의 경우 식물의 증산량과 토양에서 증발량이 주요 입력변수로 사용된다. 그러나 증발산량의 자료를 관측이 용이하지 않아, 자료를 확보하기가 어려울 뿐만 아니라, 증발산량에서 증발량이나 증산량의 구성비를 정확히 구분하기도 용이하지 않다. 토양온도의 경우도 비슷한 실정으로 관측자료확보가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 SOILCO2 모형의 주요 입력변수인 증발량과 증산량, 토양깊이별 (표층에서 1m 까지) 토양온도를 NOAH-LSM모형을 구동하여 추정하였으며, 이 결과를 활용하여 SOILCO2 모형을 구동하였다. 논에서는 담수시 CH<sub>4</sub> 가 주로 배출이 되는 점과 논이 담수를 고려할 수 있는 모형인 DNDC 모형을 사용하여 CH<sub>4</sub> 플럭스를 추정하였다. SOILCO2 모형과 DNDC 모형을 9개 작부체계 농업지대 (ACZ1 - ACZ9)의 토지이용별 대표 셀에 적용하였다. LSM과 SOILCO2 모형의 연계방안은 Figure 3에 도식화 하여 제시하였다.



**Figure 3** Overall strategy for this study. "Rep. Cells" stands for "representative cells".

### 2.2.1 NOAH LSM 모형

Land Information System (LIS)은 증발산량, 토양수분, 스노우팩 (snow pack), 지표유출 등의 지표면 상태나 플럭스를 정확히 모의하기 위해 개발되었다 (Kumar et al., 2006). LIS 시스템을 통하여 LSM 모델링기법과 위성기반 자료와 지상관측자료를 통합하여 지표 수문 및 에너지 기작 등을 정확히 모의할 수 있다 (Figure 4). LIS system은 LIS-LSM (LSM 모델링), LIS-WRF (WRF 모형과 연계), LIS-DA (자료동화기법), LIS-OPT (최적화 및 불확실성 모델링)의 네 가지 하위시스템으로 구성되어있다. LIS 시스템은 모듈화, 객체지향, 컴포넌트 기반 소프트웨어 프레임으로 개발되었으며, Earth System Modeling Framework (ESMF) 규정과 Assistance for Land Surface Modeling Activities (ALMA)의 표준을 따르고 있다. LIS 시스템은 여러 개의 LSM을 지역규모나 전구를 대상으로 최대 1km 공간해상도와 15분 시간간격으로 모의할 수 있다 (NASA Goddard Space Flight, 2010).

NOAH-LSM은 NCEP/EMC (National Centers for Environmental Prediction Environmental Modeling Center), OSU (Oregon State University), HRL (National Weather Service Hydrology Laboratory), AFWA (Air Force Weather Agency), AFRL (Air Force Research Laboratory)의 여러 기관들에 의해 개발되었다. Figure 5에 제시된 바와 같이, NOAH-LSM으로 토양수분, 토양온도, 피층온도 (skin temperature), 스노우팩 두께, 눈의 물당량 (Snowpack Water Equivalent), 증발산량, 지표유출 등을 모의할 수 있다 (Koren et al., 1999). NOAH-LSM은 1996년부터 NCEP에서 현업에 사용하고 있는 모델들 중 하나이다 (Betts et al., 1997; Ek et al., 2003).

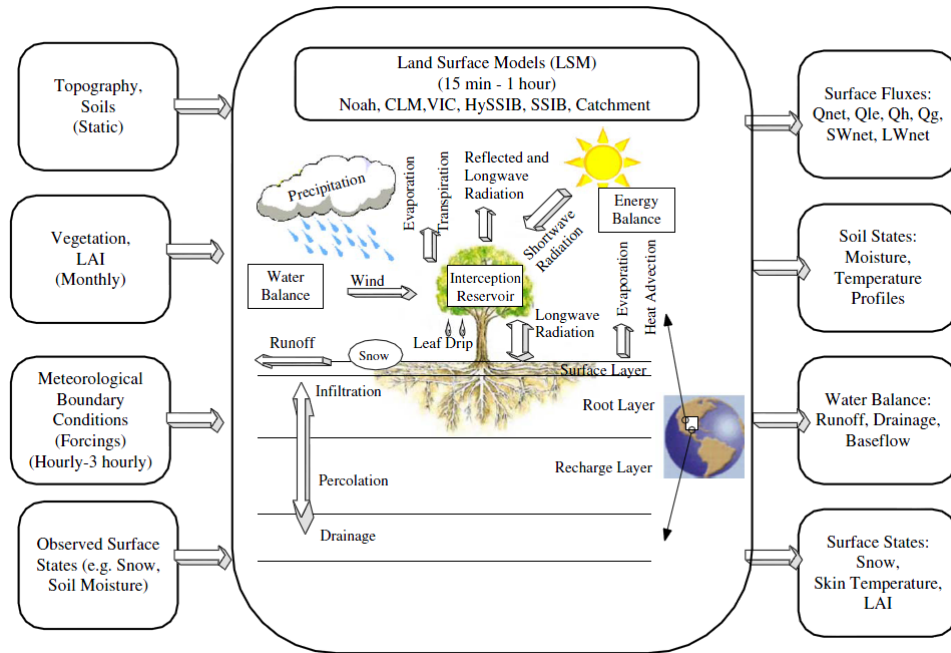


Figure 4 Schematic of land surface modeling in LIS (adapted from Kumar et al. 2006).

기온, 비습, 일사량, 풍속 등 기본적인 기상 자료는 NCEP GDAS를 사용하였으며, 강수 자료는 25km 격자자료로 구성된 TRMM 3B42 (Huffman et al., 2007)을 사용하였다. NOAH-LSM에 주요한 공간입력자료로는 토지이용, 토성 (soil texture), 경사도 (slope) 등이 있다. 토지이용도는 U.S. Geological Survey (USGS) 토지피복도를 사용하였으며, USGS 토지피복도는 도시, 경작지, 산림 등 총 24개로 분류가 되어있다. 수치고도모형 (Digital Elevation Model, DEM)은 GTOPO30 (Gesch et al., 1999)을 사용하였다. USGS 토지피복도와 GTOPO30는 5km 공간해상도로 NOAH-LSM을 구동하는 점을 고려할 때 상대적으로 고해상도의 자료라 볼 수 있으나, 보통 많이 쓰이는 FAO 토양자료의 해상도는 Figure 6에서 제시된 바와 같이 5km 격자크기에 충분한 정도의 해상도의 자료라 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 FAO 토양자료 중 대상 구역 (33-38.5° N과 125-130° E)의 토성자료를 정밀토양도를 이용하여 고해상도의 자료 (본 연구에서는 5km 해상도)로 바꾸어주는 방법으로 토성자료를 향상시켜 NOAH-LSM을 구동하였다 (Figure 6).

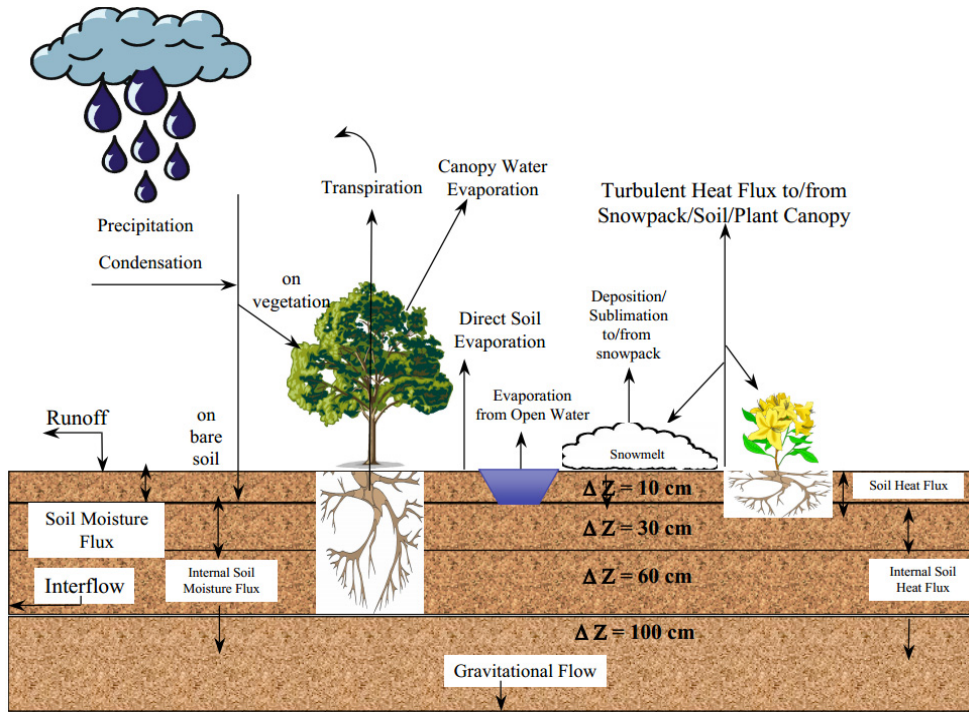
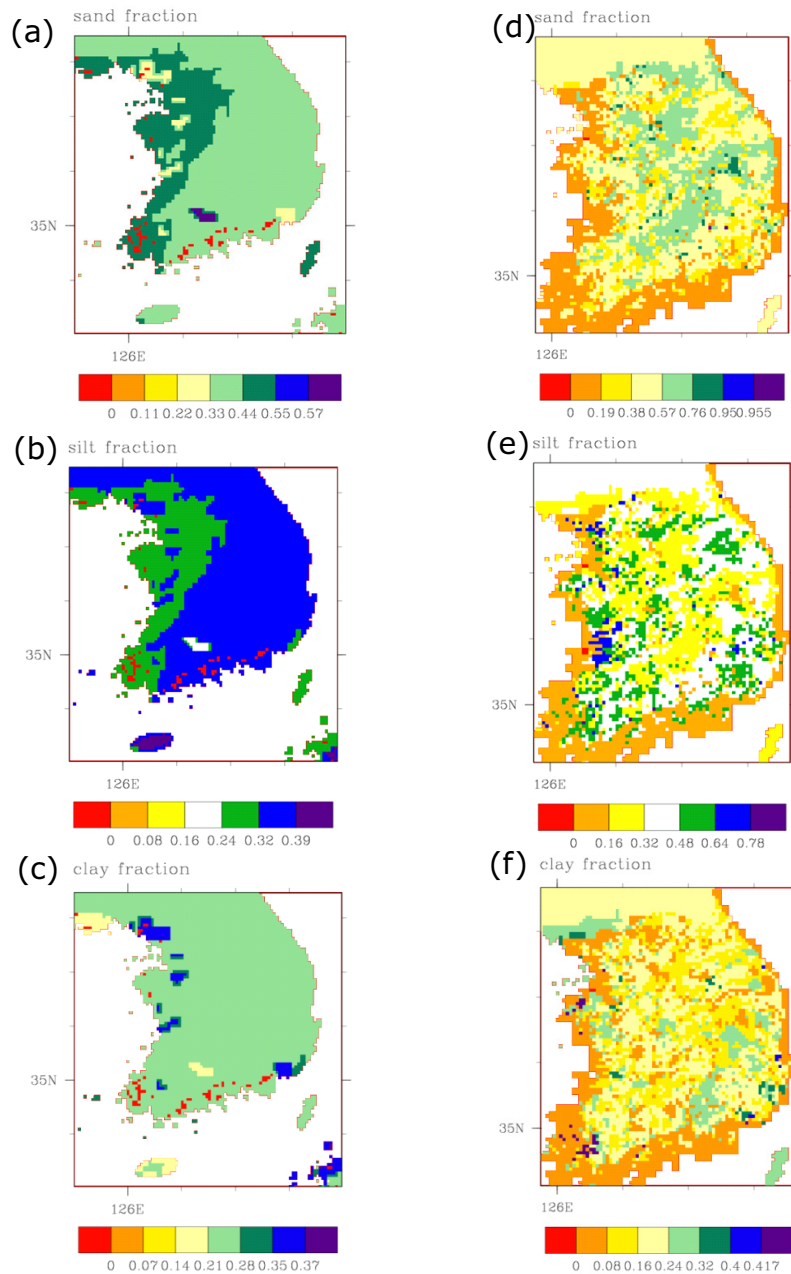


Figure 5 Schematic of Noah-LSM (adapted from Research Applications Laboratory, NCAR, www.ral.ucar.edu).



**Figure 6** Difference of soil fractions between FAO soil maps and detailed soil maps of Korea. (a) Sand, (b) Silt, and (c) Clay fractions in FAO soil maps and (d) Sand, (e) Silt, (f) Clay fractions in detailed soil maps of Korea.

### 2.2.2 SOILCO2 모형

토양으로부터 CO<sub>2</sub> 플럭스는 SOILCO2 모형을 이용하여 추정하였다. SOILCO2 모형은 1차원 물, 열, 이산화탄소의 흐름을 모의할 수 있는 모형으로, 미국 농무성 농업연구청 (USDA Agricultural Research Service)에서 개발한 모형이다 (Simunek & Suarez, 1993). 토양 내에서 탄소분해작용 (carbon decomposition)은 토양온도와 토양수분과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 따라서 수분의 이동과 열이송을 정확히 모의하는 것이 이산화탄소 운송을 모의하는데 중요하다 할 수 있다. 토양 내 수분의 이동은 다음의 Richards 방정식 (1)에 의해 표현된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - Q \quad (1)$$

여기서, h는 압력수두 [cm],  $\theta$ 는 토양수분 [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ], k는 불포화투수계수 [ $\text{cm d}^{-1}$ ], t는 시간 [d], z는 깊이 [cm], Q는 source/sink [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ ] 항이다. 열수송 (heat transport)은 다음 식 (2)으로 설명할 수 있다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w \frac{\partial J_w T}{\partial z} \quad (2)$$

여기서, T는 토양온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\lambda$ 는 열전도계수 (thermal conductivity) [ $\text{kg cm d}^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ], C,  $C_w$ 는 열용량 (heat capacity) [ $\text{kg d}^{-2} \text{cm}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ],  $J_w$ 는 수분플럭스 (water flux) [ $\text{cm d}^{-1}$ ]이다. 이산화탄소 운송의 지배방정식은 이류와 확산방정식인 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} [J_{da} + J_{dw} + J_{ca} + J_{cw}] - QC_w + S \quad (3)$$

여기서,  $J_{da}$ ,  $J_{dw}$ ,  $J_{ca}$ ,  $J_{cw}$ 는 액상 (첨자 w의 경우)이나 기체상태 (첨자 a의 경우)의 확산 (첨자 d의 경우)이나 이류 (첨자 c의 경우)에 의한 CO<sub>2</sub> 플럭스 [ $\text{cm d}^{-1}$ ],  $C_T$ 는 총



CO<sub>2</sub> 농도 [ $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ], CW는 액상 CO<sub>2</sub> 농도 [ $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ], Q는 뿌리에 의한 물 흡수율 [ $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}\text{d}^{-1}$ ], S는 source/sink [ $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}\text{d}^{-1}$ ]항 이다.

토양도와 토지이용도로부터 선정된 각 작부체계 농업지대의 산림의 대표 셀의 증발량, 증산량, 토양온도를 NOAH-LSM의 해당 격자로부터 추출하여 SOILCO<sub>2</sub>의 입력자료로 사용하였다. Figure 7은 전라북도 김제시를 포함하고 있는 ACZ8의 산림지역의 대표 셀에서의 2012년 1월부터 11월까지 일별 강수량, 증발량, 증산량을 나타낸 그래프이다. 물이동이나 열운송에 관한 매개변수들은 토성에 따라 SOILCO<sub>2</sub> 모형에서 제시하는 값들을 사용했으며, 이산화탄소 운송에 관한 매개변수들은 모형의 기본 값들을 사용하였다. Bunchner et al. (2008)은 이산화탄소 운송에 관한 매개변수들을 모형의 기본 값을 사용했을 경우에도 별도 모형의 보정이 없이도 지표면으로부터 CO<sub>2</sub> 플럭스 (CO<sub>2</sub> effluxes)를 잘 모의한다고 보고한 바 있다. 본 연구에서는 SOILCO<sub>2</sub> 모형으로 CO<sub>2</sub> 플럭스를 2001년부터 2012년까지 12년간 구동했을 경우, 대부분의 ACZ에서 발산을 하였다. SOILCO<sub>2</sub>모형에서는 유한요소법이나 유한차분법을 이용하여 물, 열, 이산화탄소의 운송에 관한 지배방정식의 해를 구하므로, 경계조건이나 초기조건 등에 따라서는 모형이 발산 할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 모든 ACZ에서 수렴하는 2012년 1월부터 11월까지 일별 CO<sub>2</sub> 플럭스를 추정하였다.

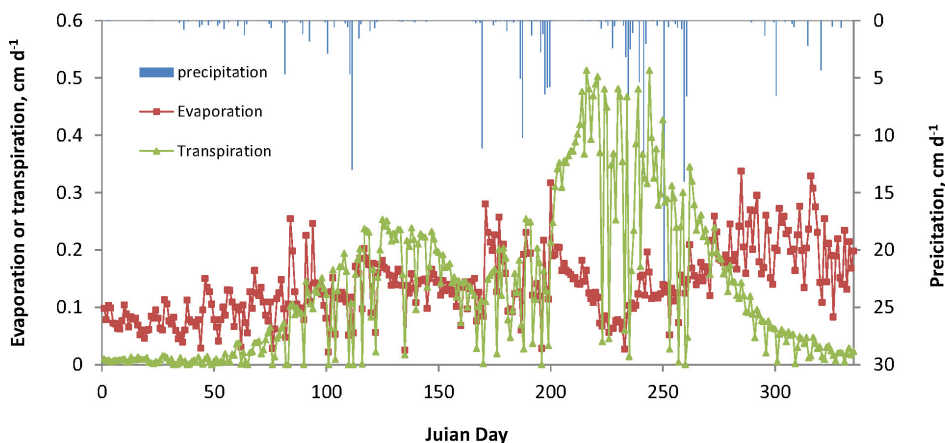


Figure 7 Precipitation, Evaporation, and Transpiration at the representative cell in ACZ8.

### 2.2.3 DNDC 모형

Denitrification-Decomposition (DNDC) 모형은 농경지에서 탄소와 질소의 기작에 대한 프로세스 지향 컴퓨터 시뮬레이션 모형이다 (Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, 2012). DNDC 모형은 토양 기후 (soil climate), 작물생장, 분해의 하부모형을 포함한 컴포넌트와 질화, 탈질화, 발효의 하부모형을 포함한 컴포넌트로 구성이 되어있다. 첫 번째 컴포넌트에서는 토양온도, 토양수분, pH 등을 모의할 수 있으며, 두 번째 컴포넌트에서는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> 배출량 등을 모의할 수 있다 (Figure 8). DNDC 모형에서는 적산온도와 질소흡수량, 일별 수분스트레스 (water stress)에 의해 작물생장을 모의할 수 있으며, 일별 광합성, 호흡, 탄소할당량, 물, 질소 흡수량 등을 출력하여 관련한 관측자료로 부터 모형을 보정 및 검증 할 수 있다.

김제 플렉스 사이트 논에서 이앙시기, 수확시기, 물관리, 시비관리 등의 영농활동은 DNDC 모형의 주요입력변수로서 Table 4에 요약하여 제시하였다. 각 작부체계 농업지대의 대표 셀에서 시비 자료 및 물 관리 등의 영농활동 정보는 산간지대인 ACZ2에서는 조생종벼를 재배하고, 나머지 농업지대에서는 우리나라의 주요품종인 중만생종을 표준재배법에 따라 재배한다고 가정하여 입력자료를 구축하였다. 본 연구에서는 논 면적이 상대적으로 작은 ACZ1과 ACZ9을 제외 한 ACZ2에서 ACZ8의 총 7개 농업지대에서 2001년부터 2012년까지 총 12년 기간 동안 논벼에서 CH<sub>4</sub> 플렉스를 모의하였다. Jagadeesh Babu et al. (2005)이 사용하여 DNDC 모형을 검증하는 방법을 활용하여 DNDC모형을 보정하였다. Jagadeesh Babu et al. (2005)은 대부분의 변수나 지수 등은 DNDC가 제시하는 기본값을 사용하고 microbial activity index로 DNDC모형을 검증하였다. microbial activity index는 0에서 1까지의 값으로 Jagadeesh Babu et al. (2005)의 연구에서는 0.2값으로 최종 선정되었다. 본 연구에서도 0.3으로 결정되어 Jagadeesh Babu et al. (2005)와 비슷한 값을 보였다. 모형 결과의 신뢰성을 높이고 적용성을 확장시키기 위해서는 장기간의 자료로 모형을 보정하고 검증하여 결론을 도출해야 할 필요성이 제기 된다.

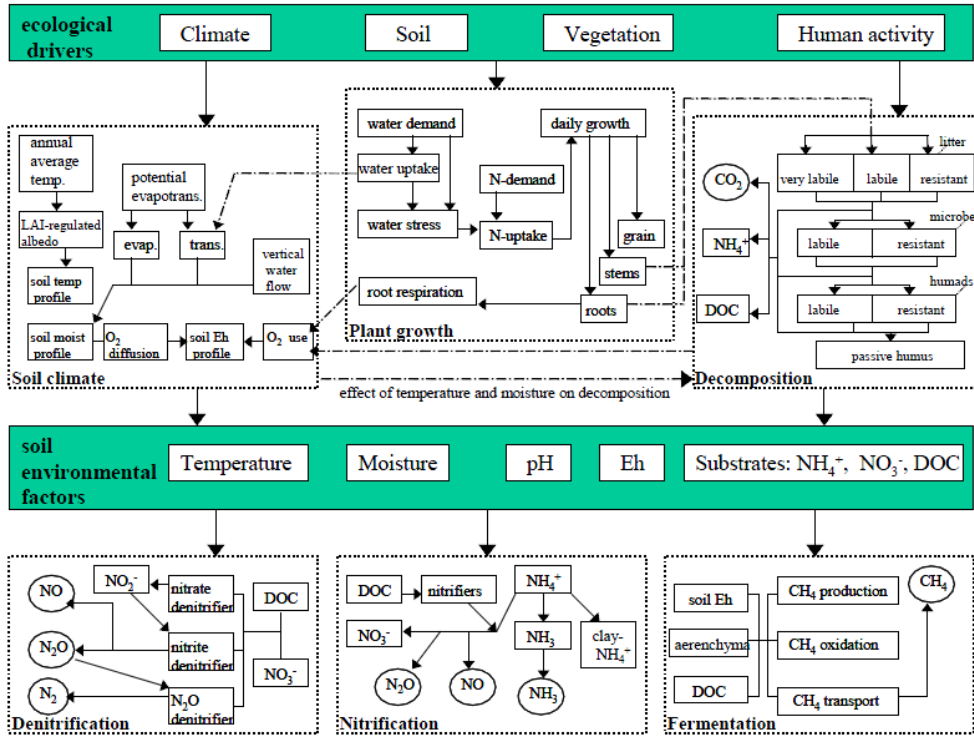


Figure 8 Structure of the DNDC model (adapted from User's guide for the DNDC model, 2012).

Table 4 Agricultural managements for rice at the Gimje site.

Agricultural management	Date or period
Transplanting	2012/6/10
Basal fertilization (Nitrogen kg/ha)	2012/6/16 (110)
Transplanting	2012/6/21.
Mid-summer drainage	2012/6/21 - 2012/8/15
Heading date	2012/8/18
Supplemental fertilization (Nitrogen kg/ha)	2012/8/19 (35)
Flooding	2012/8/16 - 2012/9/14
Pre-harvest drainage	2012/9/15
Harvesting	2012/10/17

### 3. 연구결과 및 토의

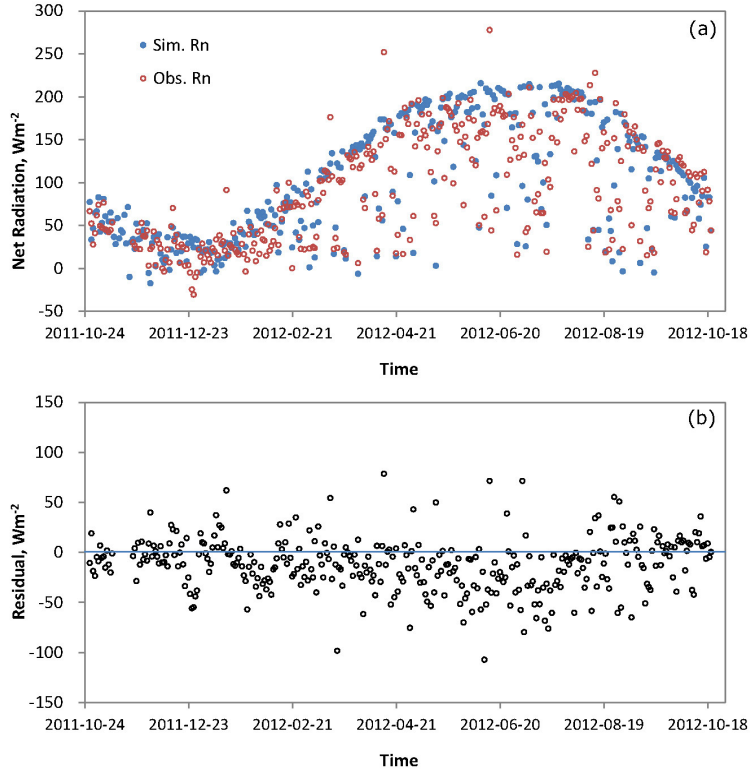
#### 3.1 LSM-Biogeochemistry 연계모형

##### 3.1.1 NOAH-LSM 모형

증발산량은 SOILCO2 모형의 중요한 입력자료 중의 하나로, 증발산량을 산정하기 위해 물수지 (water budget)방법이나 에너지수지 (energy budget)방법 등을 널리 사용한다. 순복사에너지 ( $R_n$ )는 현열, 잠열, 토양열의 에너지수지기반으로 플럭스 자료의 정확성을 평가하는 요소이다 (Lamaud et al., 2011; Wilson et al., 2002). 순복사에너지는 단파와 장파에 의한 순복사에너지의 차로 나타낼 수 있으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

여기서,  $R_n$ 은 일 순복사에너지 ( $Wm^{-2}$ ),  $R_{ns}$ 은 단파에 의한 순복사에너지 ( $Wm^{-2}$ ),  $R_{nl}$ 은 장파에 의한 순복사에너지 ( $Wm^{-2}$ )이다. Figure 9 (a)와 (b)는 김제플럭스 타워의 일별 관측 순복사에너지와 김제플럭스 사이트와 가장 가까운 격자점의 NOAH-LSM의 모의 결과 (단파와 장파에 의한 순복사에너지의 차이)를 비교한 그림이다. 일별순복사에너지의 잔차 (Residual)는 겨울철보다 여름철이 다소 크게 나타났으며, 전체적으로 NOAH-LSM이 다소 과대모의하는 것을 알 수 있다. NOAH-LSM의 모형결과의 RMSE가  $28.82 Wm^{-2}$ 로 다소 작게 나타났다. 이는 김다운 등 (2013)의 설마천유역과 청미천유역을 대상으로 Community Land Model (CLM)을 이용하여 순복사에너지를 추정한 연구의 RMSE (설마천유역:  $267.17 Wm^{-2}$ , 청미천유역:  $251.96 Wm^{-2}$ ) 보다 훨씬 작았으며, 높은 신뢰성을 보여주고 있다고 할 수 있다.



**Figure 9** Simulated and observed net radiation (a) and residual (b) at the Gimje Flux site. Sim. Rn: simulated net radiation, Obs. Rn: observed net radiation.

NOAH-LSM의 3 hr간격 결과자료를 일별, 월별 자료로 변환하였다. NOAH-LSM 모형을 이용한 순복사에너지의 2012년 2월, 3월 7일, 8월의 월평균 순복사에너지를 5 km 격자 별로 나타냈다 (Figure 10 (a) to (d)). 지역별로는 남부지방에서 순복사에너지가 다소 높았으며, 동해안 산간지역에서는 다소 낮게 나타났다. 8월에는 월평균 순복사에너지가 전국적으로 큰 차이를 보이지는 않았다 (Figure 10 (d)). SOILCO2 모형의 입력자료로 사용되는 증발산량과 토양온도는 NOAH-LSM 모형을 이용하여 산정한 자료를 사용하였다. 주요 생육기간인 6월부터 9월까지의 월평균 증발산량, 첫째 토층 (0.1m)과 넷째 토층 (0.6 - 1.0m)의 토양온도를 나타냈다 (Figures 11-13). 증발산량은 0.013에서 189.0  $kg m^{-2}$ 의 범위를 보였으며, 전국적으로 7월 (Figure 11 (b))과 8월 (Figure 11 (c))이 6월 (Figure 11 (a))과 9월 (Figure 11 (d))보다 다소 높게 나타났다. 토양온도의 경우 같은

기간 내에 넷째 토층 (Figure 13)이 다소 첫째 토층 (Figure 12)보다 낮게 나타났고, 동해안 산간지대가 두 토층에서 모두 다소 낮게 나타났다. 첫째 토층은 259.5에서 304.9K의 범위를 보였으며, 넷째 토층에서는 271.5에서 300.7K의 범위를 보였다.

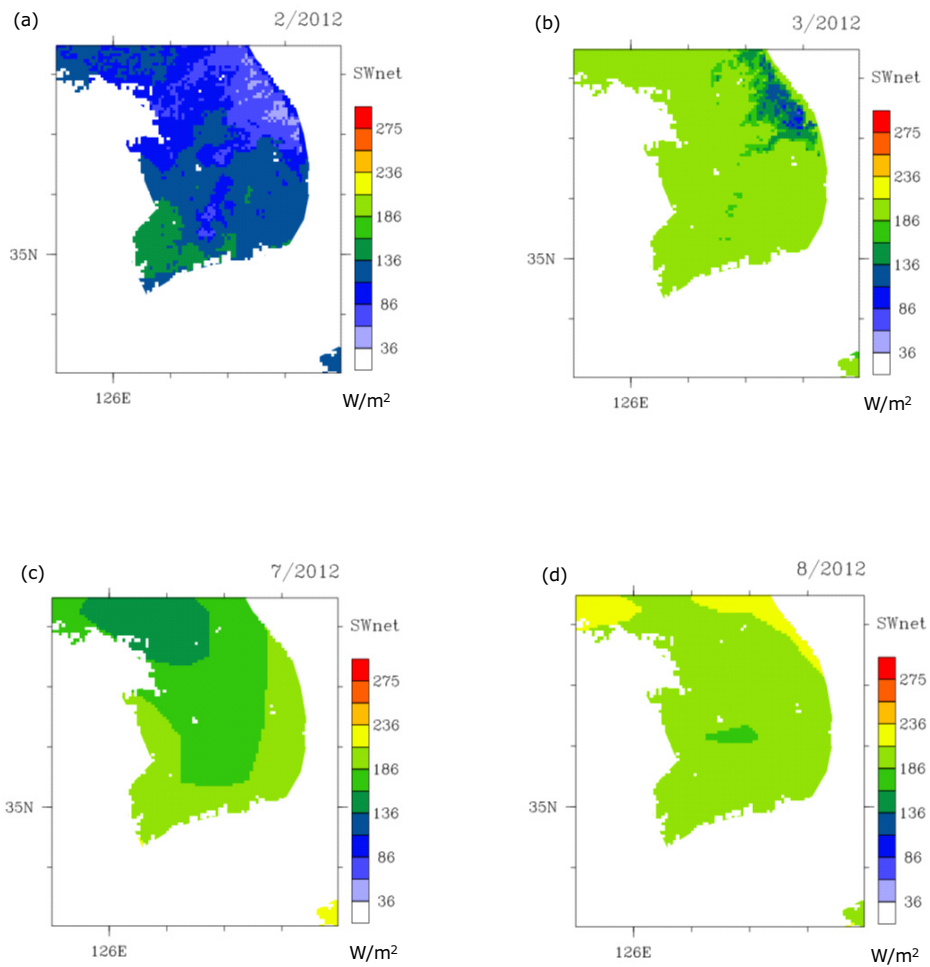


Figure 10 Monthly net radiation in: (a) February, (b) March, (c) July, and (d) August.

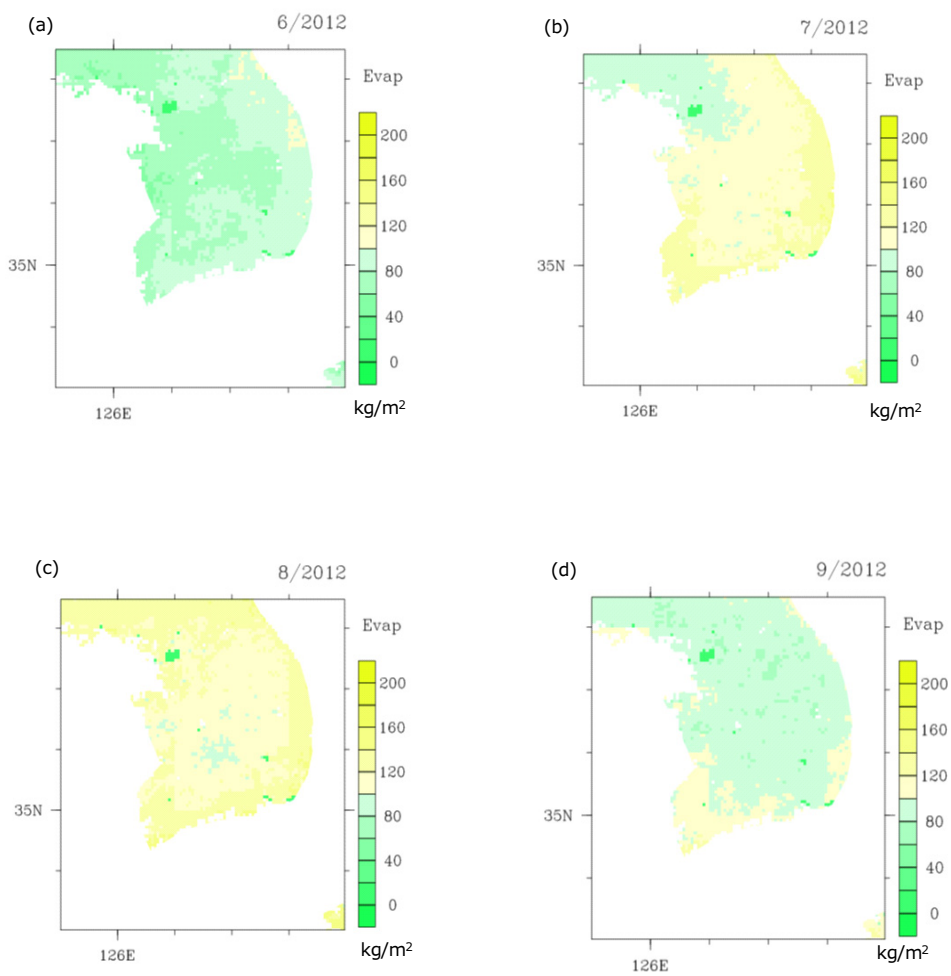


Figure 11 Monthly Evapotranspiration in: (a) June, (b) July, (c) August, and (d) September.

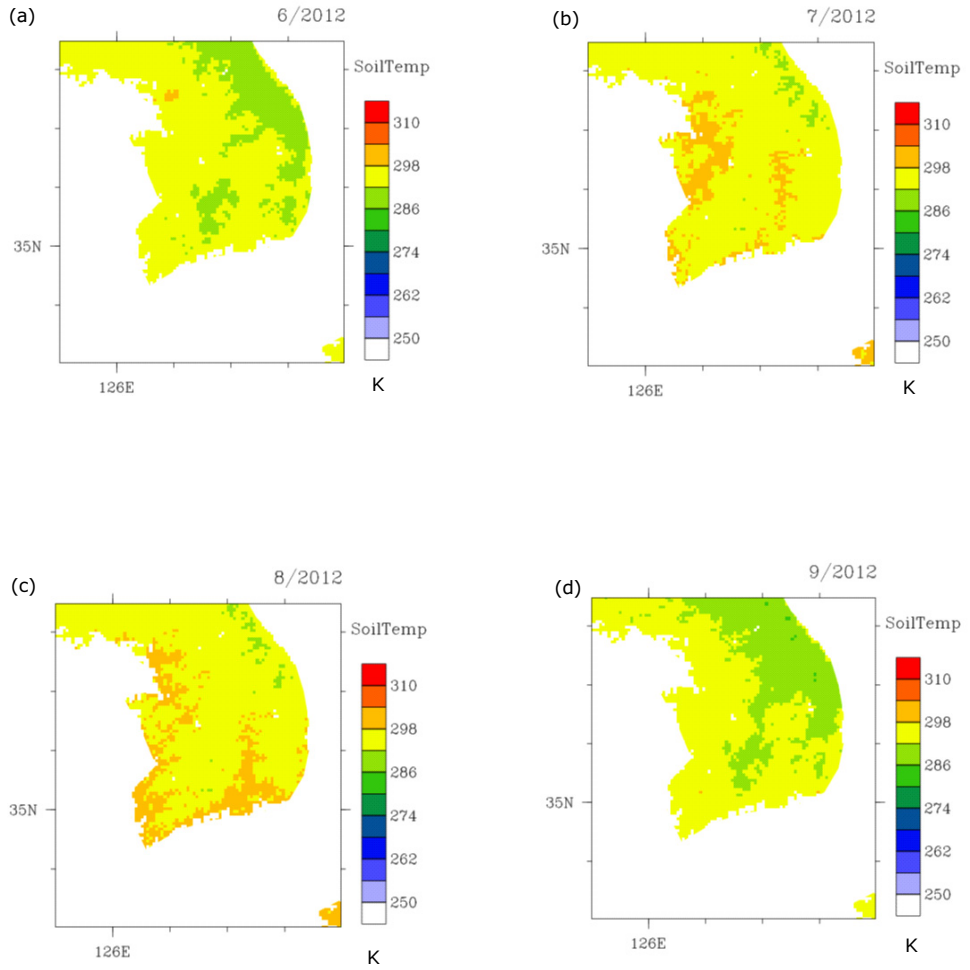


Figure 12 Monthly soil temperature at the first layer in: (a) June, (b) July, (c) August, and (d) September.

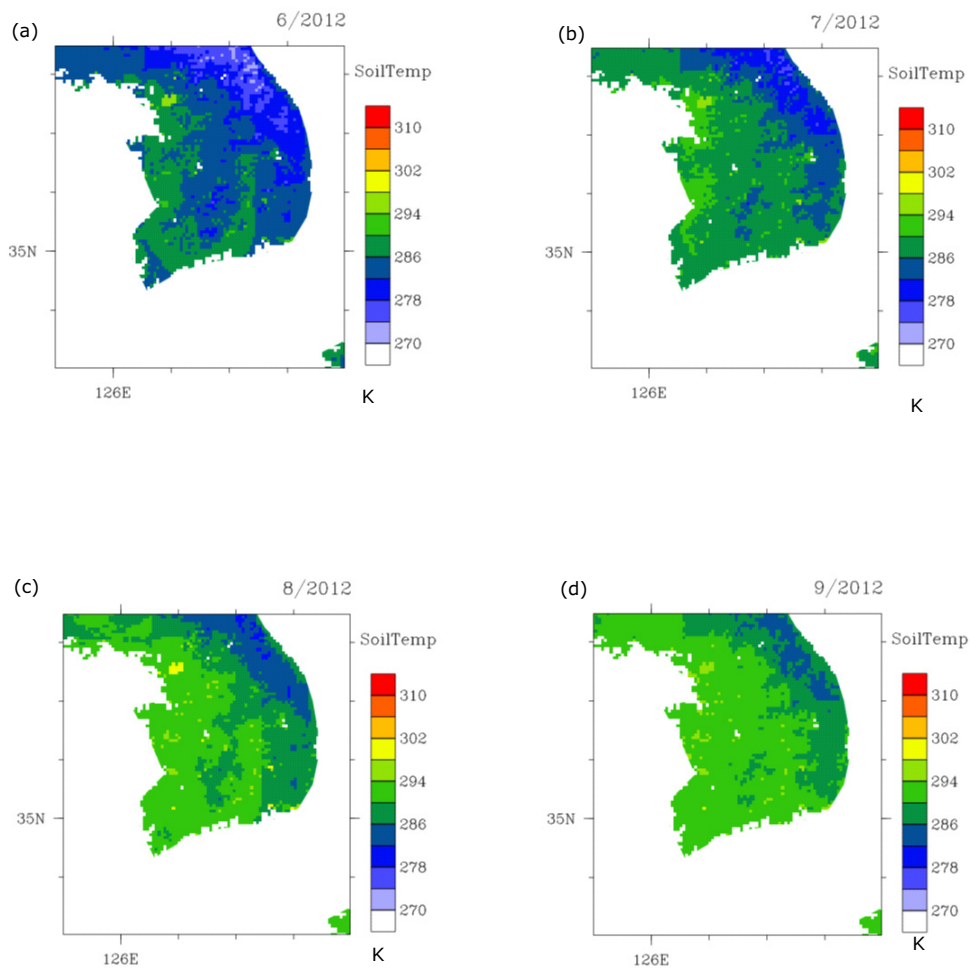


Figure 13 Monthly soil temperature at the fourth layer in: (a) June, (b) July, (c) August, and (d) September.

### 3.1.2 SOILCO2 모형

Figure 14는 9개 작부체계 농업지대에서 산간지대로 분류된 ACZ2의 대표 셀에서 SOILCO2 모형을 이용하여 토양호흡에 의한 일별 CO<sub>2</sub> 배출량을 추정된 그래프이다. 이산화탄소의 경우, 일반적으로 배출량은 겨울철에 낮게 나타나고, 여름철에 높게 나타나는 경향을 보였다. 이 경향성은 이규진 등 (2012)은 상수리나무림 (충청남도)의 토양호흡에 대한 연구에서 토양호흡량은 하절기에 증가 후 동절기에 감소하는 경향과 유사한 결과이다. 년 중 최소 이산화탄소 배출량은 2012년 2월 1일 (DOY: 32)의  $0.024 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었고, 최대 이산화탄소 배출량은 2012년 7월 25일 (DOY: 207)의  $0.687 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다. 이 값은  $4.72 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 와  $134.97 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 에 해당하는 수치이다 (Figure 14).

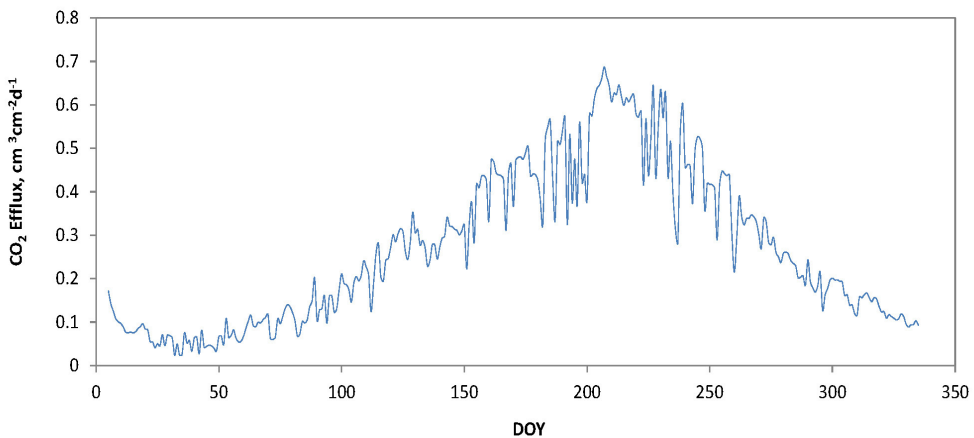


Figure 14 CO<sub>2</sub> efflux from the representative cell of forest in ACZ2.

연간 (2012년 1월1일부터 같은 해 11월 30일까지) 9개 작부체계 농업지대의 산림지역 토양으로부터 누적 이산화탄소 배출량을 추정된 결과를 Table 5에 요약하여 제시하였다. 중부내륙지대 (ACZ3)에서  $19,607 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 로 단위면적당 이산화탄소 배출량이 가장 많았고, 동해안지대 (ACZ9)의 산림지역에서  $13,182 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 로 가장 적게 이산화탄소를 배출하는 지대로 나타났다. 본 연구에서는 2012년 12월의 입력자료 확보의 어려움으로



12월의 추정치가 제외 되었으나, 겨울철의 토양호흡량이 적은 점을 고려한다면, 1월부터 11월까지의 누적 이산화탄소 배출량을 연간 누적 이산화탄소 배출량으로 볼 수 있을 것으로 사료된다. 이 값은 산림에서 Dynamic Closed Chamber Method를 사용하여 토양호흡을 미생물호흡량과 뿌리호흡량으로 나누어 측정한 이규진 등 (2012)의 연구 결과인 미생물호흡량 28,340 kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (뿌리호흡량 14,860 kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>)보다 다소 적게 추정된 값이다. 토양호흡은 주로 미생물에 의한 미생물호흡량과 뿌리호흡량으로 나눌 수 있는데, 미생물호흡량과 뿌리호흡량은 온도와 토양수분에 아주 민감한 것으로 알려져 있다 (Witkamp, 1969; McHale et al., 1998; Knapp et al., 1998). 이규진 등 (2012)은 휴대용 적외선 가스 분석기를 사용하여 월 2회 11:00-13:00시 사이에 측정한 값을 월 단위와 년 단위로 환산한 값으로, 일별 변화를 고려하지 못하고 있다. 본 연구에서는 뿌리성장모델과 뿌리호흡에 대한 입력변수 확보의 어려움으로 미생물호흡량만 추정치이다. 또한, 산림 생태계에 따라 토양호흡량의 차이가 날 수 있으므로, 이러한 점 들을 고려해 보면 본 연구의 다소 낮은 결과를 설명할 수 있을 것으로 판단된다. 김성빈 등 (2008)의 연구에서는 무등산 (전라남도)내 굴참나무림과 소나무림에서 토양호흡량을 휴대용 적외선 가스 분석기 (IRGA, Infrared Gas Analyzer, Licor 6400 portable photosynthesis system)를 이용하여 측정하여, 굴참나무림과 소나무림에서 각각 연간 33,220 kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>과 26,720 kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> 호흡량이 발생한다고 하였다. 이 이산화탄소 발생량은 뿌리호흡량을 포함한 값으로 뿌리호흡량을 제외한다면, 본 연구 결과와 유사한 값이라 할 수 있을 것으로 사료된다.

**Table 5** Cumulative CO<sub>2</sub> efflux from forest (1/1-11/30/2012).

ACZ	Cumulative CO <sub>2</sub> efflux from forest		
	cm <sup>3</sup> cm <sup>-2</sup>	kg CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup>	kg C ha <sup>-1</sup>
ACZ1	71.9	14,125	3,852
ACZ2	89.8	17,642	4,811
ACZ3	99.8	19,607	5,347
ACZ4	88.7	17,426	4,753
ACZ5	81.4	15,992	4,361
ACZ6	87.6	17,210	4,694
ACZ7	69.0	13,556	3,697
ACZ8	89.3	17,544	4,785
ACZ9	67.1	13,182	3,595

9개 작부체계 농업지대 (ACZ) 별 단위면적당 토양호흡량 (Table 5)과 각 군별 산림면적을 이용하여 산림토양에서 군단위 연간 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 산림토양에서 이산화탄소를 가장 많이 배출하는 군은 강원도 홍천군 (ACZ2)으로 약  $2.7 \times 10^6$  Ton CO<sub>2</sub> 배출하는 것으로 나타났고, 가장 적게 배출하는 군 (구)은 인천광역시 동구 (ACZ4)로 113.7 Ton CO<sub>2</sub>를 배출하는 것으로 추정되었다 (Figure 15). 강원도 홍천군은 산림이 약 153,951.5 ha, 인천광역시 동구는 6.5 ha였다. 따라서 산림토양에서 총 배출량 산정에는 면적당 이산화탄소 배출량보다 각 군의 산림면적이 더 중요한 요소임을 알 수 있다.

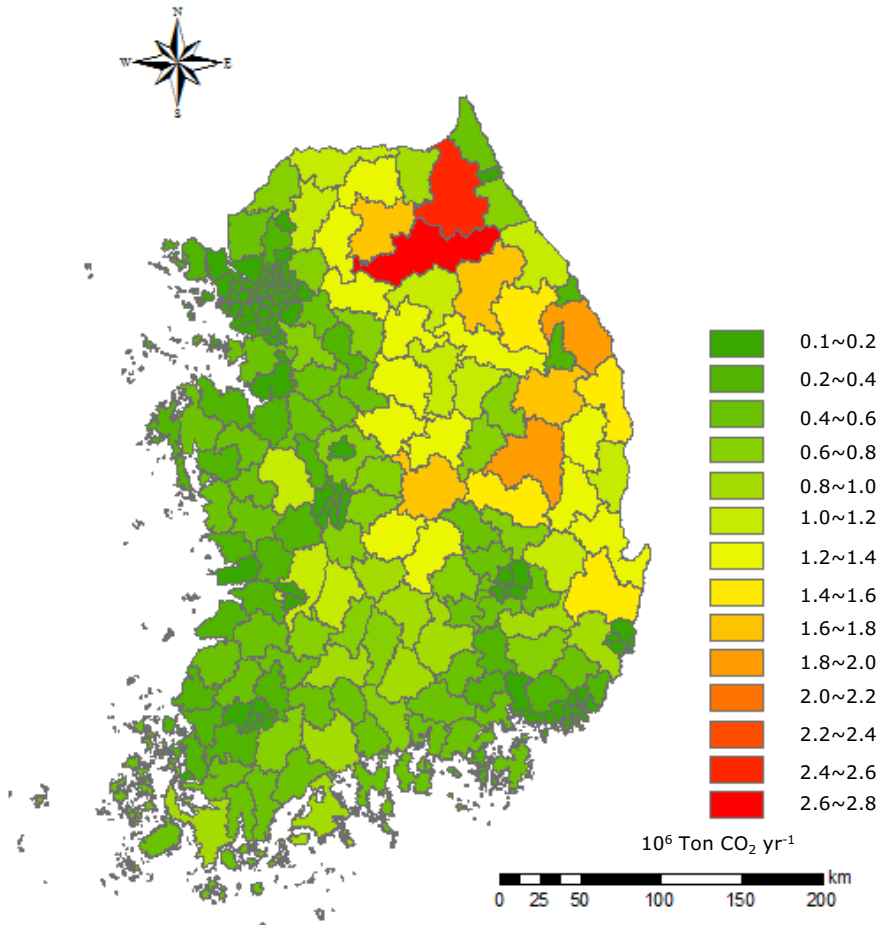


Figure 15 Annual cumulative CO<sub>2</sub> efflux from forest at "gun"-level (Jan.-Nov., 2012).



### 3.1.3 DNDC 모형

메탄 배출량을 DNDC 모형을 이용하여 추정하였다. 김제 플럭스사이트에 설치한 메탄 자동화 포집 시스템으로부터 메탄 배출량을 측정하여 DNDC 모형을 검증하였다. 벼 생육 기간동안 (2012년 6월 10일 부터 10월 20일 수확시점까지) 총 메탄 배출량은 193.7 kg C ha<sup>-1</sup>으로 측정되었으며, DNDC 모형으로부터 동기간 동안 메탄 배출량은 126.6 kg C ha<sup>-1</sup>으로 추정되었다 (Figure 16). RMSE 값이 1.4 kg C ha<sup>-1</sup>로 DNDC 모형이 논에서 메탄 배출량을 비교적 잘 추정하고 있다고 할 수 있다. 일 최대 메탄 배출량은 2012년 7월 18일 (DOY: 200) 7.45 kg C ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>이었으며, 2012년 10월 15일 (DOY: 289)에 0.22 kg C ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>로 최소로 메탄을 배출한 것으로 나타났다. 우리나라 벼 재배지에서 상시담수 조건에서 일 배출량은 2.37 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>(정현철 등, 2010)로 탄소 배출량으로 환산하면 1.78 kg C ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>이다. 이는 측정 평균값 1.59 kg C ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>보다 다소 높은 값이며, DNDC 모형을 이용한 일평균 배출량 1.04 kg C ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>로 다소 과소 모의 하는 것으로 나타났다. Jagadeesh Babu et al. (2005)은 DNDC모형이 벼논에서 자주 관측되는 벼 생육초기와 말기에 급격한 메탄플럭스 현상을 잘 모의하지 못하는 모형의 한계를 보고한 바 있다. 하지만, DNDC 모형을 이용하여 논에서 메탄 배출량 추정연구를 통하여 모형의 적용성을 평가한 많은 선행연구들이 있다 (Zhang et al., 2009; Fumoto et al., 2007; Pathak et al., 2005; Jagadeesh Babu et al., 2005).

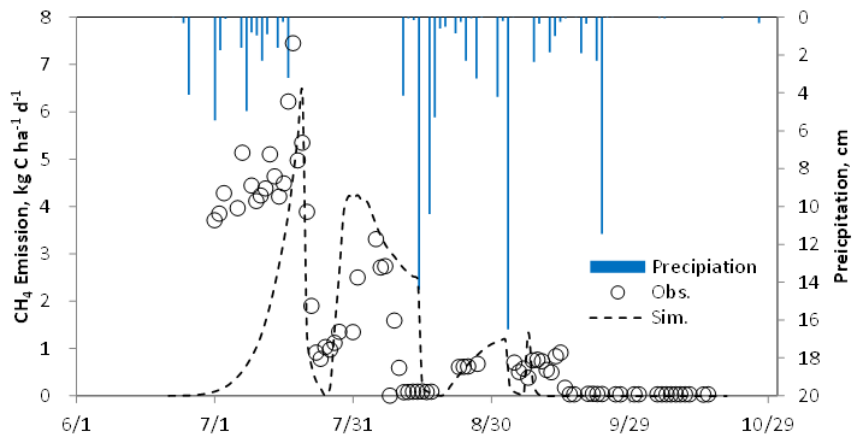


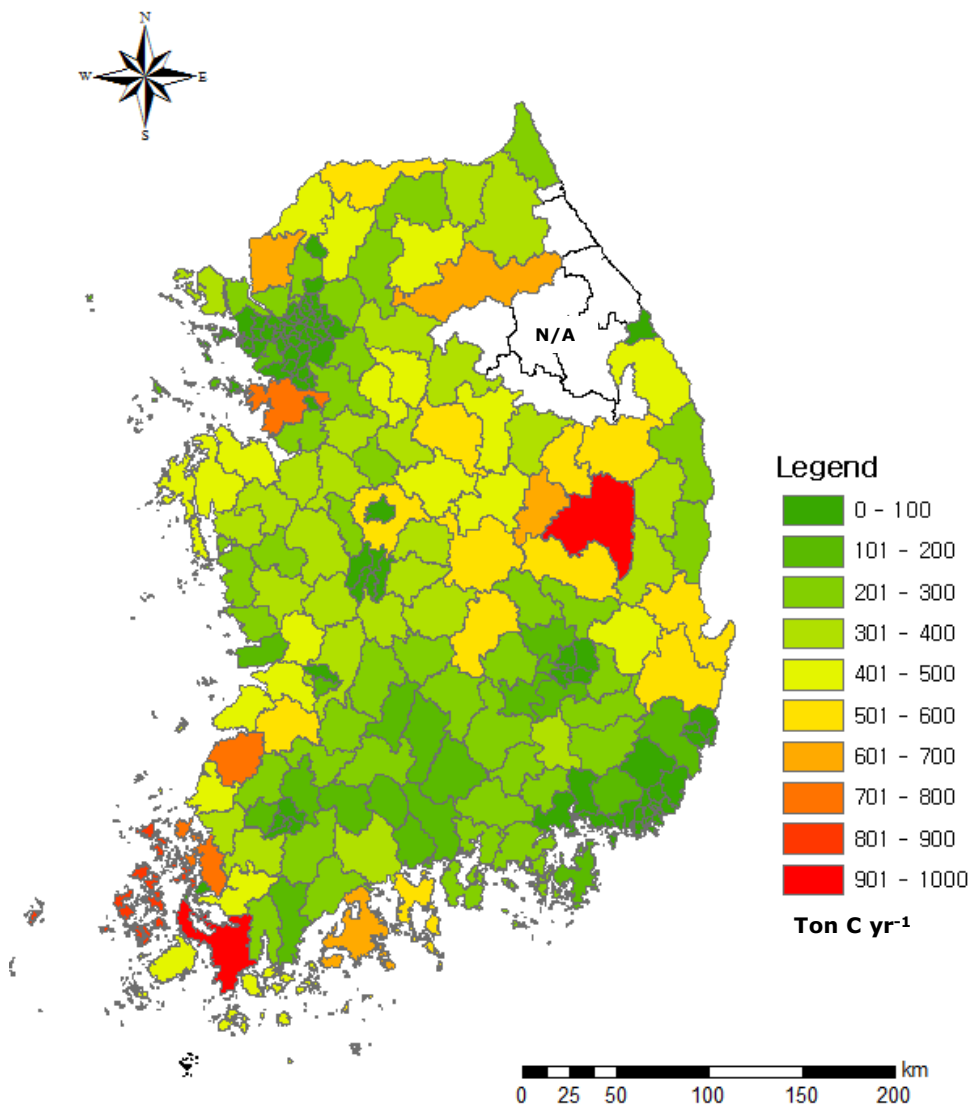
Figure 16 CH<sub>4</sub> Efflux from the Gimje Flux site.

9개 작부체계 농업지대의 논의 대표 셀에서 2001년부터 2012년까지의 연간 누적 메탄 배출량을 추정하였다 (Table 6). 평균 연간 누적 메탄 배출량은 2008년  $63.7 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 최소의 값을 보였고, 2001년  $124.6 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 최대의 값을 보였다. 메탄 배출량이 년도 별 상이한 값을 보이는 이유는 강수량, 토양온도, 토양습도 등의 차이에 의해 기인한 것으로 추정된다.

**Table 6** Annual cumulative CH<sub>4</sub> efflux from representative paddy fields at agroclimatic zones from 1/1/2001 to 11/30/2012. ACZ represents agroclimatic zone.

ACZ	CH <sub>4</sub> efflux (kg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )											
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
ACZ2	88.37	59.78	53.88	71.66	66.35	57.03	55.80	36.43	42.42	42.68	48.52	61.25
ACZ3	110.3	80.92	91.40	70.92	73.54	74.29	71.28	49.46	53.07	48.00	51.37	61.48
ACZ4	188.3	137.6	103.1	131.3	102.0	114.7	110.0	96.96	97.98	92.39	89.08	84.75
ACZ5	118.7	118.8	107.3	102.0	73.97	75.66	77.59	59.56	80.21	58.59	62.89	63.54
ACZ6	121.6	101.0	110.5	68.95	76.86	88.57	93.22	66.83	90.62	66.53	66.96	75.39
ACZ7	122.0	87.74	96.55	86.99	87.70	83.00	87.06	63.18	104.3	71.21	69.38	58.08
ACZ8	122.9	107.7	114.3	92.14	89.84	86.97	88.87	73.42	89.80	67.81	65.45	79.61
Mean	124.6	99.1	96.7	89.1	81.5	82.9	83.4	63.7	79.8	63.9	64.8	69.2

2012년도 연간 메탄 배출량 (Table 6)과 각 군별 논면적을 이용하여 논에서 군단위 연간 메탄 배출량을 산정하였다(Figure 17). ACZ1 (산간고랭지대)와 ACZ9 (동해안지대)에서는 5 km 격자자료에서 논으로 분류되는 셀이 각각 0개와 3개로 나타나, 본 연구에서 연간 메탄 배출량 산정에 제외하였다. ACZ1과 ACZ9에 속하는 시/군/구는 강원도 강릉시, 고성군, 속초시, 양양군, 영월군, 정선군, 태백시, 평창군, 횡성군이다. 논에서 메탄을 가장 많이 배출하는 상위 5개군은 전라남도 해남군, 경상북도 안동시, 전라남도 신안군, 전라남도 무안군, 전라북도 고창군 순이었으며, 각각 964.8, 952.4, 857.3, 743.2, 729.4 Ton C yr<sup>-1</sup>의 2012년에 배출하는 것으로 나타났다. 도시지역을 제외하고 연간 메탄 배출량 하위 5개 군은 전라남도 구례군, 경상북도 고령군, 전라남도 담양군, 경상남도 산청군과 하동군으로, 각각 112.6, 139.5, 149.3, 153.0, 155.2, 164.4 Ton C yr<sup>-1</sup>의 메탄이 2012년에 배출되는 것으로 추정되었다.



**Figure 17** Annual cumulative CH<sub>4</sub> efflux from paddy fields at “gun”-level. ACZ1 and ACZ9 are white shaded regions. N/A stands for Not Applicable.

## 4. 요약 및 결론

우리나라의 토지이용별 온실가스(이산화탄소, 메탄) 배출량을 추정하기 위해 LSM과 Biogeochemistry 모형을 연계하여 적용하였다. NOAH-LSM 모형을 5km 격자크기로 GDAS와 TRMM 3B42 포싱자료, USGS 토지피복도, GTOPO30, 한반도 지역을 한반도 정밀토양도로 바꾸어 한반도지역의 공간해상도를 개선시킨 FAO 토양도 등을 이용하여 한반도에 적용하였다. 김제플렉스사이트의 순복사에너지 관측값을 이용하여 NOAH-LSM 모형을 평가하였다. NOAH-LSM 모형 결과 중 증발산량과 토양온도는 SOILCO2 모형의 입력 자료로 사용되었으며, SOILCO2 모형은 산림지역에서 이산화탄소 배출량을 추정하는데 사용되었다. 논에서 메탄 배출량을 추정하기 위해서는 DNDC 모형을 적용하였다. 시비 및 물관리 등의 영농활동 자료 구축 등의 어려움으로 19개 농업기후지대를 9개 작부체계 농업지대로 재분류하여 토지이용과 토양특성을 고려하여 논과 산림의 대표 셀을 선정하였다. 9개 작부체계 농업지대 별 토지이용과 모형으로부터 추정된 단위면적당 온실가스 배출량을 이용하여 군단위 온실가스 배출량을 추정하였다.

강원도 홍천군으로 연간 약  $2.7 \times 10^6$  Ton  $\text{CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 의 이산화탄소를 배출하는 것으로 추정되었으며, 인천광역시 동구가 113.7 Ton  $\text{CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 를 배출하는 것으로 추정되어, 각각 산림지역에서 연간 이산화탄소를 가장 많이 배출하는 군과 최소로 배출하는 군(구)으로 선정되었다. 전라남도 신안군이 논에서 메탄 배출량이 2012년 964.8 Ton C  $\text{yr}^{-1}$ 로 최대로 배출하는 군으로 추정이 되었으며, 도시지역을 제외하고 전라남도 구례군이 112.6 Ton C  $\text{yr}^{-1}$ 의 메탄을 배출하는 것으로 추정되어 가장 적게 메탄을 배출하는 군으로 선정이 되었다.

본 연구를 활용하여 논에서 메탄 배출량 추정 모형인 DNDC모형을 이용하여 벼 생산량을 고려하며 적절한 물관리와 시비방안 등으로 논에서 메탄 배출량을 감축하는 방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 DNDC 모형 등 탄소순환 모형을 정량적으로 평가하고 탄소순환 모형을 개선하기 위해 장기간 온실가스를 관측하고 수집하는 것이 필요할 것으로 보인다. 또한, 순생태계생산량(Net Ecosystem Production, NEP)이나 순생태계교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)등을 산정하는데 토양 호흡량은 중요한 요소이므로, 본 연구의 산림토양에서 이산화탄소 배출량 추정을 통하여, 산림생태계가 이산화탄



소의 흡수원인지 배출원인지 결정하는데 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구는 군단 위 토지이용별 온실가스 배출량을 추정하여, 토지이용별 온실가스 배출량 감축방법제시에 지역별 특성을 고려한 실효성 있는 정책 대안을 제시하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- 국립환경과학원, 2010a: GHG-CAPSS 신뢰도 향상을 위한 기획연구 (A Planning Study on Improvement of Reliability of GHG-CAPSS) 환경부.
- 국립환경과학원, 2010b: 지자체 기후변화대응종합계획 수립 지원을 위한 온실가스 감축계획 수립 가이드라인 (Ver. 1). 환경부.
- 김다은, 백종진, 정성원, 최민하, 2013: 플릭스 타워 관측 자료 및 통합수문모형을 이용한 순복사량 산정: 설마천, 청미천유역을 대상으로. 한국수자원학회논문집, 46(3), 301-314.
- 김성빈, 이계한, 정남철, 2008: 소나무림과 굴참나무림의 낙엽분해와 토양 CO<sub>2</sub> 발생. 한국임학회 정기 학술 연구발표회, 2008년 2월 14일, 국민대학교.
- 농업기술연구소, 1896. 한국의 농업기후 특징과 수도 기상재해 대책. 농촌진흥원. 수월. 194p.
- 이규진, 원호연, 문형태, 2012: 상수리나무림의 토양호흡에 대한 뿌리호흡의 기여. 한국환경생태학회지, 26(5), 780-786.
- 정유란, 조경숙, 이변우, 2006: 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가. 한국농림기상학회지, 8(4), 229-241.
- 정현철, 노기안, 김건엽, 소구호, 심교문, 이덕배, 2010: 1991년부터 2008년까지 우리나라 농경지에서의 메탄 배출량 평가. 한국토양비료학회 2010 추계학술발표회 논문 초록집, 2010.10. 214p.
- 최돈향, 윤성호, 1989: 농업 기후 지대 구분과 기상 재해 특성. 한국작물학회, 1, 13-33.
- Abreu, P., M. Aglietta, M. Ahlers, E.J. Ahn, I.F.M. Albuquerque, D. Allard, ..., M. Ziolkowski, 2012: Description of atmospheric conditions at the Pierre Auger Observatory using the Global Data Assimilation System (GDAS). *Astroparticle Physics*, 35, 591-607.
- Bauer, J., M. Herbst, J.A. Huisman, L. Weihermuller, H. Vereecken, 2008: Sensitivity of simulated soil heterotrophic respiration to temperature and moisture reduction functions. *Geoderma* 145(1-2), 17-27
- Bauer, J., L. Weihermuller, J.A. Huisman, M. Herbst, A. Graf, J.M. Sequeira, H. Vereecken, 2012: Inverse determination of heterotrophic soil respiration response to temperature and water content under field conditions. *Biogeochemistry* 108, 119-134.
- Betts, A., F. Chen, K. Mitchell, and Z. Janjic, 1997: Assessment of the land surface and boundary layer models in two operational versions of the NCEP Eta model using FIFE data. *Monthly Weather Review*, 125, 2896-2916.
- Buchner, J.S., Simunek, J., Lee, J. Rolston, D.E., Hopmans, J.W., King, A.P., Six, J., 2008: Evaluation of CO<sub>2</sub> fluxes from an agricultural field using a process-based numerical model. *J. Hydrol.* 361, 131-143.
- Buchner, J.S., Simunek, J., Lee, J. Rolston, D.E., Hopmans, J.W., King, A.P., Six, J., 2008: Evaluation of CO<sub>2</sub> fluxes from an agricultural field using a process-based numerical model. *J. Hydrol.* 361, 131-143.
- Coleman, K. and D.S. Jenkinson 2005: RothC-26.3. A Model for turnover of carbon in soil, Model description and windows users guide. IACR-Rothamsted, Harpenden, 45 pp. Franko et al., 1997



- Del Grosso, S., Okima, D., Parton, W., Mosier, A. R., Peterson, G. and Schimel, D., 2002: Simulated effects of dryland cropping intensification on soil organic matters and greenhouse gas exchanges using the DAYCENT ecosystem model. *Environ. Pollut.*, 116, S75-S83.
- Ek, M.B., K.E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J.D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8851.
- 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. Change Biol.* 14, 382-402.
- Gesch, D.B., K.L. Verdin, and S.K. Greenlee, 1999: New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 80, 69-70.
- Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, 2010: LIS User's Guide. Revision 6.1. Greenbelt, MD, USA.
- Herbst, M., Hellebrand, H.J., Bauer, J., Huisman, J.A., Simunek, J., Weihermuller, L., Graf, A., Vanderborght, J., Vereecken, H., 2008: Multiyear heterotrophic soil respiration: Evaluation of a coupled CO<sub>2</sub> transport and carbon turnover model. *Ecol. Model.* 214, 271-283.
- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E. J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, and D.B. Wolff, 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38-55.
- Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, 2012: User's guide for the DNDC model (version 9.5), University of New Hampshire, USA.
- IPCC, [2007] Summary for policymakers. In: *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jagadeesh Babu, Y.J., C. Li, S. Frolking, D.R. Nayak, A. Datta and T.K. Adhya, 2005: Modelling of methane emissions from rice-based production systems in India with the denitrification and decomposition model: Field validation and sensitivity analysis. *Current Science*, 89(11),1-9.
- Knapp, A.K., S.L. Conard, J.M. Blair, 1998: Determination of soil CO<sub>2</sub> flux from a subhumid grassland: Effects of fire and fire history. *Ecological Application*, 4, 760-770.
- Koren, V., J. Schaake, K. Mitchell, Q.-Y. Duan, F. Chen, and J.M. Baker, 1999: A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models. *Journal of Geophysical Research*, 104, 19 569-19 585.
- Kumar, S.V., C.D. Peters-Lidard, Y. Tian, P.R. Houser, J. Geiger, S. Olden, L. Lighty, J.L. Eastman, B. Doty, P. Dirmeyer, J. Adams, K. Mitchell, E.F. Wood, J. Sheffield, 2006: Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling. *Environmental Modelling and Software*, 21, 1402-1415.

- Lamaud, E., Ogee, J., Brunet, Y., Berbigier, P., 2001: Validation of eddy flux measurements above the understory of a pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 187-203.
- Li, C. S., Frolking, S. and Frolking, T. A., 1992: A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.*, 97, 9759-9776.
- Matthews, R., Wassmann, R., Arah, J., 2000: Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia. I. Model development. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 58, 141-159.
- McHale, P.J., M.J. Michell, F.P. Bowles, 1998: Soil warming in a northern hardwood forest: trace gas fluxes and leaf litter decomposition. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 1365-1372.
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, 120, 1747-1763.
- Parton, W.J., Pullian, W.M., Ojima, D.S., 1994: Application of the CENTURY model across the LTR network: parameterization and climate change simulations. *Bull. Ecol. Soc. Am.* 75, 186-187.
- Pathak, H., C. Li and R. Wassmann, 2005: Green house gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeosciences Discussions*, 2, 77-102.
- Pathak, H., Ki, C., Wassmann, R. 2005: Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeosciences* 2, 113-123.
- Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A. and Klooster, S. A., 1993: Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem. Cycles*, 7, 811-841.
- Simunek, J. and D.L. Suarez, 1993: Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development. *Water Resour. Res.* 29 (2), 487-497.
- Simunek, J., Suarez, D.L., 1993: Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development. *Water Resour. Res.* 29 (2), 487-497.
- Simunek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M., 2005: The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0, HYDRUS Software Series 1. Department of Environmental Science, University of California Riverside, Riverside, California, p. 240.
- User's Guide for the DNDC Model, Version 9.5, 2012: Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, ... Verma, S., 2002: Carbon balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223-243.
- Witkamp, M., 1969: Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from the forest floor. *Ecology*, 47, 492-494.
- Zhang, L., Yu, D., Shi, X., Weindorf, D., Zhao, L., Ding, W., Wang, H., Pan, J., Li, C. 2009: Quantifying methane emissions from rice fields in the Taihu lake region, China by coupling a detailed soil database with biogeochemical model. *Biogeosciences*, 6, 739-749.



## APCC RESEARCH REPORT 2013-05

- Assessment of Climate Change Impacts on Rice Productivity in the Asia-Pacific Region
- Assessment of Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs in Consideration of Uncertainty
- Estimation of GHG Fluxes by Landcover Type Including Rice Paddy Fields

### APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,  
Republic of Korea  
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949  
[www.apcc21.org](http://www.apcc21.org)

비매품



94550



9 788973 33374

ISBN 978-89-97333-97-4  
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)