

〈Original article〉

전국 논 토양 이산화탄소 배출량 추정을 위한 DNDC 모형의 국내 적용성 평가

황원재 · 김용성 · 민현기 · 김정규 · 조기종 · 현승훈*

고려대학교 환경생태공학과

Evaluating the Applicability of the DNDC Model for Estimation of CO₂ Emissions from the Paddy Field in Korea

Wonjae Hwang, Yong-Seong Kim, Hyungi Min, Jeong-Gyu Kim, Kijong Cho and Seunghun Hyun*

*Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School,
Korea University, Seoul, Republic of Korea*

Abstract - Greenhouse gas emission from agricultural land is recognized as an important factor influencing climatic change. In this study, the national CO₂ emission was estimated for paddy soils, using soil GHG emission model (DNDC) with 1 km² scale. To evaluate the applicability of the model in Korea, verification was carried out based on field measurement data using a closed chamber. The total national CO₂ emission in 2015 was estimated at 5,314 kt CO₂-eq, with the emission per unit area ranging from 2.2~10.0 t CO₂-eq ha⁻¹. Geographically, the emission of Jeju province was particularly high, and the emission from the southern region was generally high. The result of the model verification analysis with the field data collected in this study (n=16) indicates that the relation between the field measurement and the model prediction was statistically similar (RMSE=22.2, ME=0.28, and r²=0.53). More field measurements under various climate conditions, and subsequent model verification with extended data sets, are further required.

Key words : carbon dioxide (CO₂) emission, DNDC, paddy field, national estimation

서 론

기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가 보고서에 의하면 2011년 지구 대기의 이산화탄소 농도는 391 ppm으로 산업화 이전인 1750년에 비해 약 40% 증가하였으며, 지구의 연평균 기온은 133년간(1880~2012) 약 0.85°C 상승한 것으로 나타

났다(IPCC 2013). 기후변화에 영향을 미치는 주요 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등이 있으며, 이는 주로 산업, 운송, 농업 등 인간의 생산 활동과 연관된 과정에서 배출된다. 미국의 경우 농업 활동 과정에서 토양에서 배출되는 온실가스는 전체 배출량의 약 10%로 추정하고 있다(U.S. Department of State 2010).

한국의 농업은 면적 및 규모가 작고, 농경지가 산발적으로 여러 지역에 분포하는 특성이 있다. 12.5km² 수준(scale)으로 모형을 구동할 경우 산발적인 농경지의 특성을 고려한 온실가스 배출량 산정이 어렵기 때문에 높은 불확실성을 가

* Corresponding author: Seunghun Hyun, Tel. 02-3290-3068,
Fax. 02-3290-3040, E-mail. soihyun@korea.ac.kr

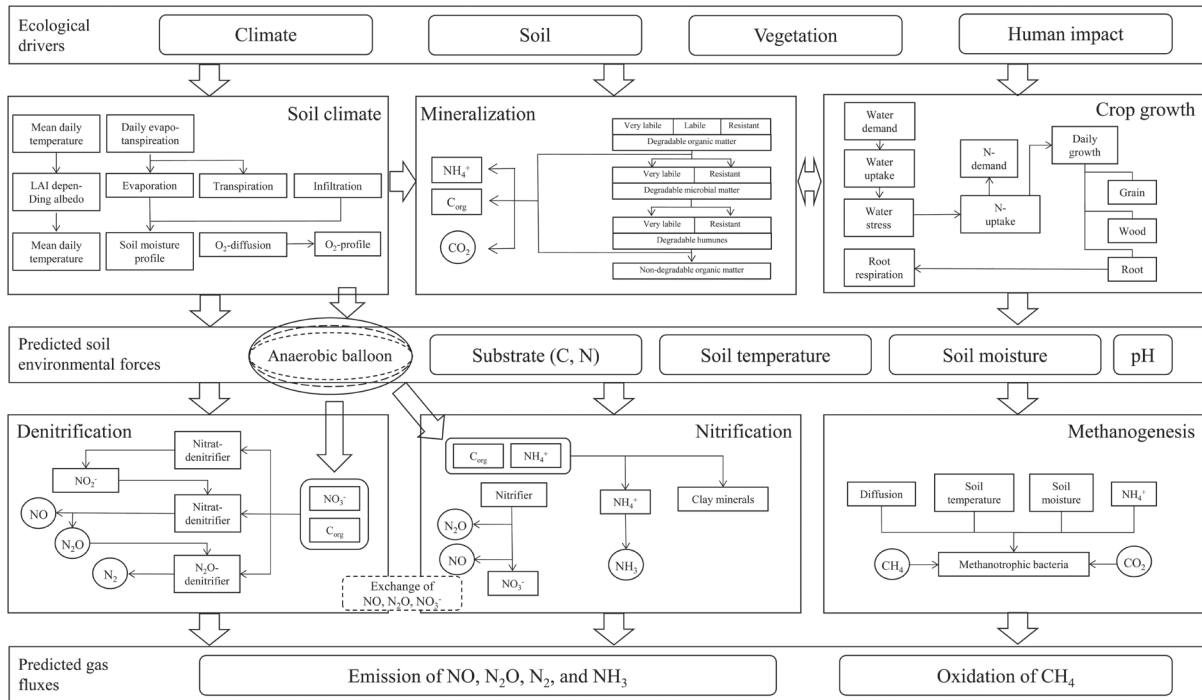


Fig. 1. The main framework of DNDC model(modified from Giltrap *et al.* 2010).

진다. 이러한 이유로 국가적 수준의 정밀한 온실가스 배출량을 추정하기 위해서는, 고 해상도 기상자료와 토양자료를 바탕으로 해상도가 높은(1 km² 수준) 모형 구동이 필요하다.

이미 해외에서는 DNDC (Denitrification and Decomposition), DAYCENT (The daily Century), COUP (Coupled heat and mass transfer), EXPERT-N 모형 등 많은 토양 온실가스 배출 모형이 연구 및 개발되어 온실가스 배출량 산정에 활용되고 있다(Li *et al.* 1992; Engel and Priesack 1993; Parton *et al.* 1996; Jansson and Moon 2001). 하지만 현재까지 국내에서 자체 개발된 토양 온실가스 배출 모형은 없으며, 해외에서 개발된 모형을 적용하여 현장에서 배출량 산정에 이용한 사례도 많지 않다.

선행 연구결과에 의하면, 토양 온실가스 배출 모형의 국내 적용 가능성을 평가하기 위해서 우선적으로 모형의 구조 파악 및 입·출력 자료 분석을 진행한 결과, DNDC 모형이 국내 적용에 가장 적절할 것으로 평가되고 있다(Hwang *et al.* 2015). DNDC 모형의 국내 적용성을 평가하기 위해서는 국내 농경지 토양을 대상으로 측정된 온실가스 자료를 바탕으로 모형의 검증이 이루어져야 한다. 이미 독일, 미국, 영국, 중국 등에서는 다양한 환경에서 장기간 현장 측정된 자료를 바탕으로 모형의 검증을 수행한 바 있지만(Li *et al.* 2004; Li *et al.* 2010), 국내에는 김제의 논 토양에서 CH₄를 측정된 후 모형과 비교하여 검증한 사례(Chun *et al.* 2016)가 유일하다.

따라서 본 연구에서는 전국의 논 토양을 대상으로 DNDC 모형을 이용해 연간 발생되는 CO₂ 배출량을 1 km² 수준으로 추정하였다. 또한 DNDC 모형의 국내 적용성 평가를 위해 2015~2016년 논 토양에서 실제 측정된 CO₂ 배출량을 토대로 DNDC 모형의 검증을 실시하였다.

재료 및 방법

1. DNDC 모형의 구조

우리나라 전국의 논 토양에서 배출되는 CO₂의 양을 추정하기 위해 DNDC 모형을 사용하였다. DNDC 모형은 농업 생태계에서 일(day) 단위로써 탄소와 질소의 순환을 바탕으로 구성된 생지화학적 모형이다(Li *et al.* 1992). 이 모형은 논 토양에서 CO₂, CH₄, N₂O 등의 주요 온실가스 배출량을 예측할 수 있으며, 기본적으로 토양 유기물의 분해와 작물의 뿌리 호흡으로 인한 CO₂ 배출량, 토양의 산화환원 상태에 따른 CH₄ 배출량 및 질산화(nitrification)와 탈질화(denitrification) 반응을 통한 N₂O 배출량을 모의한다. DNDC 모형은 크게 두 가지 요소로 구성되어 있다. 토양 기상, 작물의 성장 및 분해에 대한 하위모형(sub-model)으로 이루어진 첫 번째 구성 요소는 생태학적 인자(ecological driver; 기상, 토양, 식생, 인간 활동)에 의해서 결정되고, 토

Table 1. Input data for the DNDC model

Type	Sub-type	Unit	Scale (km)	Source
Climate	Max temperature	°C	1	Korea Meteorological Administration
	Min temperature	°C	1	
	Precipitation	cm	1	
Management practice	Tillage	cm	1	Korea Rural Development Administration
	Fertilizer	kg urea ha ⁻¹	1	
	Cultivation period	day	1	
	Flooding	day	1	
Soil factor	Soil organic carbon	g g ⁻¹	1	Korea Rural Development Administration
	pH	1 : 5	1	
	Clay	%	1	
	Bulk density	g cm ⁻³	1	

양의 산화환원 상태, 토양 온도, 수분, pH 등이 모의되어 토양 내 탄소와 질소의 양을 예측한다. 두 번째 구성요소는 첫 번째 구성 요소에서 예측한 탄소와 질소가 생지화학적 반응인 질산화(nitrification), 탈질화(denitrification) 및 혐기소화(anaerobic fermentation) 반응을 모의하고 이러한 반응들을 통하여 NO, N₂O, N₂, NH₃, CO₂ 및 CH₄ 배출량을 예측한다(Fig. 1). 본 연구에서는 2012년 개발된 DNDC 9.5 버전(<http://www.dnnc.sr.unh.edu/>)을 이용하여 CO₂ 배출량 추정에 사용하였다.

2. 연구대상지 및 입력자료 구축

논 토양 CO₂ 배출량 추정을 위한 연구대상지는 동경 124°54'~131°06', 북위 33°09'~38°45'으로 대한민국 전역이며, 그 중 지목이 논인 경우만을 추출하여 사용했다. 농경지의 구분은 2007년 환경부 중분류 토지피복도를 따르며, 1 km²의 정방형 격자(grid)를 기본단위로 총 63,808개의 격자를 대상으로 모형을 구축했다. 구동 후 1 km² 격자 내의 논 분포 비율을 토대로 실제 논 면적을 계산했으며, 총 면적은 약 12,600 km²이었다.

DNDC 모형 구동에 사용되는 입력자료는 총 11가지로, 기후자료(최대/최소 온도, 강수량), 재배관리자료(경운, 비료 사용량, 재배기간, 담수기간), 토양자료(토양 유기탄소 함량, pH, 점토함량, 용적밀도)로 나누었다(Table 1). 연구에 사용된 기상자료는 최고기온(°C), 최저기온(°C), 강수량(cm)이며 2011년부터 2015년까지 전국 기상 관측소에서 관측된 기상자료를 일별로 확보하여 사용했다. 기상자료의 보간은 대표적 공간내삽기법인 Kriging을 이용하였으며, 공간해상도는 1 km²로 설정하였다.

재배관리자료는 농촌진흥청(<http://www.nongsaro.go.kr/>)에서 제공하는 영농관리방법을 토대로 최적의 조건에서 벼가 재배될 수 있도록 평균적인 값을 적용했다. 벼의 재배 기

간은 4월 30일에서 10월 21일이며, 경운은 4월 9일 10 cm 깊이로 모의하였다. 무기질 질소비료(요소)는 4월 8일과 7월 28일 각각 50, 20 kg ha⁻¹ 시비하였으며, 4월 14일에서 7월 17일 사이에는 지속담수(continuous flooding), 7월 27일에서 9월 26일 사이에는 절수관개(marginal flooding) 상태로 담수를 모의했다.

전국 격자별 토양자료는 토양화학성(유기탄소, pH)과 토양물리성(점토함량, 용적밀도)을 구축했다. 토양화학성 자료는 국립농업과학원의 토양검정자료(약 365,000지점; 농촌진흥청)를 확보한 후 재가공 과정을 거쳐 1 km² 공간해상도 자료를 확보했다. 토양물리성 자료는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 수치정밀토양을 이용하였으며, 국내 377개 토양통 분류기준으로 대표토양의 토성을 구분하여 1 km² 공간해상도로 변환 후 모형의 입력자료로 사용했다.

3. 모형 유효성 검증

1) 조사 지점 및 기초자료 수집

DNDC 모형의 검증을 위해 경기도 남양주시 와부읍 도곡리에 위치한 고려대학교 덕소농장 내 논 토양(37°35'01"N, 127°14'16"E)을 대상으로 CO₂ 배출량을 측정하였다. 측정 기간은 2015년 2월 6일부터 2016년 10월 12일까지 총 16회 측정을 실시했으며, 측정 기간 중 기상 환경은 연평균 기온이 7.7~18.9°C이었으며, 연 평균 누적 강수량은 847 mm이었다. 기상자료는 2015~2016년까지 덕소농장 인근 기상 관측소에서 관측된 기상자료를 일별로 확보하여 사용했다. DNDC 모형 구동을 위한 구체적 입력자료는 Table 2와 같다. 벼의 재배기간은 5월 1일에서 10월 20일이며, 4월 19일 20 cm 깊이로 경운이 진행됐다. 4월 19일과 9월 20일 ha당 각각 50, 20 kg의 요소비료를 투입하였으며, 4월 15일~7월 20일과 7월 25일~8월 10일 기간 동안 절수관개로 담수를 유지했다. 모형 구동에 필요한 토양자료는 벼 재배 전 표

Table 2. Major input data for operating DNDC model validation from Duckso field

Type	Conditions or variations
Location	37°35'01.00"N, 127°14'16.56"E
Climate	Annual maximum temperature 18.9, annual minimum temperature 7.7, annual precipitation 847 mm
Land use	Paddy (<i>Oryza sativa</i> L.)
Management practice	
Tillage	20 cm, 4/19
Fertilizer	50 kg urea-N ha ⁻¹ at 4/19, 20 kg urea-N ha ⁻¹ at 9/20
Cultivation period	5/1~10/20
Flooding	4/15~7/20 (marginal), 7/25~8/10 (marginal)
Soil factor	
pH (1 : 5)	5.5
Bulk density (g cm ⁻³)	1.2
Soil Organic Carbon (%)	1.6
Clay (%)	17

토를 직접 채취하여 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법 (NIAST 2000)에 의거하여 분석하였다.

2) 토양 CO₂ 배출량 측정방법

논 토양에서 대기로 배출되는 CO₂를 정량하기 위해 사용된 방법은 폐쇄형 챔버(closed chamber)를 이용한 CO₂ 포집법이다. 폐쇄형 챔버는 토양과 챔버 내 공기 사이의 농도구배에 의해 토양에서 배출되는 가스를 포집하기 위해 사용하는 방법으로, 챔버 내부에서 CO₂ 농도가 평형상태에 도달하기까지의 시간에 따른 농도 변화를 이용하여 flux를 산정하는 방법이다(Clayton *et al.* 1994). 측정시 사용한 폐쇄형 챔버는 직경 30 cm, 높이 20 cm(부피 25.1 L)인 원통형으로 불투명한 아크릴로 제작했다. 또한 챔버 하부에 5 cm 여유공간을 두었으며, 토양에 직접 삽입하여 포집된 가스가 외부로 새어 나가지 않도록 설계했다.

CO₂ 배출량 측정을 위해 1~3000 ppm의 CO₂ 기체 정량 범위를 갖는 센서(Soha-Tech Korea)가 포함된 측정장비를 제작했으며, 챔버와 측정장비 사이에 튜브를 연결하고 센서 통과 후 다시 챔버로 튜브를 연결했다. 챔버와 측정장비 사이에 공기의 일정한 유속을 유지하기 위해 DC 펌프와 공기 유량계(1 L min⁻¹)를 설치하여 지속적으로 공기가 순환하는 시스템을 만들었다. CO₂ 측정 장비는 CO₂ 표준기체(N₂ balance, 11.0 Mpa)를 이용해 검량선을 작성했다. 표준기체의 농도는 500, 1000, 2000 ppmV이었으며, 검량선의 결정계수(r²)는 0.999 이상이였다.

CO₂의 포집과 측정은 오전(8:00~10:00)과 오후(4:00~6:00)에 각각 측정한 후 평균값을 사용했다. 센서를 이용한 시간 변화에 따른 챔버 내 CO₂의 농도변화를 초당 1회씩 총

30분간 측정하고 식(1)을 이용하여 배출량(flux)을 계산했다(Drewer *et al.* 2016).

$$\text{Flux} = \rho \cdot \left[\frac{V}{A} \right] \cdot \left[\frac{\Delta C}{\Delta t} \right] \cdot \left[\frac{273}{(T + 273)} \right] \quad \text{식(1)}$$

F: flux (mg m⁻² hr⁻¹)

ρ: density of gas (mg m⁻³)

V: volume of the chamber(m³)

A: the bottom area of the chamber(m²)

$\frac{\Delta C}{\Delta t}$: the averagechanging rate of concentration with time (ppmV hr⁻¹)

T: average temperature in the chamber(°C)

3) 유효성 평가 방법

DNDC 모형의 국내 적용가능성을 평가하기 위해 모형에서 추정된 값과 실제 측정값을 비교하여 유효성 검증을 실시했다. 유효성 검증을 위해 사용한 통계 방법은 root mean square error (RMSE), modeling efficiency (ME), pearson correlation coefficient (r)이다(Moriasi *et al.* 2007; Tonitto *et al.* 2007; Reidsma *et al.* 2009).

RMSE는 평균 제공근 오차로 관측값과 모형의 추정값 차이를 규명할 때 흔히 사용하는 분석기법이다. 아래의 식(2)을 바탕으로 관측값과 모형의 추정값의 RMSE 값을 산출하였다. RMSE가 0에 가까울수록 관측값과 추정값의 신뢰도가 높다.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{식(2)}$$

ME는 오차의 제공 합과 관측값과 평균 관측값 차이의 제곱합을 비교하는 분석기법으로 식(3)과 같다. ME값은 -∞에서 1 사이의 값을 가지는데 1에 가까울수록 관측값과 추정값의 신뢰도가 높다.

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{식(3)}$$

R은 두 값의 상관관계를 결정할 때 가장 대표적으로 사용되는 분석기법으로 식(4)를 이용하여 r를 구한 후 결정계수(r²)를 계산한다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad \text{식(4)}$$

여기서 O_i는 관측값, S_i는 추정값, \bar{O} 는 평균 관측값, \bar{S} 는 평균 추정값이다.

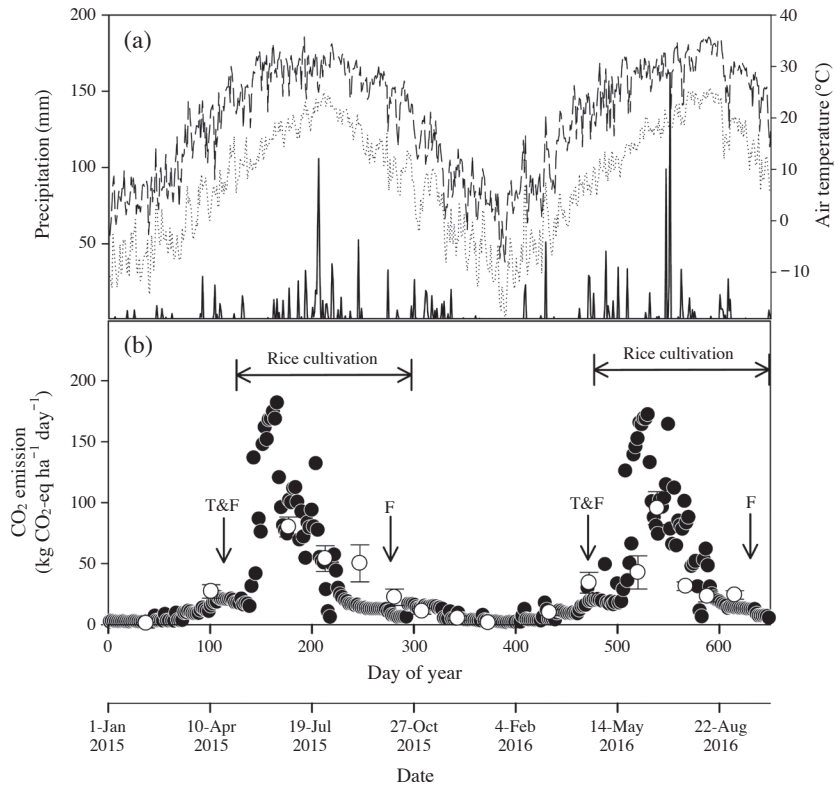


Fig. 2. Daily maximum (long dash), minimum (dotted) air temperature, and precipitation (solid) during the experimental period (2015~2016) (a), Comparisons of DNDC model simulated (●) and field observed (○) CO₂ emission from Duckso field (b). T and F are the point of tillage and point of fertilizer, respectively.

결과 및 고찰

1. 모형 검증결과

2015~2016년 고려대학교 덕소부속농장 논 토양에서 측정한 CO₂ 배출량(관측값)과, DNDC 모형에서 예측한 배출량(추정값)을 비교했다(Fig. 2). 벼 재배포장에서 측정한 총 16회 CO₂ 배출량 평균값은 32.1 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹이었으며, 범위는 1.1~95.4 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹로 다양한 농업 생태계에서 배출량을 측정한 범위인 27.8~125.84 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹와 유사한 수치였다(Mu *et al.* 2013). DNDC 모형으로부터 추정된 평균 배출량 및 범위는 29.1, 1.4~181.7 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹로 관측값과 유사했으나, 최대 배출량은 약 2배 높았다. 모형의 최대 배출량이 높은 이유는 측정 주기에 의한 오차로, 실제 배출량이 가장 높은 시기의 현장 측정이 이루어지지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

CO₂의 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 환경 변수는 토양의 온도이다(Huang *et al.* 2016). 온도가 증가하면 토양 유기물의 분해를 촉진시켜 CO₂의 배출량이 증가한다고 알려져 있다(Davidson and Janssens 2006). 본 연구에서 추정된 일별 CO₂ 배출량의 차이는 최고/최저 온도와 상당한 연관성이 있

는 것으로 나타났는데, 특히 온도가 높아지는 여름철에 CO₂의 배출량이 수십 배 이상 높아지는 것을 알 수 있었다. 또한 벼의 재배 전(4월)과 재배 직후(5월)의 평균 배출량은 17.7 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹에서 44.5 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹로 약 2.5 배 증가하며, 특히 5월에서 7월 사이는 평균 96.5 kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹의 CO₂가 지속적으로 배출되었다. 이러한 이유는 농업 활동에 의한 토양 미생물 활성 및 개체군 증가(Rai and Srivastava 1981)로 토양 유기물의 분해 촉진 및 미생물의 호흡 증가에 의한 영향(Raich and Tufekciogul 2000)일 것으로 판단된다. Schimel(2000)과 Cai *et al.*(2007)의 보고에 의하면, 무기태 질소를 논 토양에 시비하면 메탄산화미생물과 메탄환원미생물 활성도에 영향을 준다고 하였다. 즉, 논 토양에 시비된 질소는 NO₂, NO 및 N₂O로 환원되고, 환원된 질소 형태가 CO₂의 환원 형태인 CH₄ 발생을 감소시킨다. 또한, 벼 생육이 발달함에 따라 뿌리로부터 배출되는 CO₂가 증가하므로, 벼 생육 초기(4월에서 5월)보다 벼의 지상부와 지하부가 왕성하게 발달하는 시기인 5월에서 7월에 더 많은 CO₂가 발생한다(Ku *et al.* 2016).

DNDC 모형의 유효성을 평가하기 위해 연구포장에서 실측한 16회 현장 관측값과 모형 추정값을 통계적 방법으로

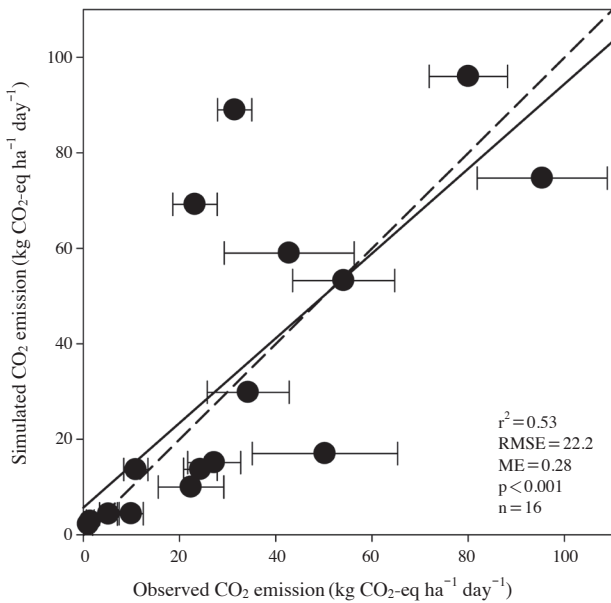


Fig. 3. Comparison between observed and simulated CO₂ emission (kg CO₂-eq ha⁻¹ day⁻¹) from paddy soil in Duckso field. The linear regression line is shown as a solid line. Dash line is an imaginary 1:1 line. Data points of observed CO₂ emission are the mean of triplicates, with the standard deviations indicated by error bars.

Table 3. Estimation of average CO₂ emission (t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹) and total CO₂ emission (kt CO₂-eq year⁻¹), as per the administrative areas of South Korea, in 2015

	Area (km ²)	Average CO ₂ emission (t CO ₂ -eq ha ⁻¹ year ⁻¹)	Total CO ₂ emission (kt CO ₂ -eq year ⁻¹)
South Korea	12,601	4.3	5,314.2
Busan	28	4.8	13.4
Chungcheong	2,801	4.1	1,134.5
Daegu	78	4.3	31.5
Daejeon	33	4.1	13.1
Gangwon	733	4.2	300.7
Gwangju	93	4.3	39.9
Gyeonggi	1,580	4.0	622.3
Gyeongsang	3,311	4.4	1,417.6
Incheon	97	4.1	39.4
Jeju	3	7.4	1.9
Jeolla	3,729	4.5	1,617.6
Seoul	6	3.9	2.4
Ulsan	110	4.4	47.7

비교했다(Fig. 3). 관측값과 추정값의 RMSE, ME, r²은 22.2, 0.28, 0.53으로 모형 적용가능성이 높았다. 다양한 농업환경에서 CO₂ 배출량을 측정하고 DNDC 모형과 비교한 연구(Berntsen *et al.* 2006; Abdalla *et al.* 2011)에서 각 값(RMSE, ME, r²)들의 범위를 비교하면, 0.16~249(RMSE), 0.03~0.72

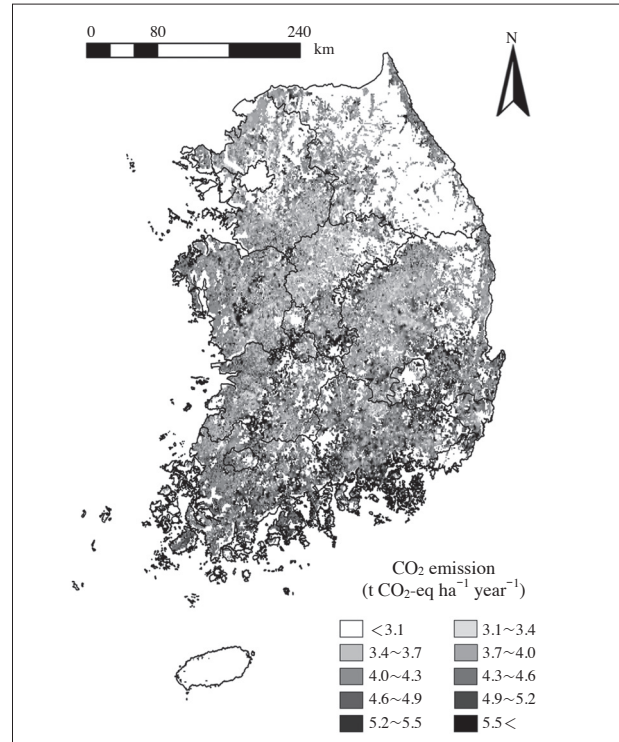


Fig. 4. Spatial distribution of national CO₂ emission (t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹) from paddy soil, in the year 2015.

(ME), 0.06~0.85(r²)로 본 연구에서 나타난 결과는 모두 조사 범위 내에 있었다. 논 토양 CO₂ 배출량 예측을 위해 고려대학교 덕소부속농장에서 현장관측값을 이용한 DNDC 모형의 검증 결과, 관측값과 추정값이 통계적으로 유사한 것을 확인했다. 본 연구에서 선정된 현장측정 지점은 경기 동북부에 위치하고 있어 국내 논 토양의 배출 특성을 대표할 수 없다. 하지만 국내에서 최초로 논 토양에서 CO₂ 배출량을 실측하고 그 측정결과를 토대로 모형의 검증이 수행되었다는 점에서 의미가 있다. 향후 지속적인 모니터링을 통해 다양한 기상조건에서 현장 측정자료를 구축하고 이를 기반으로 모형의 검증이 지속적으로 수행될 필요가 있다.

2. 전국 논 토양 CO₂ 배출량 예측 결과

1 km² 수준의 모형 구동을 통해 단위면적당 전국 논 토양에서 배출되는 행정구역별 연간 CO₂ 배출량을 계산했다(Table 3). 전국 논 토양에서 배출되는 연간 CO₂ 총 배출량은 5,314 kt CO₂-eq 이었다. 이는 온실가스종합정보센터에서 발표한 2013년 국내 논 토양 CH₄ 총 배출량인 6.9 Mt CO₂-eq보다 낮은 수치였으나(GIR 2015), 본 연구에서 예측한 CO₂ 총 배출량은 CH₄ 총 배출량의 약 77% 상응하는 수치였다. CH₄는 농업생태계의 주된 온실가스 배출원으로(Anand 2013), 현

재까지의 논을 대상으로 한 온실가스 추정 연구는 주로 CH₄에 초점을 맞추어 연구되고 있다(Fumoto *et al.* 2010; Katanayagi *et al.* 2016; Kim *et al.* 2016). 하지만 본 연구결과에 따르면, CO₂ 배출량은 논 토양에서 무시하지 못할 양인 것을 알 수 있었다. 행정구역별 총 CO₂ 배출량은 전라도가 1617.6 kt CO₂-eq로 가장 많았고, 경상도, 충청도 순으로 나타났다. 전라도, 경상도, 충청도 세 구역에서 배출되는 CO₂ 배출량은 총 4169.6 kt CO₂-eq으로 전국 배출량의 약 78%를 차지했다. 반면에 부산, 제주, 서울 등 주요 도시는 적은 논 면적을 가지고 있어 총 배출량에 큰 영향을 미치지 않았다.

지역별 CO₂ 배출량 차이를 확인하기 위해 1 km² 수준의 모든 격자를 대상으로 CO₂ 배출량을 공간적으로 표현하였다(Fig. 4). 전국토의 평균 CO₂ 배출량은 4.3 t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹이었으며, 63,808개 단위격자에서 모의된 CO₂ 배출량 추정값의 범위는 2.2~10.0 t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹로 나타났다. Pathak *et al.*(2005)은 인도의 행정구역 단위로 논 토양의 CO₂ 배출량을 DNDC 모형을 통해 예측했는데, 범위는 2.2~8.8 t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹로 본 연구의 결과 범위와 유사했다. 격자별 CO₂ 배출량을 공간적으로 표현한 결과, 중부 내륙지역과 남해안 지역에서 산발적으로 배출량이 높았다. 전국적으로는 중 북부지역 보다는 중남부 지역의 배출량이 높은 것을 확인할 수 있었으며, 이는 온도가 상대적으로 높은 남부지역이 북부지역보다 유기물분해가 더 촉진되는 것으로 추측된다. 한편, 행정구역별 평균 배출량은 제주도, 부산, 전라도 순으로 높게 나타났다. 제주도의 논 토양 면적은 3 km²에 불과했지만, 평균 배출량이 7.4 t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹로 전국 평균에 비해 1.7배 높게 나타났다. 제주도는 평균 유기탄소 함량이 39.8 g kg⁻¹로 전국 평균 토양 유기탄소 함량인 14.2 g kg⁻¹에 비해 2배 이상 높았다. 높은 토양 유기탄소 함량은 토양 미생물의 에너지원인 탄소원이 풍부하여 미생물에 의한 호흡량을 증가시켜 CO₂ 배출량이 증가한다고 알려져 있다(Gershenson *et al.* 2009). 따라서, 제주도 논 토양에서 단위면적당 CO₂ 배출량이 전국 평균에 비해 높은 것으로 나타났다.

적 요

본 연구는 대한민국 전역을 대상으로 국외에서 개발된 토양 온실가스 배출 모형인 DNDC 모형을 적용하여 논 토양에서 배출되는 CO₂를 추정하였다. 모형의 국내 적용성 평가를 위해서 2015년부터 2016년 경기도 지역 논 토양을 대상으로 폐쇄형 챔버를 이용해 CO₂ 배출량을 실측하고, 모형으로부터 산출된 추정값과 비교했다. DNDC 모형 검증결과 추정값과 관측값의 RMSE, ME, r²이 각각 22.2, 0.28, 0.53으로 통계적으로 신뢰할 수 있었다. 전국 CO₂ 배출량 예측 결과,

연간 총 배출량은 5,314 kt CO₂-eq이며 이는 전국 CH₄ 총 배출량의 77% 수준이었다. 행정구역별로는 전라도가 가장 많은 배출량을 보였으며, 논 면적이 많을수록 총 배출량이 높았다. 국토의 단위면적당 CO₂ 배출량은 2.2~10.0 t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹ 범위에 있었으며, 평균값은 4.3 t CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹이었다. 지역적으로는 한반도 중부지역 보다 남부지역에서 단위면적당 배출량이 더 높게 나타났다. 본 연구를 통해서, DNDC 모형은 국내 논 토양에서 배출되는 CO₂ 발생량을 유의하게 모의한 것으로 나타났다. 보다 더 정교한 온실가스 예측을 위해서는 기후특성, 토양특성, 작물경작특성 및 작물생육 특성을 고려하여 예측하는 것이 중요하며, DNDC 모형의 신뢰도를 높이면 국내 농업생태계의 환경 및 생물인자를 모의할 수 있는 세부모형을 개발하는 것이 필요하다.

사 사

This study was funded by the Korea Ministry of Environment(MOE) as “Climate Change Correspondence Program (2014001310008)”.

REFERENCES

- 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 CO₂ gas flux from Irish agriculture. *Glob. Planet. Change* 78:106-115.
- Anand SV. 2013. Global environmental issues. *Sci. Rep.* doi: 10.4172/scientificreports.632.
- Berntsen J, BM Petersen and JE Olesen. 2006. Simulating trends in crop yield and soil carbon in a long-term experiment effects of rising CO₂, N deposition and improved cultivation. *Plant Soil* 287:235-245.
- Cai Z, Y Shan and H Xu. 2007. Effects of nitrogen fertilization on CH₄ emissions from rice fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53: 353-361.
- Chun JA, KM Shim, SH Min and Q Wang. 2016. Methane mitigation for flooded rice paddy systems in South Korea using a process-based model. *Paddy Water Environ.* 14:123-129.
- Clayton H, JRM Arah and KA Smith. 1994. Measurement of nitrous oxide emissions from fertilized grassland using closed chambers. *J. Geophys. Res.* 99:16599-16607.
- Davidson EA and IA Janssens. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440:165-173.
- Drewer J, M Anderson, PE Levy, B Scholtes, C Helfter, J Parker, RM Rees and UM Skiba. 2016. The impact of plough-

- ing intensively managed temperate grasslands on N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes. *Plant Soil* 409:1-16.
- Engel T and E Priesack. 1993. Expert-N, a building block system of nitrogen models as resource for advice, research, water management and policy. pp. 503-507. In *Integrated Soil and Sediment Research: a Basis for Proper Protection* (Eijsackers HJP and T Hamers eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Fumoto T, K Kobayashi, C Li, K Yagi and T Hasegawa. 2010. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biol.* 14:382-402.
- Gershenson A, NE Bader and WX Cheng. 2009. Effects of substrate availability on the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. *Glob. Chang. Biol.* 15:176-183.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2015. National greenhouse gas inventory report of Korea.
- Huang S, Y Sun, X Yu and W Zhang. 2016. Interactive effects of temperature and moisture on CO₂ and CH₄ production in a paddy soil under long-term different fertilization regimes. *Biol. Fertil. Soils* 52:285-294.
- Hwang W, M Park, YS Kim, K Cho, WK Lee and S Hyun. 2015. Analysis of greenhouse gas emission models and evaluation of their application on agricultural lands in Korea. *Ecol. Resil. Infrastruct.* 2:185-190.
- IPCC. 2013. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: The physical science basis. <http://www.climatechange2013.org/report/>. Accessed 3. Feb. 2017.
- Jansson PE and DS Moon. 2001. A coupled model of water, heat and mass transfer using object-orientation to improve flexibility and functionality. *Environ. Model. Softw.* 16:37-46.
- Katayanagi N, T Fumoto, M Hayano, Y Takata, T Kuwagata, Y Shirato, S Sawano, M Kajiura, S Sudo, Y Ishigooka and K Yagi. 2016. Development of a method for estimating total CH₄ emission from rice paddies in Japan using the DNDC-Rice model. *Sci. Total Environ.* 547:429-440.
- Kim SY, J Gutierrez and PJ Kim. 2016. Unexpected stimulation of CH₄ emissions under continuous no-tillage system in mono-rice paddy soils during cultivation. *Geoderma* 267: 34-40.
- Ku HH, K Hayashi, R Agbisit and G Villegas-Pangga. 2016. Effect of rates and sources of nitrogen on rice yield, nitrogen efficiency, and methane emission from irrigated rice cultivation. *Arch. Agron. Soil Sci.* DOI:10.1080/03650340.2016.1255327.
- Li C, S Frohling and TA Frohling. 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.* 97:9759-9776.
- Li C, J Cui, G Sun and C Trettin. 2004. Modeling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems. *Environ. Manage.* 33: S176-S186.
- Li H, J Qiu, L Wang, H Tang, C Li and E Van Ranst. 2010. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 135:24-33.
- Moriasi DN, JG Arnold, MW Van Liew, RL Bingner, RD Harmel and TL Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE.* 50:885-900.
- Mu ZJ, AY Huang, JP Ni, JQ Li, YY Liu, S Shi, DT Xie and R Hatano. 2013. Soil greenhouse gas fluxes and net global warming potential from intensively cultivated vegetable fields in southwestern China. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13: 566-578.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. Methods of analysis of soil and plant. NIAS. Suwon.
- Parton WJ, AR Mosier, DS Ojima, DW Valentine, DS Schimel, K Weier and AE Kulmala. 1996. Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. *Global Biogeochem. Cycles* 10:401-412.
- Pathak H, C Li and R Wassmann. 2005. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeosciences* 2:113-123.
- Rai B and AK Srivastava. 1981. Studies on microbial population of a tropical dry deciduous forest soil in relation to soil respiration. *Pedobiol.* 22:185-190.
- Raich JW and A Tufekcioglu. 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry* 48:71-90.
- Reidsma P, F Ewert, H Boogaard and K van Diepen. 2009. Regional crop modelling in Europe: The impact of climatic conditions and farm characteristics on maize yields. *Agric. Syst.* 100:51-60.
- Schimel J. 2000. Global change: rice, microbes and methane. *Nature* 403:375-377.
- Tonitto C, MB David, LE Drinkwater and C Li. 2007. Application of DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems: model calibration, validation, and uncertainty analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 78:51-63.
- U.S. Department of State. 2010. U.S. Climate Action Report. Washington DC, USA.

Received: 13 February 2017

Revised: 7 March 2017

Revision accepted: 9 March 2017