

## 우리나라 16개 지자체 벼논에서 DNDC 모델을 이용한 온실가스 배출량 평가

### Evaluation of Greenhouse Gas Emissions using DNDC Model from Paddy Fields of 16 Local Government Levels

정현철\* · 이종식 · 최은정 · 김건엽 · 서상욱 · 소규호

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Jeong, Hyun Cheol\*, Lee, Jong Sik, Choi, Eun Jung, Kim, Gun Yeob,  
Seo, Sang Uk and So, Kyu Ho

Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural  
Environment, National Academy of Agricultural Science, Wanju-gun, Korea

#### ABSTRACT

This research was conducted to estimate methane emission from paddy field of 16 local government levels using the DNDC(DeNitrification-DeComposition) model from 1990 to 2010. Four treatments used in DNDC model for methane emission calculations were ① midseason drainage with rice straw, ② mid-season drainage without rice straw, ③ continuous flooding with rice straw, and ④ continuous flooding without rice straw. Methane emissions at continuous flooding with rice straw were the highest (471 kg C ha<sup>-1</sup>) while were the lowest (187 kg C ha<sup>-1</sup>) at midseason drainage without rice straw. The average methane emission for 21 years was the highest (1,406 Gg CO<sub>2-eq.</sub>) in Jeonnam province because of its large cultivation area. Jeju province had the highest the average methane emission per unit area due to the organic content in soil.

*Key words* : DNDC, Model, Greenhouse Gas, Methane, Rice Paddy, Local Government

#### 1. 서론

벼를 재배하는 과정에서 발생하는 메탄은 주요 온실가스 중 하나로(Babu, 2006 a; Cicerone and Or-  
emland, 1988) 전세계 메탄 배출량의 약 10~15%  
가 벼논에서 배출된다(Neue, 1993). 전세계 벼 재배  
논에서의 메탄 배출량은 재배면적 증가와 함께 지  
속적으로 증가하고 있다(Gogoi *et al.*, 2005). 2011

년 우리나라에서 배출된 메탄은 29.1 백만톤 CO<sub>2-eq.</sub>  
으로 이중 약 23%인 6.8 백만톤 CO<sub>2-eq.</sub>이 농업부문  
을 통해서 배출됐다. 우리나라 농업부문에서의 메  
탄은 장내발효, 가축분뇨 처리, 작물잔사 소각 및  
벼 재배 과정 등에서 배출되는데, 이 중 벼 재배  
과정에서 가장 많은 양의 메탄이 배출된다(ME GIR,  
2013).

\* Corresponding author : E-mail: tajji152@korea.kr

벼 재배 과정에서의 메탄은 유기물이 혐기적으로 분해되는 상태에서 발생하며, 배출량의 90% 이상이 산소가 없는 혐기 토양 조건에서 벼 통기 조직을 타고 배출된다(Inubushi *et al.*, 1992). 메탄 배출량은 작기 중 물관리 방법, 유기물 시용량, 비료 시용량, 품종, 토성 등에 따라 차이가 크며(Cai *et al.*, 2001; Yagi *et al.*, 1997), 이 중 작기 중 물 관리 및 유기물 시용량 등이 메탄 배출의 주요 요인이다(Yagi and Minami, 1990).

논에서 배출되는 메탄은 기본 배출계수(작기 중 상시담수, 유기물 무시용 조건에서의 단위 면적당 일 메탄 배출량)에 작기 전 물 관리 방법, 작기 중 물 관리 방법, 유기물 시용량 및 종류, 토성이나 품종 같은 보정계수를 곱하여 일 배출계수를 산출하고, 여기에 재배일수와 재배면적을 고려하여 산정한다(GPG 2003; GPG 2000; IPCC, 2006; IPCC 1997). 기본 배출계수나 보정계수는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에서 기본 계수(Default)값을 제시하고 있으나, 이는 국가나 지역의 농업환경 특성을 반영하지 못해 불확도가 크다(Bouwman *et al.*, 2002). 따라서 IPCC는 자국의 농업환경에 맞는 국가 고유 배출계수와 보정계수를 개발하여 사용하도록 권고하고 있으며, 보다 정확한 배출량 산정을 위해 모델이나 직접 측정을 이용한 산정방법을 권고하고 있다. 최근에는 메탄, 아산화질소, 이산화탄소와 같은 온실가스 배출량 평가 및 예측을 위해 DNDC(DeNitrification-DeComposition), CASA(Carnegie Ames Stanford Approach), CENTURY, DAYCENT(a daily version of CENTURY)와 같은 많은 모델들이 개발되었으며(Babu *et al.*, 2006), 농업 부문에서 온실가스 예측에는 대표적으로 DNDC와 DAYCENT 모델을 활용한 연구가 많이 진행되고 있다(Del Gross *et al.*, 2009; Babu *et al.*, 2006 b; Pathak *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2004). DNDC는 생지화학적(Biogeochemistry) 모델로 산림이나 농경지에서 탄소와 질소의 순환과정에서 발생하는 메탄, 아산화질소 등의 미세가스의 동태를 파악하는데 사용된다(Fomoto *et al.*, 2008; Pathak *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2004). 최근 우리나라에서는 Shin *et al.* (2014)

이 농경지 토양에서 DNDC 모델을 이용한 배출량 평가 및 예측을 하였으나, 이는 특정 지역(춘천)에 대한 단기간의 평가여서 우리나라 전 지역을 대표하기에는 한계가 있다. 이번 DNDC 모델을 배출량 평가 연구는 우리나라 16개 지자체별 벼 재배 논에서 발생하는 메탄을 Bottom-up 방식을 적용하여 물 관리 방법과 유기물 시용에 따른 배출량으로 구분하여 평가하고, IPCC 기본 배출계수를 적용한 배출량 및 2012년 국가 온실가스 인벤토리와 비교 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

우리나라 벼 재배 논에서의 메탄 배출량은 1990년부터 2010년까지 21년간 16개 지자체를 대상으로 Bottom-up 방식으로 평가하였다. 배출량 비교는 IPCC 가이드라인의 방법론과 기본계수를 적용한 배출량, 2012년 국가 온실가스 인벤토리 배출량 및 DNDC 모델을 이용한 배출량을 비교 평가하였다. DNDC 모델은 물관리 방법이나 유기물 시용과 같은 메탄 배출에 영향을 미치는 주요 요인에 대한 영향을 고려하기 때문에 농경지 토양에서의 메탄 배출량을 평가하고 예측하는데 많은 이용된다. DNDC 모델에 의한 배출량은 메탄 배출에 가장 큰 영향을 미치는 작기 중 물 관리 방법과 유기물 시용 유·무를 고려하여 ① 중간낙수 + 유기물 시용(Midseason drainage with rice straw), ② 중간낙수 + 유기물 무시용(Midseason drainage without rice straw), ③ 상시담수 + 유기물 시용(Continuous flooding with rice straw), ④ 상시담수 + 유기물 무시용(Continuous flooding without rice straw)의 4가지 처리로 구분하여 산정하였다. 메탄 배출량을 이산화탄소로 환산하기 위한 지구온난화지수(Global Warming Potential: GWP)는 IPCC 가이드라인에 따라 21을 적용하였다.

### 2.1 논토양 메탄 배출량

기본 계수를 적용한 논토양 메탄 배출량 산정은 1996 IPCC 가이드라인 방법론과 2000, 2003 GPG

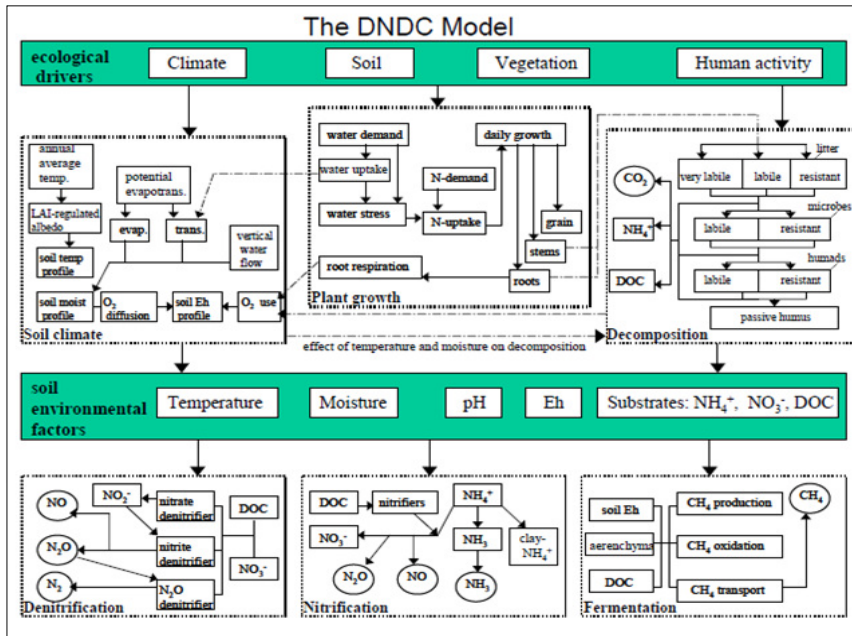


Fig. 1. Structure of the DNDC model (<http://www.dnnc.sr.unh.edu>).

를 활용하였고, 2012년 국가 온실가스 인벤토리 배출량 산정은 2012 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침 방법론을 적용하였다. DNDC는 생지화학(Biogeochemistry) 모델로 생태계(Ecosystem)에서의 질소(N)와 탄소(C)의 동태를 여러 매개변수(Parameter)를 기반으로 평가·예측할 수 있다(Babu *et al.*, 2006). 컴퓨터 시뮬레이션에 기반을 둔 DNDC 모델은 Fig. 1과 같이 토양 환경인자인 온도(Temperature), 수분(Moisture), pH, 산화환원전위(Eh) 등의 자료와 기후(Climate), 토양(Soil), 식생(Vegetation), 인간활동(Human activity) 등을 결합해 작물수량과 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> 배출량을 예측할 수 있는 모델로 이번 배출량 평가에서는 DNDC 9.3 버전을 활용하였다.

## 2.2 활동자료

기본적으로 국가 및 지자체 단위에서 논토양 메탄 배출량을 평가하기 위해서는 벼 재배면적, 작기중 물 관리 방법, 유기물 시용량 등의 활동자료(Activity data)가 필요하다. 이를 위해 벼 재배면적은 농림축산식품부(구 농림수산식품부)의 농림수산

식품통계연보를 활용하였고(MIFAFF, 1995, 2000, 2005, 2010, 2012), 연도별 벼 작기중 물관리 방법 및 유기물 시용량은 2013 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침을 활용하였다. DNDC 모델 구동을 위한 1990년부터 2010년까지 16개 지자체별 기상자료(최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량)는 기상청에서 제공하는 자료를 활용하였다. 우리나라 토양의 토성별 용적밀도는 Hur *et al.* (1993)의 연구 결과를 활용하였고, 지역별 토양 pH, 유기물 함량 등의 자료는 국립농업과학원 농업환경변동조사 자료를 활용하였다(Kang *et al.*, 2012).

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 DNDC 모델을 이용한 16개 지자체별 벼 재배 논에서의 메탄 배출량 변화 추이(1990~2010)를 나타낸다. Bottom-up 방식으로 1990년부터 2010년까지 분석한 결과, 6개 지역(전남, 충남, 전북, 경기, 경북, 경남)에서 우리나라 논 메탄 배출량의 약 80%를 차지하는 것으로 분석되었다. Fig. 3은 1990년부터 2010년까지 21년간 DNDC 모델에

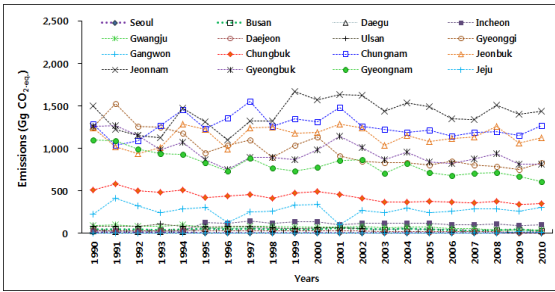


Fig. 2. Changes of methane emission from 16 provinces using DNDC model from 1990 to 2010.

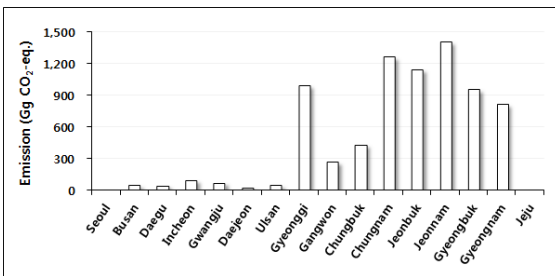


Fig. 3. Average methane emission from rice paddy at 16 provinces using DNDC model.

의한 16개 지자체별 메탄 평균 배출량을 나타낸다. 평균 배출량은 16개 지자체 중 전남지역에서 1,406 Gg CO<sub>2</sub>-eq.으로 가장 많았고, 그 다음이 충남 1,263 Gg CO<sub>2</sub>-eq., 전북 1,145 Gg CO<sub>2</sub>-eq., 경기 994 Gg CO<sub>2</sub>-eq. 순으로 나타났는데, 이는 전남지역이 우리나라에서 가장 많은 벼 재배면적을 갖고 있기 때문이다. 가장 낮은 배출량을 나타낸 곳은 서울지역으로 국가 전체 배출량에는 큰 영향을 미치지 않았다.

단위 면적당 지역별 메탄 평균 배출량은 제주도가 393 kg C ha<sup>-1</sup>로 가장 많았고, 그 다음이 부산, 대구, 울산 순이었다. 가장 적은 배출량을 나타낸 곳은 강원도로 단위 면적당 평균 배출량은 224 kg C ha<sup>-1</sup>이었다(Fig. 4). 제주도 지역에서 단위면적당 메탄 배출량이 높았던 이유는 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 토양 유기물 함량이 다른 지역보다 높았기 때문인 것으로 분석되었다. 제주도 지역에서 단위 면적당 메탄 평균 배출량이 가장 높았으나 벼 재배면적이 적어 국가 전체 배출량에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 전반적으로 우리

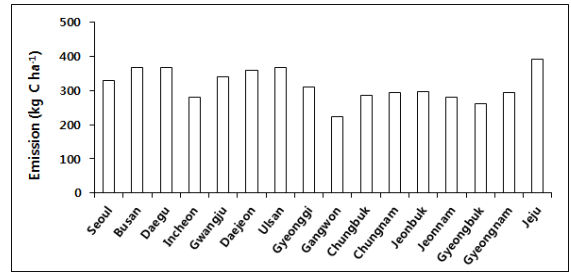


Fig. 4. Average methane emission per unit area as the provinces using DNDC model in rice paddy.

나라 지역에서 단위면적당 메탄 평균 배출량이 강원이나 중부지방보다 남부지방에서 높은 이유 또한 토양 유기물 함량이 전남이나 경남 지방에서 높았기 때문이다.

16개 지자체에 대해 DNDC 모델을 이용하여 벼 재배 논에서 영농 방법별 메탄 평균 배출량을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 4가지 영농 방법에 따른 단위면적당 메탄 평균 배출량을 산정한 결과, 벧짚을 시용한 상시담수 논에서 21년간 평균 배출량이 471 kg C ha<sup>-1</sup>으로 가장 많았고, 벧짚을 시용한 중간낙수 논에서 335 kg C ha<sup>-1</sup>, 벧짚을 무시용한 상시담수 논에서 270 kg C ha<sup>-1</sup>, 벧짚을 무시용한 중간낙수 논에서 187 kg C ha<sup>-1</sup> 순으로 나타났다. 벧짚을 시용한 상시담수 처리에서는 부산, 대구, 울산, 대전 지역에서 배출량이 높았으나, 그 외 처리의 경우는 제주도 지역에서 배출량이 가장 많은 것으로 분석되었다. 논에서 메탄 배출에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 작기 중 물 관리 방법과 유기물 시용으로, 국내 연구의 경우 Shin *et al.* (2003)은 작기 중 중간낙수만으로 약 44%의 온실가스 감축 효과가 있다고 하였고, 국외의 경우 Yagi and Minami (1990)도 약 48%의 온실가스 감축 효과가 있다고 하였다. 이번 DNDC 모델을 이용한 메탄 배출량 평가 연구에서도 벧짚을 무시용한 상시담수 논보다 간단관개 논에서 메탄 배출이 약 41% 줄어든 것으로 분석되어 Shin *et al.* (2003)의 챔버를 이용한 배출량 평가 연구와 유사한 결과를 보였다. 또한, 벧짚을 시용하고 상시담수를 한 논보다 벧짚을 무시용하고 간단관개를 한 논에서 메탄 배출이

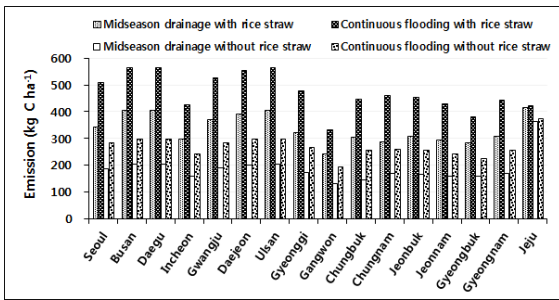


Fig. 5. Changes of methane emission from 16 provinces by cultivation practices using DNDC model from 1990 to 2010.

2배 이상 줄어드는 것으로 분석되었는데, 이는 IPCC GPG 2003의 유기물 보정계수 2.5와 비슷한 경향을 보였다(IPCC GPG, 2003).

IPCC 기본계수를 적용한 배출량, 2012년 농업부문 국가 온실가스 배출량(ME GIR, 2012) 및 DNDC 모델을 적용한 배출량 변화는 Fig. 6과 같다. 기본계수를 적용한 배출량과 2012년 농업부문 국가 온실가스 배출량은 작물 재배면적 감소와 간단관개 면적 증가에 따라 지속적으로 감소하고 있으나, 모델에 의한 배출량은 재배면적 감소에도 불구하고 감소폭이 크지는 않았다. 배출량 산정 방법론에 따른 메탄배출량은 2012 국가 인벤토리 산정 방법에 의한 배출량이 가장 높았는데, 이는 메탄 배출량 산정 시 기본 메탄 배출계수를 2004년의 국내 연구

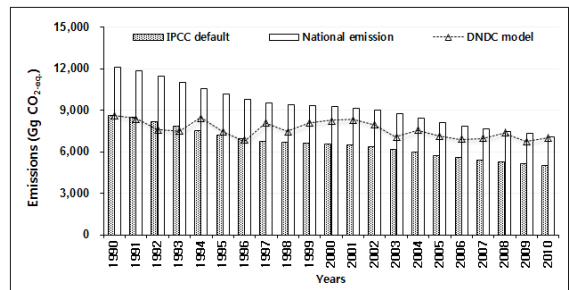


Fig. 6. Changes of methane emission according to calculation methodology 1990 through 2010.

결과인  $2.38 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$  계수를 적용했기 때문이다. 이와 반대로 IPCC 기본계수를 이용한 배출량의 경우, 일 메탄 배출계수로  $1.30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 을 적용했기 때문에 상대적으로 배출량은 더 낮았다.

Table 1은 16개 지자체중 메탄 배출량이 가장 높았던 전남 지역을 대상으로 처리에 따른 메탄 배출량에 영향을 미치는 요인들을 분석한 표이다. DNDC 모델에 의한 메탄 배출량은 작물 재배면적 감소에도 1990년과 비교해 큰 감소가 없었는데, 이는 상대적으로 토양 중 유기물 함량 증가, 작물의 질소 흡수량 증가, 토양 중  $\text{CO}_2$  함량 및 물 관리 등과 관련이 높은 것으로 분석되었다. Zhang *et al.* (2009)도 DNDC 모델을 이용한 메탄 배출량 평가에서 뿌리 작토층(0~10 cm) 유기물 함량, 토양 중  $\text{CO}_2$  함량, 물 관리(상시담수와 간단관개) 및 작물

Table 1. Correlation coefficient between methane emission and parameter by Pearson's method.

	Midseason drainage with rice straw	Midseason drainage without rice straw	Continuous flooding with rice straw	Continuous flooding without rice straw
Soil organic matter (0~10 cm)	0.6912***	0.7632***	-0.2219	-0.1680
Soil organic matter (10~20 cm)	-0.6591***	-0.7480***	-0.8486***	-0.8225***
Crop N uptake	0.6499***	0.7177***	0.8351***	0.8286***
Irrigation	-0.6216***	-0.6937***	-0.8252***	-0.7983***
Soil $\text{CO}_2$	-0.4606**	-0.5133**	-0.8548***	-0.8187***
Precipitation	0.1476NS	0.4856NS	0.3261NS	0.2917NS

Note: \*, \*\*, \*\*\* are significant at the 10%, 5%, 1%, respectively.

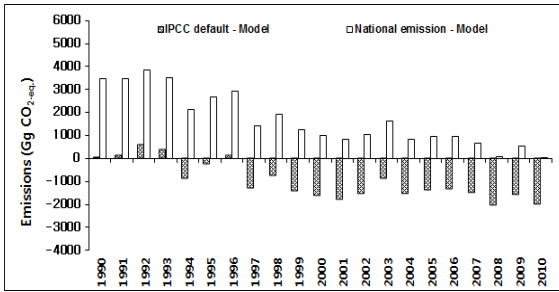


Fig. 7. Comparison of methane emission difference (between IPCC default and model, between national emission and model) according to calculation methodology 1990 through 2010.

의 N 흡수와 관련된 작물 생장 등이 메탄 배출에 직접적인 영향을 미친다고 하였다. 그러나 Shin *et al.* (2014)은 DNDC 모델을 이용한 논토양 메탄 배출량 평가에서 강우량이 많았던 해에 메탄 배출량이 가장 낮았다고 하였는데, 이번 연구에서는 강우량과의 상관성은 높지 않은 것으로 분석되었다(Table 1). Shin *et al.* (2014)도 짧은 기간(10년) 동안의 배출량 평가로 강우량과의 상관성을 분석하는 데는 문제가 있다고 하였다. Fig. 7은 DNDC 모델에 의한 배출량과 IPCC 기본계수 및 국가 인벤토리 보고서 배출량과의 메탄 배출량 차이를 나타낸다. 국가 인벤토리 산정 방법론에 의한 메탄 배출량은 DNDC 모델에 의한 배출량보다 1992년 최대 3,858 Gg CO<sub>2</sub>-eq.까지 많았고, 이후 배출량 차이는 점차 줄어드는 경향을 보였다. 반면, IPCC 기본계수를 사용하여 산정한 메탄 배출량은 모델에 의한 배출량보다 1994년 이후 배출량 차이는 더 커지는 것으로 분석되었다. 이러한 배출량 차이는 또한 모델에 의한 배출량 산정 방법은 토양 중 유기물 함량 증가, 작물의 질소 흡수량 증가 및 물 관리 등이 반영되었기 때문인 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

이번 연구는 1990년부터 2010년까지 21년간 DNDC 모델을 이용해 우리나라 16개 지자체별 벼 재배 논에서의 메탄 배출량을 산정하고, IPCC 기본계수를 적용한 배출량 산정 방법 및 2012 국가 인

벤토리 상의 배출량과 비교 평가하고자 하였다.

지자체별 메탄 배출량 산정 결과, 21년간 평균 배출량은 전남지역에서 가장 높았고, 단위면적당 메탄 평균 배출량은 제주도 지역에서 가장 높았다. 전남지역에서 배출량이 가장 높았던 이유는 재배 면적이 가장 높았기 때문이고, 제주도 지역에서 재배 면적당 배출량이 가장 높았던 이유는 메탄 배출에 영향을 미치는 토양 유기물 함량이 높았기 때문인 것으로 분석되었다. 메탄 배출에 영향을 미치는 작기 중 물 관리 방법과 유기물 시용 유·무 등 4개 처리로 구분하여 배출량을 산정한 결과, 상시담수 유기물 시용 처리에서 단위 면적당 메탄 배출량이 가장 높았고, 간단관개 유기물 무시용 처리에서 배출량이 가장 낮았다. IPCC 기본계수를 이용한 배출량 산정과 2012 국가 인벤토리 상의 배출량 산정 결과는 작물 재배면적에 절대적인 영향을 받아 재배면적 감소에 따라 메탄 배출량도 감소하였다.

DNDC 모델에 의한 온실가스 배출량 산정 방법은 기본계수나 국가 고유 배출계수 적용보다 메탄 배출량에 영향을 미치는 많은 파라미터(토양 유기물 함량, CO<sub>2</sub> 함량, 작물 질소 흡수, 관개 등)를 반영하였기 때문에 배출량 차이가 발생한 것으로 분석되었다. 따라서 DNDC 모델에 의한 메탄 배출량 평가는 기본 계수나 활동자료 외에 배출량에 영향을 미치는 여러 파라미터를 반영하기 때문에 산정 시 발생하는 불확도를 저감하는데 큰 의미가 있다. 또한, 기후변화에 따른 농업부문 온실가스 배출량 예측 및 감축잠재량 산정 등에도 그 활용 가치가 높다고 하겠다. 따라서 향후 기본계수나 국가 고유계수를 적용하는 배출량 산정이나 단기적인 배출량 평가 연구보다는 우리나라 농업환경을 최대한 반영할 수 있는 장기 모니터링을 통한 파라미터 확보와 이를 활용한 모델 연구가 필요하다. 또한, 모델을 이용한 배출량 산정 시 배출량에 영향을 미치는 요인별 분석이 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

#### 사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ01003001)의 지원에 의해 이

루어진 것임.

## References

- Babu JY, Li C, Frolking S, Nayak DR, Adhya TK. 2006a. Modelling of methane emissions from rice-based production systems in India with the denitrification and decomposition model: Field validation and sensitivity analysis, *Current Science* 89:1904-1912.
- Babu JY, Li C, Frolking S, Nayak DR, Adhya TK. 2006b. Field validation of DNDC model for methane and nitrous oxide emissions from rice-based production systems of India. *Nut Cycl in Agroecosystem* 74:157-174.
- Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. 2002. Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: Summary of available data, *Global Biogeochem. Cycles* 16:1058, doi:10.1029/2001GB001811.
- Cai Z, Tsuruta H, Rong X, Xu H, Yuan Z. 2001. CH<sub>4</sub> emissions from rice paddies managed according to farmer's practice in Hunan, China. *Biogeochemistry* 56:75-91.
- Cicerone RJ, Oremland RS. 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles* 2:299-327.
- Del Grosso SJ, Ojima DS, Parton WJ, Stehfest E, Heistemann M, DeAngelo B, Rose S. 2009. Global scale DAYCENT model analysis of greenhouse gas emissions and mitigation strategies for cropped soils. *Global and Planetary Change* 67: 44-50.
- 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. *Global Change Biology* 14:382-402.
- Gogoi N, Baruah KK, Gogoi B, Gupta PK. 2005. Methane emission characteristics and its relations with plant and soil parameters under irrigated rice ecosystem of northeast India. *Chemosphere* 59: 1677-1684.
- GPG. 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories, Penman J, Kruger D, Galbally I, Hiraishi T, Nyenzi B, Emmanuel S, Buendia L, Hoppaus R, Martinsen T, Meijer J, Miwa K, Tanabe K. (Eds). IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- GPG. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F. (Eds). IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- Hur BK, Kim ZH, Kim YS, Park YS. 1993. Relationship of soil particle size and organic matter content to the bulk density in paddy soil. *Kor J Soil Sci Fert* 26:155-159.
- Inubushi K, Muramatsu Y, Umerayasi M. 1992. Influence of percolation on methane emission from flooded paddy soil. *Jpn J Soil Sci Plant Nutr* 63: 184-189.
- IPCC. 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, J.T. Houghton *et al*, IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Kang SS, Roh AS, Choi SC, Kim YS, Kim HJ, Choi MT, Ahn BK, Kim HW, Kim HK, Park JH, Lee YH, Yang SH, Ryu JS, Jang YS, Kim MS, Sonn YK, Lee CH, Ha SG, Lee DB, Kim YH. 2012. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea. *Kor J Soil Sci Fert* 45: 968-972.
- Li C, Mosier A, Wassmann R, Cai Z, Zheng X, Huang Y, Tsuruta H, Boonjawat J, Lantin R. 2004. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling, *Global Biogeochemical Cycles* 18, Gb1043. doi:10.1029/2003GB002045.

- MIFAFF. 1995, 2000, 2005, 2010, 2012. Food, agricultural, forestry and fisheries statistical yearbook. Ministry for Food, Agriculture, Forestry, and Fisheries. Seoul Korea.
- Ministry of Environment, Greenhouse Gas Inventory and Research Center(GIR). 2012. 2012 National greenhouse gas inventory report of Korea.
- Ministry of Environment, Greenhouse Gas Inventory and Research Center(GIR). 2013. Guideline for MRV(Measurement, Reporting and Verification) of national greenhouse gases statistics.
- Neue HU. 1993. Methane emission from rice fields. *Biosciences* 43:466-474.
- Pathak H, Li C, Wassmann R. 2005. Greenhouse gas emissions from Indian rice field: calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeosciences* 2:113-213.
- Shin YK, Kim GY, Ahn JW, Koh MH, Eom KC. 2003. Effect of rice vegetation and water management on turnover of incorporated organic materials to methane in Korean paddy, soil. *Kor J Soil Sci Fert* 36:50-56.
- Shin MN, Jang JJ, Won CH, Kum DH, Jung YH, Lee SI, Lim KJ, Choi JD. 2014. Simulation of GHG emission from paddy field using DNDC model. *J of the Kor S of Agri Engineers* 56: 47-57.
- Yagi K, Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci Plant Nutr* 36:599-610.
- Yagi K, Tsuruta H, Minami K. 1997. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation. *Nutr Cycles Agroecosystems* 49:213-220.
- Zhang L, Yu D, Shi X, Weindorf DC, Zhao L, Ding W, Wang H, Pan J, Li C. 2009. Simulation of global warming potential(GWP) from rice fields in the Tai-Lake region, China by coupling 1:50,000 soil database with DNDC model. *Atmospheric Environment* 43:2737-2749.