

토양 온실가스 배출 예측 모델 분석 및 국내 농경지 적용성 평가

Analysis of Greenhouse Gas Emission Models and Evaluation of Their Application on Agricultural Lands in Korea

황원재 · 박민석 · 김용성 · 조기종 · 이우균 · 현승훈*

고려대학교 환경생태공학부

Wonjae Hwang, Minseok Park, Yong-Seong Kim, Kijong Cho, Woo-Kyun Lee and Seunghun Hyun*

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

Received 12 May 2015, revised 22 May 2015, accepted 23 June 2015, published online 30 June 2015

ABSTRACT: Greenhouse gas (GHG) emission from agricultural lands is recognized as one of important factors of global warming. The objective of this short communication was to evaluate the applicability of different soil GHG emission prediction models on agricultural systems in Korea. Four models, namely, DNDC, DAYCENT, EXPERT-N and COUP, were selected and the basic structure (e.g., components and sub-model), input variables, and output variables were compared. In particular, the availability and compilation of essential input variables were assessed. Major input variables needed for operating these predictive models were found to be available through database systems established by national organizations such as the Korea Meteorological Administration, the Korean Soil Information System, and the Rural Development Administration. However, in order to apply these models in Korea, it was necessary to calibrate and validate each of the models for the domestic landscape settings and climate conditions. In addition, field data of long-term monitoring of GHG emission from agricultural lands are limited and therefore should be measured.

KEYWORDS: Agricultural Land, COUP, DAYCENT, DNDC, EXPERT-N, Greenhouse Gas Model

요약: 농경지 토양에서 배출되는 온실가스는 기후변화와 지구온난화에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 해외에서 개발되어 이용되고 있는 DNDC, DAYCENT, EXPERT-N, COUP 모델의 기본적인 구조와 입력, 출력 인자를 분석함으로써 국내 적용 가능성을 평가하였으며, 현재 국내의 여건에서 각 모델의 구동에 요구되는 필수 입력 인자의 형태와 확보 가능성에 대해 조사하였다. 모델 구동의 필수 인자는 기상청, 한국토양정보시스템, 농촌진흥청 등의 국내 관계 기관의 자료를 통해 확보할 수 있다. 하지만 실제 국내 적용을 위해서는 국내 지형과 기후 조건을 반영하고 모델의 보정과 검증을 통해 모델을 교정할 필요가 있다. 또한, 다양한 조건의 농경지를 대상으로 한 장기적인 현장 온실가스 발생 모니터링 자료 구축이 필요하다.

핵심어: 농경지, COUP, DAYCENT, DNDC, EXPERT-N, 온실가스모형

1. 국내 토양 온실가스 배출 예측 모델의 필요성

기후변화에 영향을 미치는 주요 온실가스 (green-

house gas)는 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O)등 이 있으며, 전 지구적 차원에서 메탄과 아산화질소의 배출량 중 농업 부문이 차지하는 비율은 각각 40%와 62%로, 농업과 관련된 인간 활동이

*Corresponding author: soilhyun@korea.ac.kr

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가장 큰 배출원으로 평가된다 (Anand 2013). 온실가스로 인해 지구 평균기온과 강수량이 지속해서 상승하면 (IPCC 2013), 토양 미생물에 의한 유기물 분해가 촉진되어 온실가스 배출량이 증가하며 (Conant et al. 2011), 이로 인해 기온 상승은 더욱 가속화될 가능성이 있다. 따라서 모델을 통한 미래 온실가스 배출량 변화를 예측하고 기후변화에 대한 적응 방안을 모색해야 한다.

해외에서는 DNDC (Denitrification and Decomposition), DAYCENT (The daily Century), COUP (Coupled heat and mass transfer), EXPERT-N 모델 등 많은 토양 온실가스 배출 예측 모델이 연구 및 개발되어 온실가스 배출량 산정에 활용되고 있다 (Li et al. 1992, Engel and Priesack 1993, Parton et al. 1998, Jansson and Moon 2001). 하지만 해외에서 개발된 토양 온실가스 배출 예측 모델을 국내에 도입하여 활용하기 위해서는 몇 가지 문제 해결이 선행되어야 한다. 즉, 앞서 제시된 모델들은 토지이용, 토양피복 (농경지, 산림 등), 입·출력 인자의 종류와 형태 등이 모두 다르다. 따라서 우리나라에 맞는 모델을 선택하기 위해서는 온실가스 배출 예측 모델에 대한 기초 조사와 우리나라에서 확보 가능한 입력 인자 탐색을 토대로 모델을 선택해야 한다. 또한, 우리나라는 특이한 지형 및 기후 조건으로 인한 미세 기후 및 토양환경 조건의 차이가 크고, 소규모 농업이 주를 이루고 있다. 하지만 해외에서 개발된 모델들은 대규모 농업환경을 기초로 만들어 졌기 때문에 국내 실정을 반영할 수 있도록 모델의 재조정이 필요하다.

현재까지 국내에서는 배추, 벼 등 소규모 농경지 토양에서 배출되는 온실가스를 정량 한 일부 연구가

수행된 바 있다 (Kim and Na 2011). 또한, 모델 적용 사례로서 Shin et al. (2014)은 DNDC 모델을 이용해서 논 토양을 대상으로 2020~2080년 사이의 온실가스 배출량 모의하였는데, 대기 온도가 11.72°C에서 14.63°C로 상승하면 국내 논 토양에서 배출되는 온실가스에 의한 net global-warming potential ($t \text{ CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 이 17.0에서 20.2로 증가함을 보고하였다. 현재까지 국내에 토양 온실가스 배출 예측 모델의 적용 사례는 소수의 현장 측정을 바탕으로 분석한 결과로서 정확한 온실가스 배출량을 비교 또는 검증할 수 없었다. 따라서 농업 활동으로 인해 토양에서 배출되는 온실가스를 예측할 수 있는 모델을 비교 분석하고, 국내에서 사용 할 수 있는 입력 인자의 확보 가능성을 고찰하여, 국내 적용성 및 국내 조건에 맞는 모델 개발 가능성에 대한 검토가 필요하다.

2. 대표적인 토양 온실가스 배출 예측 모델

2.1 온실가스 배출 예측 모델의 구성, 구조 및 기능 비교

온실가스 배출 예측 모델의 국내 적용성 평가를 위해 검토한 모델은 DNDC (Li et al. 1992), EXPERT-N (Engel and Priesack 1993), DAYCENT (Parton et al. 1998), COUP (Jansson and Moon 2001)이다. 4개 모델에 대한 기초 정보와 기본적인 기능에 대하여 Table 1에 비교 분석하였다. 모델의 기본 구조와 하위모델에 대한 모식도는 Giltrap et al. (2010), Parton et al. (1998), Eckersten et al. (1998)의 결과에 보고

Table 1. The structure and functionality of four greenhouse gas emission models.

Property	DNDC (Li et al. 1992)	DAYCENT (Parton et al. 1998)	EXPERT-N (Engel and Priesack 1993)	COUP (Jansson and Moon 2001)
General descriptions	Ecosystem biogeochemistry model	Ecosystem biogeochemistry model	Nitrogen turnover models	Dynamic ecosystem model
Scale*	F, R	F, R, N	F	F, R
Country developed	USA	USA	Germany	Sweden
Release year	1991	1998	1999	2000
Country applied	Australia, Canada, China, Europe, India, USA and New Zealand	Australia, Canada, Europe, USA and New Zealand	Canada, Germany, UK and USA	Finland, Sweden, Germany, Norway and Vietnam

* F, field; R, regional; N, national.

된 바 있다.

DNDC 모델은 농업 생태계에서 일 단위로써 (daily time step) 탄소와 질소의 순환을 바탕으로 구성된 생지화학적 모델이다 (Li et al. 1992). 이 모델은 농경지 토양에서 CO₂, CH₄, N₂O 등의 주요 온실가스 배출량을 예측할 수 있는데, 기본적으로 토양 유기물의 분해와 작물의 뿌리 호흡으로 인한 CO₂ 배출, 토양의 혐기 조건으로 인한 CH₄ 배출 및 질산화 (nitrification)와 탈질화 (denitrification) 반응을 통한 N₂O 배출을 모의한다.

DAYCENT (Parton et al. 1998)는 저장량 개념으로 토양 탄소와 질소의 거동을 예측하는 CENTURY (Parton et al. 1994) 모델에 추가적으로 N₂O와 CH₄ 배출량을 예측할 수 있도록 변형된 모델이다. 본 모델은 작물의 성장, 수분의 흐름 (water flow), 질소 기체의 유동 (N gas flux) 등 여러 가지 하위모델을 통해 토양환경 (pH, 유기물 등), 기후환경 (강우, 온도 등) 또는 인간의 인위적 활동 (비료, 경운 등) 등에 따른 탄소와 질소의 거동을 예측하는 모델이다.

EXPERT-N (Engel and Priesack 1993)은 탄소, 질소, 물의 동력학 (dynamics)에 대하여 토양-식물-기상 시스템을 통합하여 일 단위로 구동되는 모델이다. 분해 (decomposition), 무기화 (mineralization), 부동화 (immobilization) 작용과 같은 토양 탄소와 질소의 이동은 LEACHN (Hutson and Wagenet 1992) 모델, 탈질화 반응은 SOILN (Johnsson et al. 1987) 모델에 따라 구동된다.

COUP 모델 (Jansson and Moon 2001)은 토양, 식물 및 기상에서 열과 물질의 이동을 결합한 동적 생태계 (dynamic ecosystem) 모델로, 여러 개의 층으로 나누어진 토양에서 용존유기탄소 (dissolved organic carbon)와 질소, 물, 열의 흐름 등을 모의한다. 온실가스 배출에 관련된 토양 유기물은 빠른 전환 (turnover) 속도를 지닌 신선한 유기물 (litter)과 전환속도가 느린 부식 (humus) 저장고 (pool)로 구성되며, 각 저장고의 분해속도는 토양 온도, 습도에 따라 일차반응식을 통해 계산된다 (Wua et al. 2011).

2.2 온실가스 배출 예측 모델의 입·출력 인자

앞서 살펴본 4 개 모델 (DNDC, DAYCENT, EXPERT-N, COUP)을 구동하는 데 있어 필요한 입력 인자는

각 모델의 성격에 따라 형태 및 종류가 다양하다. 그 중 온실가스 배출에 영향을 미치는 모델의 입력 인자에 대해서 크게 다섯 가지 부문 (시간 단위, 기후, 토양, 작물 및 농업관리)으로 나누어 조사하였다. 또한, 4 개 모델에서 세부 입력 인자의 필요 유무와 입력 인자의 국내 확보 가능성을 조사하여 Table 2에 나타내었다. 4 개 모델 별로 필요한 입력 인자의 종류가 달랐으나, 특이적으로 DNDC 모델 구동을 위해서는 Table 2에 제시된 모든 입력인자가 필요했다. 입력 인자의 확보 가능성에 있어서, 토양 용적비도, 포장 용수량, 무기태질소 함량 (NO₃⁻, NH₄⁺), 바이오매스 비율을 제외한 모든 입력 인자를 국내 기관 (기상청, 한국토양정보시스템, 농촌진흥청, 한국농촌경제연구원)에서 확보할 수 있다.

4 개 모델들의 출력 인자는 종류에 따라 온실가스 인자 (CO₂, CH₄, NO, N₂O flux), 토양 인자 (evapotranspiration, soil temperature, soil moisture, total C, N stock, SOM, NH₄⁺, NO₃⁻ contents, NO₃⁻ leaching), 작물생산량 인자 (crop yields)로 구분하여 Table 3에 제시하였다. 4 개 모델 모두 유사한 출력 인자를 갖고 있었지만, EXPERT-N 과 COUP 모델은 총 탄소함량과 총 질소함량을 출력 인자로서 도출하지 않는 것이 특이한 점이다.

3. 모델의 국내 적용 가능성

해외에서 개발된 모델을 국내에서 적용하기 위해서는 1) 온실가스 배출 예측 모델을 구동하는데 필수적으로 영향을 미치는 입력 인자에 대한 국내 확보 가능성, 2) 모델을 구성하고 있는 이론식과 경험식의 특정 매개변수에 대한 보정, 3) 마지막으로 실제 현장에서 측정된 값과 보정된 모델의 결과를 비교하는 검증 작업이 필요하다. 모델을 구동하는 데 일차적으로 필요한 입력 인자 (Table 2)는 국내 여러 기관의 자료를 통해 확보할 수 있으며, 이를 통해 모델의 구동은 가능할 것으로 판단된다. 하지만 실제 국내에 온실가스 배출 예측 모델을 적용하기 위해서는 다양한 국내 기후, 토양환경 및 농업환경에 따른 장기적인 온실가스 배출량 측정을 기초로 모델의 보정 및 검증 작업이 뒷받침되어야 국내 적용이 가능할 것이다.

Table 2. Input variables of four greenhouse gas emission models reviewed in this study.

Category	Input variables	DNDC (Li et al. 1992)	DAYCENT (Parton et al. 1998)	EXPERT-N (Engel and Priesack 1993)	COUP (Jansson and Moon 2001)	Data source in Korea
Model time-step	Day (D) or Hour (H)	D	D	D	D, H	
Climate	Air temperature	O	O	O	O	KMA (2015)
	Precipitation	O	O	O	O	KMA (2015)
	Humidity	O		O	O	KMA (2015)
	Wind speed	O			O	KMA (2015)
	Radiation	O	O		O	KMA (2015)
Soil	Texture	O	O	O	O	KSIS (2015)
	Bulk density	O	O	O	O	NA*
	Field capacity	O	O	O	O	NA
	pH	O	O	O	O	KSIS (2015)
	Organic C contents	O	O	O	O	KSIS (2015)
	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ contents	O		O	O	NA
Crop	Biomass production	O	O	O		KREI (2015)
	Biomass fraction	O	O	O	O	NA
Management	Land use	O	O		O	KSIS (2015)
	Fertilizer application	O	O	O	O	RDA (2015)
	Organic amendment	O	O	O		RDA (2015)
	Irrigation	O	O	O	O	RDA (2015)
	Flooding	O	O			RDA (2015)
	Tillage	O	O	O		RDA (2015)

*NA, not available.

Table 3. Output variables of four greenhouse gas emission models.

Output variable	DNDC (Li et al. 1992)	DAYCENT (Parton et al. 1998)	EXPERT-N (Engel and Priesack 1993)	COUP (Jansson and Moon 2001)
CO ₂ flux	O	O	O	O
CH ₄ flux	O	O	O	O
NO flux	O	O	O	O
N ₂ O flux	O	O	O	O
Evapotranspiration	O	O	O	O
Soil temperature	O	O	O	O
Soil moisture	O	O	O	O
Total C stock	O	O	X*	X
Total N stock	O	O	X	X
Soil organic matter content	O	O	O	O
NH ₄ ⁺ and NO ₃ ⁻ content	O	O	O	O
NO ₃ ⁻ leaching	O	O	O	O
Crop yields	O	O	O	O

* X, not available.

4. 한계점 및 제언

온실가스 배출 예측 모델을 국내에 적용하기 위해서는 우선적으로 모델의 적용 규모 (scale)를 선택해야 한다. 일반적으로 여러 온실가스 배출 예측 모델에서 사용하고 있는 모델의 지리적 규모의 종류는 포장 (field), 지역 (region), 국가 (nation) 수준이며, 모델에 따라 구동 가능한 공간적 규모가 다르다 (Table 1). 포장 수준은 실제 특정 포장에서 실험을 통해 조사한 입력 인자를 바탕으로 모델이 구동되며, 지역, 국가 수준은 지리정보시스템을 기반으로 주제도, 위성자료 등의 입력 인자를 이용해서 모델을 구동하는 형태이다. 국내 적용에 있어서 적절한 모델의 수준을 선택하기 위해서는 현재 국내에서 확보 가능한 입력 인자의 규모와 같은 모델의 수준을 선택해야 한다. 하지만 국내 기관의 자료는 규모가 다양하다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 다양한 규모를 가지고 있는 국내기관의 자료를 모델에 맞게 조정할 필요가 있다.

조사된 입력 인자 중 대부분의 토양 인자는 한국토양정보시스템 (K SIS 2015)을 통해 얻을 수 있는데, 우리나라는 여름 장마철에 집중된 강우 패턴으로 인해 토사의 유출이 많아 토양 인자의 변이가 크다. 하지만 한국토양정보시스템에서 실제 매년 토양 인자를 수집하는데 한계가 있고, 실제로 국내의 모든 토양에 대한 정보를 제공하고 있지 않다. 농업관리 인자는 농촌진흥청 (RDA 2015)에서 제공하고 있는 정보를 대표 값으로 입력할 수 있다. 하지만, 이 정보는 추천 사항일 뿐 강제 사항이 아니며, 실제 농업 종사자들이 추천 사항 그대로 농업을 수행하는 데 한계가 있다. 따라서 다양한 토양 및 농업관리 인자와 온실가스 배출의 상관관계에 대한 연구를 수행함으로써 각 인자에 대한 일반화가 필요하다.

장기간 여러 환경 조건에 따른 온실가스 배출을 모니터링 한 결과는 예측 모델을 검증하고 보정할 때 중요한 자료로 사용된다. 해외 여러 연구 사례에서도 최소 1년 이상의 일 단위 온실가스 현장 측정값과 모델 예측값을 비교하여 모델 검·보정에 활용한 바 있다 (Deng et al. 2013). 하지만, 국내에서는 현재까지 일 단위로 국내 농경지 토양에서 온실가스 배출을 장기적으로 모니터링 한 연구는 이루어지지 않고 있다.

따라서 모델의 보정 및 검증을 위한 장기간의 지속적인 일 모니터링을 통한 자료 구축이 선행되어야 한다.

5. 결론

본 단보에서는 대표적으로 사용되고 있는 토양 온실가스 배출 예측 모델에 대하여 조사하고 입·출력 인자 및 확보 가능성, 향후 모델의 국내 적용 가능성에 대하여 평가하였다. 모델의 입력 인자는 시간 단위, 기상, 토양, 작물, 농업관리 인자로 나눌 수 있었으며, 현재 국가 기관에서 구축된 DB 통해서 많은 입력 인자를 확보할 수 있다. 하지만 용적밀도, 토양 무기 질소 함량, 바이오매스 비율 등 확보가 어려운 입력 인자에 대해서는 입력 인자를 일반화 하는 선행 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 조사된 입력 인자는 수준이 다양하고 우리나라 전체를 모사할 수 없다는 한계를 보였다. 따라서 실질적인 모델 구동을 위해서는 국내 실정에 맞는 모델의 수준을 선택하고 이에 따른 입력 인자의 조정이 필요하다. 4 개 모델의 출력 인자는 온실가스 배출, 토양환경, 작물 생산량의 변화에 대한 결과를 도출할 수 있다. 하지만 실제 모델의 국내 적용을 위해서 출력 인자의 정확성 평가를 위한 매개변수의 보정과 모델의 검증이 필요하다. 따라서 여러 가지 농경지 토양조건 (토양, 작물, 농업관리)에 따라 배출되는 온실가스의 장기적 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제이다 (Project No. 2014001310008).

References

- Anand, S.V. 2013. Global environmental issues. doi: 10.4172/scientificreports.632.
- Conant, R.T., Ryan, M.G., Ågren, G.I., Birge, H.E., Davidson, E.A., Eliasson, P.E., Evans, S.E., Frey, S.D., Giardina, C.P., Hopkins, F.M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M.U., Lavalley, J.M., Leifeld, J., Parton, W.J., Steinweg, J.M., Wallenstein, M.D., Wetterstedt, J.Å.M. and Bradford, M.A. 2011. Temperature and soil organic matter decom-

- position rates— synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology* 17: 3392–3404.
- Deng, J., Zhou, Z., Zheng, X. and Li, C. 2013. Modeling impacts of fertilization alternatives on nitrous oxide and nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China. *Atmospheric Environment* 81: 642–650.
- Eckersten, H., Jansson, P.E. and Johnsson, H. 1998. SOILN Model User's Manual, Version 9.2. Communications. 98: 6. Division of Hydrotechnics, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Engel, T. and Priesack, E. 1993. Expert-N, a building block system of nitrogen models as resource for advice, research, water management and policy. In, Eijsackers, H.J.P. and Hamers, T. (eds.), *Integrated Soil and Sediment Research: a Basis for Proper Protection*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands. pp. 503–507.
- Giltrap, D.L., Li, C. and Saggari, S. 2010. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 136: 292–300.
- Hutson, J.L. and Wagenet, R.J. 1992. LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model: a Process-Based Model of Water and Solute Movement, Transformations, Plant Uptake and Chemical Reactions in the Unsaturated Zone. Version 3.0. Research Series No. 93–3. Department of Soil, Crop, and Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, New York, USA.
- 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 29 April 2015.
- Jansson, P.E. and Moon, D.S. 2001. A coupled model of water, heat and mass transfer using object-orientation to improve flexibility and functionality. *Environmental Modelling and Software* 16: 37–46.
- Johnsson, H., Bergström, L., Jansson, P.E. and Paustian, K. 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 18: 333–356.
- Kim, D.S. and Na, U.S. 2011. Soil emission measurements of N₂O, CH₄ and CO₂ from intensively managed upland cabbage field. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 27: 313–325. (in Korean)
- KMA. 2015. <http://www.kma.go.kr>. Korea Meteorological Administration, Korea. Accessed 29 April 2015. (in Korean)
- KREI. 2015. <http://www.krei.re.kr>. Korea Rural Economic Institute, Korea. Accessed 29 April 2015. (in Korean)
- KSIS. 2015. <http://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp>. Korean Soil Information System, Korea. Accessed 29 April 2015. (in Korean)
- Li, C., Frolking, S. and Frolking, T.A. 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 97: 9759–9776.
- Parton, W.J., Hartman, M., Ojima, D.S. and Schimel, D.W. 1998. DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. *Global and Planetary Change* 19: 35–48.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Ojima, D.S. and Cole, C.V. 1994. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. In, Bryant, R.B. and Arnold, R.W. (eds.), *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. pp. 147–167.
- RDA. 2015. <http://rda.go.kr/>. Rural Development Administration, Korea. Accessed 29 April 2015. (in Korean)
- Shin, M.H., Jang, J.R., Won, C.H., Kum, D.H., Jung, Y.H., Lee, S.I., Lim, K.J. and Choi, J.D. 2014. Simulation of GHG emission from paddy field using DNDC model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56: 47–57. (in Korean)
- Wua, S.H., Jansson, P.E. and Kolari, P. 2011. Modeling seasonal course of carbon fluxes and evapotranspiration in response to low temperature and moisture in a boreal Scots pine ecosystem. *Ecological Modelling* 222: 3103–3119.