

국내외 모델 분석을 통한 산림 탄소 및 질소 결합 모델 개발방안 연구

김형섭¹ · 이종열² · 한승현¹ · 김성준¹ · 손요환^{1*}

¹고려대학교 환경생태공학과, ²고려대학교 생명자원연구소

Approaches for Developing a Forest Carbon and Nitrogen Model Through Analysis of Domestic and Overseas Models

Hyungsub Kim¹, Jongyeol Lee², Seung Hyun Han¹, Seongjun Kim¹ and Yowhan Son^{1*}

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering,

Korea University, Seoul 02841, Korea

²Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 02841, Korea

요약: 산림에서 온실가스 동태를 모의하기 위해서는 탄소 및 질소 순환을 종합적으로 모의하는 모델을 활용할 필요가 있다. 국내에는 한국형 산림 탄소 모델인 FBDC 모델이 개발되어 탄소 저장량 및 변화량을 추정하고 타당성 검토도 진행된 바 있으나, 질소 순환을 모의하는 모델의 개발 사례는 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 문헌조사를 바탕으로 우리나라의 실정에 적합한 산림 탄소 및 질소 결합 모델의 개발방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 VISIT, Biome-BGC, Forest-DNDC, O-CN 등 모델의 일반적 특징, 구조, 생태적 과정, 입력 자료, 출력 자료, 탄소 및 질소 순환의 결합 방법을 분석하였으며, FBDC 모델의 구조와 특징도 분석하였다. 이러한 모델을 분석한 결과 기존의 탄소 순환 모델에 질소 순환 구조를 결합하여 개발된 VISIT 모델을 참고하여, FBDC 모델과 질소 순환 구조를 결합하는 방식으로 새로운 모델을 설계할 수 있을 것으로 보인다. 그리고 새로 개발될 모델이 토양 N₂O 배출을 모의하기 위해서는 질소 순환 구조에 VISIT과 Forest-DNDC 모델에서 공통적으로 모의하는 생태적 과정들이 포함될 필요가 있다. 또한 모든 국외 모델들은 임목의 탄소와 질소 흡수, 고사유기물의 분해 과정을 중심으로 탄소 및 질소 순환을 유기적으로 연결하고 있으며, 이러한 연결 구조를 FBDC 모델과 질소 순환 구조의 결합에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 한편 모델 개발에 필요한 기상, 토성, 수종 분포 등의 입력 자료는 국내에서 확보할 수 있으나, 토양에서 배출되는 N₂O에 대한 검증 자료와 질소 순환과 관련된 일부 파라미터 자료는 현지조사를 통하여 확보해야 할 것으로 사료된다.

Abstract: For the estimation of greenhouse gas dynamics in forests, it is useful to use a model which simulates both carbon (C) and nitrogen (N) cycle simultaneously. A forest C model, called FBDC, was developed and validated in Korea. However, studies on development of forest N model are insufficient. This study aimed to suggest a development process of a forest C and N model. We analyzed the general features, structures, ecological processes, input data, output data, and methods of integrating C and N cycles of the VISIT, Biome-BGC, Forest-DNDC, and O-CN. The structure and features of the FBDC were also analyzed. The VISIT was developed by integrating forest C model with a N cycle module, and the new model also could be designed by combining the FBDC with a N cycle module. The VISIT and Forest-DNDC could estimate soil N₂O emissions, and the integrated model should include the processes shared by these models. Especially, the overseas models linked C and N cycles based on N absorption, C absorption, and decomposition of dead organic matter. Therefore, the integration of the FBDC with N cycle module should apply this linkage of structures between C and N cycles. Climate, soil texture, and species distribution data, which are essential for the model development, were available in Korea. However, parameter data associated with N cycle and validation data for soil N₂O emissions need to be obtained by field studies.

Key words: forest carbon and nitrogen model, greenhouse gases, model development, input data, output data, nitrogen cycle module

* Corresponding author
E-mail: yson@korea.ac.kr

ORCID
Yowhan Son  <https://orcid.org/0000-0001-5621-9894>

서 론

산림은 전 지구 탄소 및 질소 순환에서 중요한 역할을 한다. 육상생태계에 저장된 탄소 중 절반 이상이 산림에 저장되어 있고, 질소 강하물의 상당량이 산림을 통해서 유입되기 때문이다(Cox et al., 2000; Churkina et al., 2007). 특히 산림 탄소 및 질소 순환에는 광합성을 통한 대기 중 CO₂ 흡수 과정과 토양에서의 CO₂, N₂O 배출 과정이 포함되며, 기후변화 관련 국제기구는 이러한 산림의 온실가스 동태에 대하여 정량화된 보고를 요구하고 있다(IPCC, 2006; Han et al., 2017). 따라서 국가 단위의 산림 탄소와 질소 순환 연구를 통하여 산림 온실가스 동태를 파악할 필요가 있다.

탄소 및 질소 순환은 서로 유기적으로 연결되어 있다(Schulze, 2000). 즉, 토양 내 질소 유효도는 임목의 광합성과 생장을 제한하여 산림의 CO₂ 흡수량에 영향을 미치고, 임목의 CO₂ 흡수량 변화는 토양에서 임목으로 이동하는 질소의 양을 변화시킨다(Yoon et al., 2015). 또한 고사유기물이 분해되고 토양 내 질소가 식물이 이용 가능한 형태로 전환되는 속도는 탄소와 질소의 상대적 비율에 의해 조절된다(Yoon et al., 2014). 따라서 산림에서 탄소 및 질소 순환에 대한 연구는 서로 결합하여 진행되는 것이 필요하다.

일반적으로 산림에서 탄소 및 질소 순환 연구는 현장 조사를 통하여 가능하나, 국가 단위의 현장조사를 위해서는 많은 인력과 비용이 요구된다(Kurz et al., 2009). 또한 현장조사를 통한 연구 결과는 당시의 환경 조건을 기반으로 하고 있어 환경 조건이 변화한 경우에 자료를 활용하기 어렵다(Running et al., 2009). 또한, 소규모에서 진행된 연구 결과를 국가 단위의 대푯값으로 활용할 경우 큰 오차가 발생할 수 있다. 반면 모델을 이용하면 비교적 적은 인력과 비용으로 국가 단위의 온실가스 동태를 추정하는 것이 가능하며, 다양한 환경 조건이 산림에 미치는 영향도 예측할 수 있다(Kurz et al., 2009).

국내에서 온실가스 동태를 모의하는데 활용할 수 있는 한국형 산림 탄소 모델인 FBDC (Forest Biomass and Dead organic matter Carbon) 모델이 개발된 바 있으며, 이 모델을 이용하여 탄소 인벤토리 보고 항목인 임목, 낙엽층, 고사목, 토양 탄소의 변화를 국가 단위에서 추정하는 것이 가능하다(IPCC, 2006; Yi et al., 2013; Lee et al., 2014). 또한, FBDC 모델은 적은 입력 자료로도 구동이 가능하고, 타당성도 검증된 바 있다(Lee et al., 2014). 그러나 FBDC 모델은 질소 순환을 모의하지 않아 질소 조건의 변화가 임목의 생장과 고사유기물의 분해에 미치는 영향을 고려하지 못하며, 특히 토양에서의 N₂O 배출을 추정할 수 없다. 특히 지난 수십 년간 산림으로 유입되는 질소 강하

물이 지속적으로 증가해 왔으나, FBDC 모델은 산림의 질소 조건이 항상 일정하다고 가정하고 있어 모의 결과에 불확실성이 존재한다(Sokolov et al., 2008; Bala et al., 2013; Lee et al., 2014; Drewniak and Gonzalez-Meler, 2017).

이러한 문제로 인하여 한국형 모델인 FBDC 모델을 사용하여 전체 산림 온실가스 동태를 모의하는 것에 한계가 있으나, 국외에서 개발된 모델을 국내 산림에 그대로 적용하는 것도 어려울 것으로 보인다. 즉 국외 산림 탄소 및 질소 결합 모델들은 일반적으로 광합성을 모의하는 모델이나, 국내에는 광합성과 관련된 파라미터 자료와 검증 자료가 부족하여 이러한 모델을 사용하기 어렵기 때문이다(Yi et al., 2013; Han et al., 2014; Kim et al., 2015; Drewniak and Gonzalez-Meler, 2017). 또한 국외 모델들은 일반적으로 특정 지역을 토대로 개발되었기에 우리나라 산림의 특성을 반영하지 못할 가능성이 있다(Lee et al., 2010a). 이러한 측면에서 우리나라 실정에 적합한 산림 탄소 및 질소 결합 모델의 개발이 요구되는 상황이며, 따라서 본 연구에서는 국외 산림 탄소 및 질소 결합 모델과 한국형 산림 탄소 모델인 FBDC 모델을 분석하여 새로운 모델의 개발을 위한 방안과 확보해야 할 자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

분석에 사용한 모델은 국외에서 개발된 VISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases), Biome-BGC (Biome-BioGeochemical Cycles), Forest-DNDC (Forest-DeNitrification and DeComposition), O-CN (Organizing carbon and hydrology in dynamic ecosystems-Carbon and Nitrogen) 모델과 국내에서 개발된 FBDC 모델이며, 분석 항목은 구조, 생태적 과정, 입력 자료, 출력자료, 탄소 및 질소 순환 구조의 결합 방법 등이다(Running and Hunt, 1993; Krinner et al., 2005; Li et al., 2005; Inatomi et al., 2010; Ito, 2010; Zaehle and Friend, 2010; Lee et al., 2014). 그리고 분석한 결과를 종합하여 한국형 산림 탄소 및 질소 결합 모델의 개발 방안을 제시하였다.

결과 및 고찰

1. 국외 산림 탄소 및 질소 결합 모델에 대한 분석

1) 일반적 특징

분석 대상 국외 모델들은 공통적으로 다양한 생태적 과정의 모의에 기상, 토양, 식생 등의 자료를 이용하며, 이러한 모의를 통해서 저장고 간 탄소 및 질소 유출입을 모의하고 출력 자료를 도출한다(Figure 1). 한편, 이 모델들 중에서 VISIT과 O-CN 모델은 초기에는 탄소 순환만 모의할 수

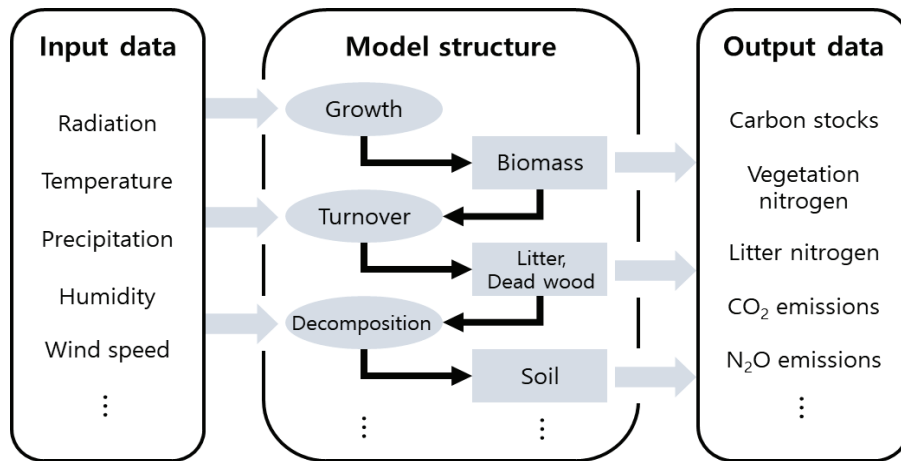


Figure 1. General description of simulation process in forest carbon (C) and nitrogen (N) models.

있는 모델이었으나, 온실가스 동태와 질소가 탄소 순환에 미치는 영향을 모의하기 위해서 질소 순환 구조가 추가적으로 결합되어 개발된 모델이다(Ito and Oikawa, 2002; Krinner et al., 2005; Inatomi et al., 2010; Zaehle and Friend, 2010). 그리고 Forest-DNDC 모델은 농경지 토양의 탄소 및 질소 순환을 모의하는 모델과 산림에서 일어나는 생리학적 과정을 모의하는 모델을 결합한 모델이다(Aber and Federer, 1992; Li et al., 1992, 1994; Li et al., 2005).

2) 구조

분석한 국외 모델은 모두 저장고로 임목, 고사유기물, 토양 탄소, 토양 질소 등을 포함하나, 모델의 세부 구조에는 차이가 있다. VISIT 모델은 크게 수분 수지와 태양 복사를 모의하는 탄소 순환 구조와 대기과 임분 사이의 기체 교환을 모의하는 질소 순환 구조로 구분된다. 이 모델은 저장고에 미생물 질소를 포함하는 특징이 있으며, 토양 질소 저장고는 고사유기물, 토양 NH₄⁺ 및 NO₃⁻, 부식질로 구분된다(Ito and Oikawa, 2002; Inatomi et al., 2010). 한편 Biome-BGC 모델은 크게 광합성과 증발산을 모의하는 구조, 임목 단위에서 탄소와 질소를 분배하는 구조, 토양 탄소 순환과 질소 순환을 모의하는 구조로 구분된다. Biome-BGC 모델은 가상의 탄소 저장고를 포함하는 특징이 있는데, 광합성으로 흡수한 탄소가 이 저장고에 일부 저장되어 다음 해의 초기 생장을 모의하는데 이용된다(Running and Hunt, 1993). 그리고 Forest-DNDC 모델은 크게 기상 인자와 생리학적 과정이 토양 환경에 미치는 영향을 모의하는 구조와 토양 환경 변수가 대기로 배출되는 각종 기체에 미치는 영향을 모의하는 구조로 구분된다. 또한 이 모델의 고사유기물 저장고는 분해 단계와 분해율에 따라 총 8가지로 구분된다(Li et al., 2005). O-CN 모델은 크게 수분 수지를 모의하는 구조, 탄소 및 질소 순

환을 모의하는 구조, 수광 경쟁과 임목 고사를 모의하는 구조로 구분된다. 그리고 O-CN 모델은 Biome-BGC 모델과 유사하게 가상의 저장고를 포함하고 있으며, 광합성을 통해 흡수한 탄소, 뿌리를 통하여 흡수한 질소, 낙엽이지기 이전에 재분배된 질소가 이에 저장된다고 가정한다(Krinner et al., 2005; Zaehle and Friend, 2010).

3) 생태적 과정

분석 대상 국외 모델은 공통적으로 광합성, 임목 성장, 탄소 분배, 낙엽 낙지, 자가 호흡, 고사유기물 분해를 모의하나, 질소 순환과 관련된 생태적 과정에 차이가 있다(Table 1). VISIT 모델은 질소 관련 생태적 과정으로 질소 무기화, 질소 강하물 유입, 질소 고정, 질산화, 탈질화, 수계로의 질소 유출, 임목의 질소 흡수를 포함하는데, 특히 질산화와 탈질화는 토양 pH, 토양수 함량, 토양 온도, 토양 NH₄⁺ 농도 등을 통하여 추정된다. 그리고 VISIT 모델에서 질산화와 탈질화는 N₂O 배출 모의에 핵심적인 역할을 한다(Ito and Oikawa, 2002; Inatomi et al., 2010). Biome-BGC 모델은 VISIT 모델과 다르게 질소 관련 생태적 과정으로 질산화를 포함하지 않으며, 추가적으로 낙엽이지기 이전의 질소 재분배를 포함한다. Biome-BGC 모델은 대기로 배출되는 총 질소량은 모의하나, 배출되는 질소 기체를 종류별로 구분하지 않아 N₂O의 배출을 구체적으로 모의할 수 없다. 그리고 이 모델은 고사유기물 분해율이 리그닌 함량과 반비례한다고 가정한다(Running and Hunt, 1993). 한편 Forest-DNDC 모델은 다른 모델들과 달리 발효와 화학적 탈질화를 생태적 과정으로 포함하고 있어 다양한 질소 기체의 배출을 모의할 수 있는 특징이 있다(Li et al., 2005). 그리고 이 모델은 VISIT과 Biome-BGC 모델이 포함하는 질소 관련 생태적 과정들을 모두 포함하고 있으며, 질산화와

Table 1. Included processes in five reviewed models.

Model	VISIT	Biome-BGC	Forest-DNDC	O-CN	FBDC
C cycle					
Photosynthesis	○	○	○	○	×
Growth	○	○	○	○	○
C allocation	○	○	○	○	○
Turnover	○	○	○	○	○
Autotrophic respiration	○	○	○	○	×
Decomposition	○	○	○	○	○
N cycle					
N mineralization	○	○	○	○	
N deposition	○	○	○	○	
N fixation	○	○	○	○	
Nitrification	○	×	○	○	
Denitrification	○	○	○	○	
N leaching	○	○	○	○	
Plant N uptake	○	○	○	○	
N retranslocation at senescence	×	○	○	○	

탈질화를 토양 온도, 수분 조건, 토양 유기 탄소 농도, 미생물 바이오매스, 토양 pH, 토양 NH₄⁺ 농도, 점토 비율 등을 이용하여 추정하고 잎의 노화에 따라 잎의 광합성 속도가 줄어든다고 가정한다(Li et al., 2005). O-CN 모델 또한 Forest-DNDC 모델과 마찬가지로 VISIT과 Biome-BGC 모델이 포함하는 질소 관련 생태적 과정을 모두 포함하며, 고사유기물의 리그닌 함량이 분해에 미치는 영향과 잎의 노화가 광합성 속도에 미치는 영향을 고려하는 특징이 있다(Zaehle and Friend, 2010).

4) 입력 자료

입력 자료는 크게 기상, 토양, 식생 관련 자료로 구분할 수 있다. 기상 자료의 경우 모든 국외 모델이 공통적으로 기온을 요구하나, 필요로 하는 시간 단위에 차이가 있다(Table 2). VISIT 모델은 일평균 기온을 요구하고, Biome-BGC 모델은 일 최대 및 최소 기온과 낮 동안의 기온을, Forest-DNDC 모델은 일 최대 및 최소 기온을, O-CN 모델은 매 시간 기온을 요구하며, 이 모델들은 기온을 이용하여 광합성, 고사유기물 분해, 토양 온도를 모의한다. 이렇게 추정된 토양 온도는 토양 질소 유효도 모의에 활용된다. 한편 분석한 국외 모델들은 일일 강수량 정보도 요구하며, 강수량으로 토양 내 수분 상태를 추정한다(Running and Hunt, 1993; Li et al., 2005; Inatomi et al., 2010; Zaehle and Friend, 2010). 토양 자료의 경우 모든 국외 모델이 토성,

토양 pH와 용적밀도 등의 자료를 요구하며, Forest-DNDC 모델은 토양 표면의 유기 탄소 농도를 필요로 하는 특징이 있다. 토성은 강수량과 함께 토양 내 수분 상태를 모의할 때 이용되며, 토양 내 수분 상태는 고사유기물의 분해와 토양 질소 유효도 모의에 이용된다(Running and Hunt, 1993; Li et al., 2005; Inatomi et al., 2010; Zaehle and Friend, 2010). 그리고 식생 자료의 경우 분석한 국외 모델들이 모두 수종 또는 산림 유형 자료를 요구하고, 이를 이용하여 지역 특성에 따른 임목 생장을 모의한다(Table 2).

5) 출력 자료

출력 자료는 크게 탄소 관련 자료와 질소 관련 자료로 구분할 수 있다(Table 3). 탄소와 관련된 출력 자료의 경우, 분석한 국외 모델들은 모두 광합성과 자가 호흡에 의한 CO₂ 유입과 유출을 모의할 수 있으며, 총일차생산량(Gross Primary Production; GPP), 순일차생산량(Net Primary Production; NPP), 순생태계생산량(Net Ecosystem Production; NEP) 추정도 가능하다. 이 모델들은 모두 임목, 고사유기물, 토양 탄소에 저장된 탄소량을 추정할 수 있으나, 고사유기물에 저장된 탄소량을 낙엽층과 고사목으로 구분하는 모델은 Biome-BGC 모델이 유일하다(Running and Hunt, 1993). 그리고 VISIT, Biome-BGC, Forest-DNDC 모델은 토양에서의 CH₄ 배출에 대한 모의가 가능하다. 한편 질소와 관련된 출력 자료의 경우, 국외

Table 2. Input data in five reviewed models.

Model	Climate	Soil	Vegetation
VISIT	Daily mean temperature, Daily precipitation, Daily average wind speed, Daily mean cloud	Texture, pH	Forest type
Biome-BGC	Daily max/min temperature, Daylight average temperature, Daily precipitation, Daylight average partial pressure of water vapor, Daylight average shortwave radiant flux density	Texture	Plant functional type
Forest-DNDC	Daily mean temperature, Daily max/min temperature, Daily precipitation, Daily average wind speed, Humidity	Bulk density, pH, Soil organic C at surface	Forest type
O-CN	Hourly temperature, Daily precipitation, Atmospheric CO ₂ concentration, Daily average wind speed, Solar radiation, Humidity	Texture, pH	Plant functional type
FBDC	Mean annual temperature	-	Species, Site index

Table 3. Output data in five reviewed models.

Model	C	N
VISIT	C stocks, GPP, NPP, NEP, Soil CO ₂ emissions, Soil CH ₄ emissions	Vegetation N, Litter N, Soil N (Humus, Microbe, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻), N leaching, N ₂ O emissions
Biome-BGC	C stocks, GPP, NPP, NEP, Soil CO ₂ emissions, Soil CH ₄ emissions	Vegetation N, Litter N, Soil N (Soil organic matter, mineral), N leaching, Volatilization of N
Forest-DNDC	C stocks, GPP, NPP, NEP, Soil CO ₂ emissions, Soil CH ₄ emissions	Vegetation N, Litter N, Soil N (Microbe, Humads, Humus, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻), N leaching, N ₂ O, NO, N ₂ , NH ₃ emissions
O-CN	C stocks, GPP, NPP, NEP, Soil CO ₂ emissions	Vegetation N, Litter N, Soil N (NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻), N leaching, N ₂ O, NO, N ₂ , NH ₃ emissions
FBDC	C stocks, Soil CO ₂ emissions	-

모델들은 모두 임목, 고사유기물, 토양에 저장된 질소량과 토양에서 유출되는 질소량을 추정할 수 있다. 그리고 VISIT, Forest-DNDC, O-CN 모델은 N₂O 배출을 모의할 수 있고, 이 중에서 Forest-DNDC와 O-CN 모델은 NO, N₂, NH₃ 등의 배출도 모의할 수 있다.

6) 탄소 및 질소 순환 구조의 결합

국외 모델들의 탄소 및 질소 순환 구조는 공통적으로 임목의 질소 흡수, 탄소 흡수, 고사유기물의 분해 과정들을 중심으로 결합되어 있으며, 잎과 목질부의 탄질물이 특히 중요한 역할을 한다(Figure 2; Running and Hunt,

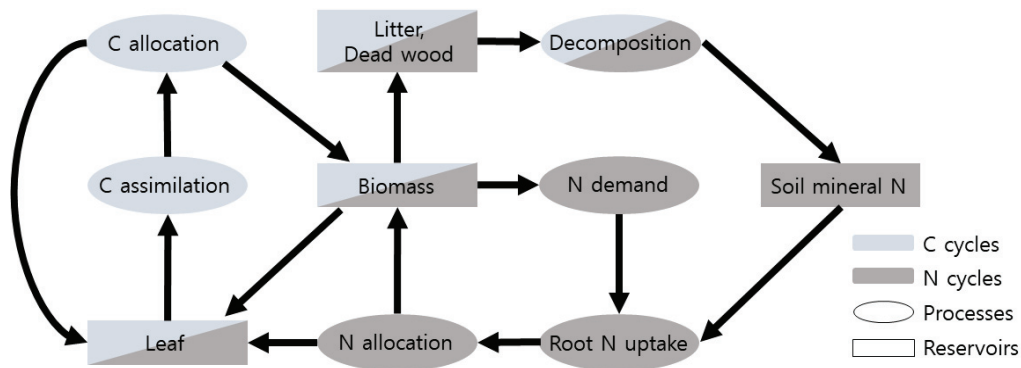


Figure 2. Common integrating method of C and N cycles in forest C and N cycle models.

1993; Li et al., 2005; Inatomi et al., 2010; Zaehle and Friend, 2010). 즉, 이러한 과정들과 잎과 목질부의 탄질률을 토대로 탄소 순환과 질소 순환 간의 상호작용을 모의한다. 이 상호작용은 크게 세 가지 가정을 통해서 모의되는데, 첫 번째로 국외 모델들은 임목의 질소 흡수량이 목질부의 탄질률에 비례한다고 가정한다. 목질부의 질소 농도가 적정 질소 농도 보다 낮은 경우 임목의 질소 요구도가 높아지고, 임목의 질소 요구도와 토양 내 존재하는 NH_4^+ 와 NO_3^- 농도에 비례하여 임목의 질소 흡수량이 결정된다. 그리고 임목에 흡수된 질소는 부위별 적정 탄질률에 따라 잎과 목질부로 배분된다(Figure 2). 두 번째로, 분석 대상인 국외 모델들은 임목의 탄소 흡수량이 잎의 탄질률에 반비례한다고 가정한다. 잎의 질소 농도가 적정 질소 농도보다 낮은 경우 잎의 광합성률이 낮아지고, 따라서 임목의 탄소 흡수량도 줄어든다. 이렇게 임목에 흡수된 탄소는 질소와 마찬가지로 부위별 적정 탄질률에 따라 잎과 목질부에 배분된다(Figure 2). 세 번째로, 이 모델들은 고사유기물의 분해율이 고사유기물의 탄질률에 반비례한다고 가정하는데, 잎과 목질부의 탄질률이 고사유기물의 탄질률에 반영된다. 고사유기물의 분해율과 비례해서 질소의 토양 유입 속도가 결정되며 이에 따라 토양 내 NH_4^+ 와 NO_3^- 농도가 결정된다(Figure 2).

추가적으로 Biome-BGC, Forest-DNDC, O-CN 모델은 잎과 목질부의 질소 농도가 높을수록 자가 호흡에 의해 대기로 배출되는 CO_2 가 증가한다고 가정하며, 이 중에서 Forest-DNDC 모델은 토양에서의 질소 기체 배출이 토양 유기 탄소 농도와 비례한다고 가정한다(Running and Hunt, 1993; Li et al., 2005; Zaehle and Friend, 2010). 그리고 Biome-BGC와 O-CN 모델은 뿌리에 분배된 탄소량이 많을수록 임목의 질소 흡수량이 증가한다고 가정하고, 잎과 뿌리의 질소 농도가 적정 질소 농도보다 낮은 경우에 뿌리에 탄소를 더 많이 분배하는 특징이 있다(Running and Hunt, 1993; Zaehle and Friend, 2010).

2. 한국형 산림 탄소 모델에 대한 분석

1) 한국형 산림 탄소 모델(FBDC 모델)의 구조와 특징
국내에서 개발된 산림 탄소 모델인 FBDC 모델은 임분 수확표 등을 이용하여 임목 성장을 모의하는 모델이며, 국내 탄소 순환 모의에서도 이미 검증된 바 있다(Yi et al., 2013; Lee et al., 2014). 이 모델의 구조는 크게 임목에서 일어나는 생태적 과정을 모의하는 구조와 고사유기물 분해를 모의하는 구조로 구분되며, 저장고로 임목, 낙엽층, 고사목, 토양 탄소를 포함한다(Figure 3). 이 모델은 임목 성장, 탄소 분배, 낙엽 낙지, 고사유기물 분해 등의 생태적 과정을 모의하며, 이에 국내 수종과 환경에 적합한 파라미터를 사용한다(Table 1). 그리고 FBDC 모델은 광합성과 자가 호흡을 모의하지 않아 이 과정들과 관련된 입력 자료와 파라미터 자료를 요구하지 않는다. 따라서 FBDC 모델의 입력 자료는 연평균 기온, 지위 지수, 수종 등으로 분석한 국외 모델들에 비하여 입력 자료가 적은 것이 특징이다(Table 2).

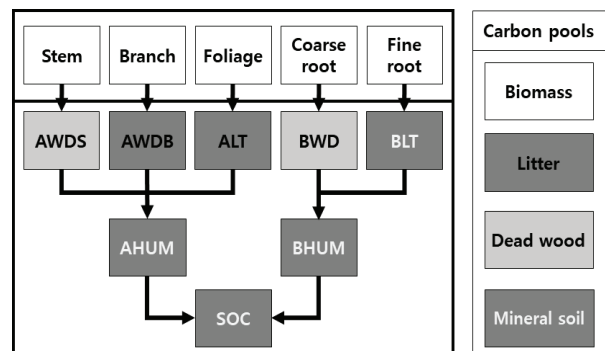


Figure 3. The structure of the FBDC.

(AWDS: Aboveground woody debris from stem; AWDB: Aboveground woody debris from branch; BWD: Belowground woody debris; ALT: Aboveground litter; BLT: Belowground litter; AHUM: Aboveground humus; BHUM: Belowground humus; SOC: Soil organic C, Lee et al., 2014).

3. 한국형 산림 탄소 및 질소 결합 모델 개발 방안

1) 기본 방향

국의 모델인 VISIT과 O-CN 모델이 기존의 탄소 순환 모델에 질소 순환 구조를 결합시켜 새로운 모델을 개발한 것과 같이 기존 FBDC 모델에 질소 순환 구조를 결합하여 우리나라 실정에 적합한 한국형 산림 탄소 및 질소 결합 모델을 개발할 수 있을 것으로 보인다(Figure 4). FBDC 모델은 국내 산림에서 별도의 파라미터 조정이 필요하지 않고, 요구하는 입력 자료의 종류도 적어 활용이 용이한데다가 산림 탄소 인벤토리 보고 항목을 대부분 모의할 수 있기 때문이다. 그리고 이렇게 새로 개발될 모델은 O-CN 모델보다는 VISIT 모델의 구조를 참고하는 것이 더 적합할 것으로 보인다. O-CN 모델은 VISIT 모델과 달리 수광 경쟁과 임목 고사를 모의하여 VISIT 모델보다 많은 파라미터 자료가 필요하기 때문이다. 따라서 VISIT 모델을 참고하여 구조를 크게 탄소 순환 구조와 질소 순환 구조로 두 가지로 나누고 FBDC 모델과 질소 순환 구조를 결합하는 방향이 적합할 것으로 보인다(Figure 4).

2) FBDC 모델과 질소 순환 구조의 결합

분석한 국외 모델들의 출력 자료와 생태적 과정을 참고하여 FBDC 모델과 결합할 질소 순환 구조를 설계할 수 있다. VISIT과 Forest-DNDC 모델은 FBDC 모델이 모의할 수 없는 토양에서의 N₂O 배출을 모의할 수 있는데,

FBDC 모델과 결합할 질소 순환 구조가 이 두 모델이 공통적으로 포함하는 생태적 과정을 포함한다면 새로 개발될 모델도 토양에서의 N₂O 배출을 모의할 수 있을 것으로 보인다. 한편 FBDC 모델과 질소 순환 구조의 결합은 국외 모델들이 공통적으로 이용하는 임목의 질소 및 탄소 흡수, 고사유기물의 분해 과정을 중심으로 하는 결합 방식을 활용할 필요가 있다. 이 결합 방식을 활용하는 경우 토양 내 질소 유효도가 임목의 성장을 제한하는 영향과 임목의 탄소 흡수량 변화가 임목이 흡수하는 질소량에 미치는 영향을 모의할 수 있고, 고사유기물의 탄질률이 분해와 토양 질소 유효도에 미치는 영향도 모의할 수 있기 때문이다. 그러나 FBDC 모델은 임분수확표를 이용하여 임목 성장을 추정하기 때문에 토양 내 질소 유효도 변화에 따른 임목 성장 차이를 모의할 수 없는 한계가 있다. 따라서 FBDC 모델을 이용하여 임목 성장을 모의할 때 FBDC 모델에서 입력 자료로 이용하는 지위 지수를 임분의 질소 유효도에 따라 달리 적용하는 것을 고려할 수 있다. 한편, FBDC 모델과 질소 순환은 잎, 목질부, 고사유기물 등의 저장고에 탄질률 값을 설정하고 모델 구조에 토양 NH₄⁺ 및 NO₃⁻, 미생물 질소 등의 토양 질소 저장고를 추가함으로써 연계가 가능하다. 이 경우 임목 성장과 연계하여 임목의 질소 흡수량 변화를 모의할 수 있으며, 고사유기물의 탄질률이 분해에 미치는 영향도 추정할 수 있을 것으로 예상된다.

3) 모델 개발 및 검증에 필요한 자료

VISIT과 Forest-DNDC 모델이 필요로 하는 입력 자료 중에서 기상 자료는 대부분 기상자료개방포털을 통해 확보 가능한 것으로 보인다. 전국 각지에 흩어진 100여개의 기상관측소를 통하여 일단위의 기온, 강수량, 운량, 풍속, 상대습도 등의 자료를 획득할 수 있으며, 이러한 기상 자료는 보간 방법을 통하여 국가 전체의 산림에 적용될 수 있다(Lee et al., 2011). 토양 입력 자료인 토성은 산림입지토양도, 토양 유기 탄소 농도와 용적 밀도는 국가 산림자원조사(NFI: National Forest Inventory)로부터 획득할 수 있다(NIFoS, 2011). 그리고 토양 pH는 산성화 모니터링 보고서로부터 획득할 수 있으나, 관측 지점이 많지 않아 국가 단위의 모의 시 오차가 발생할 가능성이 존재한다(NIFoS, 2016). 따라서 가능한 많은 지점에서 토양 pH를 더 측정하여 오차를 줄일 필요가 있다. 한편 수종 혹은 식생 유형 자료는 국가 임상도를 활용할 수 있다.

모델의 검증에 필요한 임목, 낙엽층, 고사목, 토양 탄소 자료는 NFI와 현장연구 자료를 활용할 수 있고(Lee et al., 2009a; 2009b; Noh et al., 2010a; Noh et al., 2013; Yi et al., 2013; Lee et al., 2014), 토양에서의 CO₂ 배출도 다

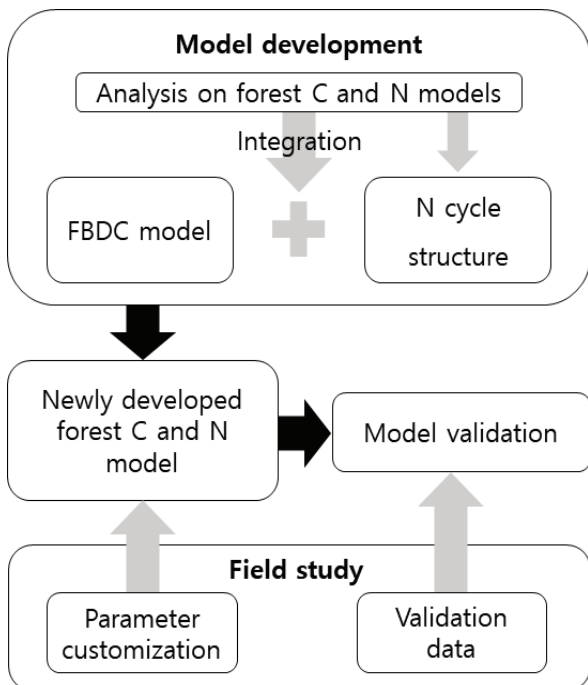


Figure 4. A systematic process of developing a forest C and N model.

Table 4. Available data for parameter adjustment.

Process	References
N mineralization	Son et al., 1995; Son and Lee, 1997; Son et al., 1999
N deposition	Park et al., 2002; Park and Lee, 2002
N fixation	Son, 2001; Lee and Son, 2005; Son et al., 2007; Noh et al., 2010b
Nitrification	Son et al., 1995; Lee and Son, 2006a; 2006b
Denitrification	Bashkin et al., 2002; Nam et al., 2011;
N leaching	You et al., 2002
Plant N uptake	Son et al., 2007; Yoon et al., 2015
Soil mineral N change	Son et al., 1995; Lee and Son, 2006a
N retranslocation at senescence	Lee and Son, 2004
Leaf N effect on C assimilation	None

수의 현장연구 자료를 활용할 수 있다(Kim et al., 2009; Lee et al., 2010b; Kim et al., 2012). 그러나 토양에서의 N₂O 배출과 관련한 자료는 부족한 상황이며, 특히 배출 동태를 장기간 연구한 사례는 없다(Kim and Kim, 2013). 따라서 새로운 모델을 개발하고 이를 검증하기 위해서는 현장연구를 통하여 산림 토양에서의 N₂O 배출 자료를 확보할 필요가 있다(Figure 4; Lee et al., 2010a).

VISIT과 Forest-DNDC 모델이 공통적으로 포함하는 질소 무기화, 질소 고정, 질산화, 수계로의 질소 유출 등과 관련한 파라미터는 국내에서 진행된 여러 현장연구 결과들을 활용할 수 있을 것으로 보이나, 상대적으로 질소 강하물 유입과 탈질화의 경우 산림을 대상으로 진행된 연구는 부족하다(Table 4). 그리고 국외 모델들의 탄소 순환과 질소 순환의 결합 구조를 토대로 FBDC 모델과 질소 순환을 결합하기 위해서는 임목의 질소 흡수량, 토양 내 NH₄⁺와 NO₃⁻ 농도 변화, 잎의 탄질률에 따른 탄소 흡수량 변화를 연구한 자료가 필요하나, 이 중에서 잎의 질소 농도에 따른 탄소 흡수량 변화와 관련된 연구는 부족한 상황이다(Table 4). 따라서 이와 관련된 현장연구들이 모델 개발 연구와 병행되어야 하며, 국내 산림의 특성을 대표할 수 있도록 다양한 지역을 대상으로 장기적으로 진행되어야 할 것이다(Figure 4). 그러나 이러한 파라미터 자료 중에서 현장연구를 통하여 획득하기 어려운 자료의 경우, 국내의 지역적 특성과 유사한 국외에서 얻은 현장연구 자료를 활용하는 대안도 있다.

결론

본 연구에서는 우리나라 산림에서의 온실가스 동태 모의가 가능한 산림 탄소 및 질소 결합 모델의 개발방안을 제시하기 위하여 VISIT, Biome-BGC, Forest-DNDC,

O-CN, FBDC 등의 모델을 분석하였다. VISIT과 O-CN 모델의 개발 과정을 참고하여 FBDC 모델에 질소 순환 구조를 결합하여 새로운 모델을 개발하는 방안을 고려할 수 있으며, FBDC 모델과 결합할 질소 순환 구조는 VISIT과 Forest-DNDC 모델이 공통적으로 모의하는 생태적 과정을 포함할 필요가 있을 것으로 보인다. 그리고 FBDC 모델과 질소 순환 구조의 결합은 국외 모델들의 임목의 질소 흡수, 탄소 흡수, 고사유기물 분해 과정을 중심으로 하는 유기적 연결 관계를 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 국내에는 모델 개발 및 검증에 필요한 토양 N₂O 배출 자료와 질소 순환과 관련한 파라미터 자료가 부족한 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 산림 탄소 및 질소 결합 모델들을 분석한 자료들은 우리나라 산림 탄소 및 질소 결합 모델의 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 ‘산림 질소 동태 모델 개발 및 한국형 산림 탄소 모델과의 결합 연구(2018R1A2B6001012)’, 산림청(한국임업진흥원)의 ‘신기후체제 대응 산림분야 국가 온실가스 인벤토리 산정체계 및 탄소계정 고도화(2017044B10-1819-BB01)’, 환경부(한국환경산업기술원)의 ‘기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 요소 기술 개발: 산림, 농업 부문(2014001310008)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

Aber, J.D. and Federer, C.A. 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia* 92(4): 463-474.

- Bala, G., Devaraju, N., Chaturvedi, R.K., Caldeira, K. and Nemani, R. 2013. Nitrogen deposition: how important is it for global terrestrial carbon uptake?. *Biogeosciences* 10(11): 7147-7160.
- Bashkin, V.N., Park, S.U., Choi, M.S. and Lee, C.B. 2002. Nitrogen budgets for the Republic of Korea and the Yellow Sea region. In *The Nitrogen Cycle at Regional to Global Scales*. Springer. Dordrecht, Netherlands.
- Churkina, G., Trusilova, K., Vetter, M. and Dentener, F. 2007. Contributions of nitrogen deposition and forest regrowth to terrestrial carbon uptake. *Carbon Balance and Management* 2(1): 5.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A. and Totterdell, I.J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184-187.
- Drewniak, B. and Gonzalez-Meler, M.A. 2017. Earth system model needs for including the interactive representation of nitrogen deposition and drought effects on forested ecosystems. *Forests* 8(8): 267.
- Han, S.H., Lee, J., Choi, S., Kim, S. and Son, Y. 2014. Analysis on oversea forest carbon models to develop a Korea-specific forest carbon model. *Life Science and Natural Resources Research* 21: 55-66. (In Korean)
- Han, S.H., Lee, S.J., Chang, H., Kim, S., Kim, R., Jeon, E.C. and Son, Y. 2017. Priority for developing emission factors and quantitative assessment in the forestry sector. *Journal of Climate Change Research* 8(3): 239-245. (In Korean with English abstract)
- Inatomi, M., Ito, A., Ishijima, K. and Murayama, S. 2010. Greenhouse gas budget of a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems* 13(3): 472-483.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan.
- Ito, A. 2010. Changing ecophysiological processes and carbon budget in East Asian ecosystems under near-future changes in climate: implications for long-term monitoring from a process-based model. *Journal of Plant Research* 123(4): 577-588.
- Ito, A. and Oikawa, T. 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling* 151(2-3): 143-176.
- Kim, D.S. and Kim, S. 2013. N₂O and CH₄ emission from upland forest soils using chamber methods. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 29(6): 789-800. (In Korean with English abstract)
- Kim, H., Kim, Y.H., Kim, R. and Park, H. 2015. Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN. *Forest Science and Technology* 11(4): 212-222.
- Kim, Y.S., Yi, M.J., Lee, Y.Y., Kobayashi, M. and Son, Y. 2009. Estimation of carbon storage, carbon inputs, and soil CO₂ efflux of alder plantations on granite soil in central Korea: comparison with Japanese larch plantation. *Landscape and Ecological Engineering* 5(2): 157-166.
- Kim, Y.S., Yi, M.J., Lee, Y.Y., Son, Y. and Koike, T. 2012. Characteristics of soil CO₂ efflux in even-aged alder compared to Korean pine plantations in central Korea. *Journal of Forest and Environmental Science* 28(4): 232-241.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. and Prentice, I.C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1): GB1015.
- Kurz, W.A. et al. 2009. CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220(4): 480-504.
- Lee, A.R., Yi, K., Son, Y., Kim, R., Kim, C., Park, G.S., Lee, K.H. and Yi, M.J. 2010a. Approaches for developing a Korean model through analysis of overseas forest soil carbon models. *Journal of Korean Forest Society* 99(6): 791-801. (In Korean with English abstract)
- Lee, I.K. and Son, Y. 2004. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on seasonal changes and retranslocation of nutrition in foliage and twig of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi*. *Korean Journal of Ecology* 27(4): 199-210. (In Korean)
- Lee, I.K. and Son, Y. 2006a. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on nutrient dynamics and litterfall production of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi*. *Journal of Ecology and Field Biology* 29(3): 205-212. (In Korean with English abstract)
- Lee, I.K. and Son, Y. 2006b. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil nitrogen mineralization of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi* plantations in Yangpyeong area, Gyeonggi province. *Journal of Korean Forest Society* 95(1): 82-90. (In Korean with English abstract)
- Lee, J., Yoon, T.K., Han, S., Kim, S., Yi, M.J., Park, G.S., Kim, C., Son, Y.M., Kim, R. and Son, Y. 2014. Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012. *Biogeosciences* 11(17): 4637-4650.
- Lee, N.Y., Koo, J.W., Noh, N.J., Kim, J. and Son, Y. 2010b. Seasonal variation in soil CO₂ efflux in evergreen coniferous and broad-leaved deciduous forests in a cool-temperate forest, central Korea. *Ecological Research* 25(3):

- 609-617.
- Lee, S.C., Choi, S.H., Lee, W.K., Yoo, S.J. and Byun, J.G. 2011. The effect of climate data applying temperature lapse rate on prediction of potential forest distribution. *Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science* 19(2): 19-27. (In Korean with English abstract)
- Lee, S.K., Son, Y., Noh, N.J., Heo, S.J., Yoon, T.K., Lee, A.R., Razak, S.A. and Lee, W.K. 2009a. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon. *Journal of Korean Forest Society* 98(6): 772-779. (In Korean with English abstract)
- Lee, S.K., Son, Y., Noh, N.J., Yoon, T.K., Lee, A.R., Seo, K.W., Hwang, J. and Bae, S.W. 2009b. Carbon storage of pure and mixed pine-deciduous oak forests in Gwangneung, central Korea. *Journal of Ecology and Field Biology* 32(4): 237-247.
- Lee, Y.Y. and Son, Y. 2005. Diurnal and seasonal patterns of nitrogen fixation in *Alnus hirsuta* plantation of central Korea. *Journal of Plant Biology* 48(3): 332-337.
- Li, C., Frolking, S. and Frolking, T.A. 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97(D9): 9759-9776.
- Li, C., Frolking, S. and Harriss, R. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles* 8(3): 237-254.
- Li, C., Trettin, C., Ge, S., McNulty, S. and Butterbach-Bahl, K. 2005. Modelling carbon and nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems. 3rd International Nitrogen Conference. 893-898.
- Nam, Y.H., An, S.W. and Park, J.W. 2011. Nitrogen budget of South Korea in 2008: evaluation of non-point source pollution and N₂O emission. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 33(2): 103-112. (In Korean with English abstract)
- National Institute of Forest Science (NIFoS). 2011. The 5th national forest inventory report. National Institute of Forest Science. Korea. (In Korean)
- National Institute of Forest Science (NIFoS). 2016. Development of technology for monitoring, evaluating and managing the effects of forest soil acidification. National Institute of Forest Science. Korea. (In Korean)
- Noh, N.J., Kim, C., Bae, S.W., Lee, W.K., Yoon, T.K., Muraoka, H. and Son, Y. 2013. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. *Journal of Plant Ecology* 6(5): 368-379.
- Noh, N.J., Son, Y., Lee, S.K., Seo, K.W., Heo, S.J., Yi, M.J., Park, P.S., Son, Y.M. and Lee, K.H. 2010a. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea. *Science China Life Sciences* 53(7): 822-830.
- Noh, N.J., Son, Y., Koo, J.W., Seo, K.W., Kim, R.H., Lee, Y.Y. and Yoo, K.S. 2010b. Comparison of nitrogen fixation for north- and south-facing *Robinia pseudoacacia* stands in central Korea. *Journal of Plant Biology* 53(1): 61-69.
- Park, S.U. and Lee, Y.H. 2002. Spatial distribution of wet deposition of nitrogen in South Korea. *Atmospheric Environment* 36(4): 619-628.
- Park, S.U., Lee, Y.H. and Lee, E.H. 2002. Estimation of nitrogen dry deposition in South Korea. *Atmospheric Environment* 36(31): 4951-4964.
- Running, S.W. and Hunt Jr, E.R. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. pp. 141-158. In: Ehleringer, J.R., Field, C.B. (Eds.). *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press. San Diego, U.S.A.
- Running, S.W., Baldocchi, D.D., Turner, D.P., Gower, S.T., Bakwin, P.S. and Hibbard, K.A. 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 70(1): 108-127.
- Schulze, E.D. 2000. The carbon and nitrogen cycle of forest ecosystems. In carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. Jena, Germany.
- Sokolov, A.P., Kicklighter, D.W., Melillo, J.M., Felzer, B. S., Schlosser, C.A. and Cronin, T.W. 2008. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *Journal of Climate* 21(15): 3776-3796.
- Son, Y. 2001. Non-symbiotic nitrogen fixation in forest ecosystems. *Ecological Research* 16(2): 183-196.
- Son, Y. and Lee, I.K. 1997. Soil nitrogen mineralization in adjacent stands of larch, pine and oak in central Korea. *Annals of Forest Science* 54(1): 1-8.
- Son, Y., Kim, J.T., Lee, S.E. and Lee, I.K. 1995. Differences of nitrogen mineralization in *Larix decidua*, *Pinus strobus*, and *Thuja occidentalis* plantations of the Kwangneung experimental forest, Kyonggi province. *Korean Journal of Ecology* 18(3): 385-395. (In Korean with English abstract)
- Son, Y., Lee, W.K., Lee, S.E. and Ryu, S.R. 1999. Effects of thinning on soil nitrogen mineralization in a Japanese larch plantation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30(17): 2539-2550.
- Son, Y., Lee, Y.Y., Lee, C.Y. and Yi, M.J. 2007. Nitrogen fixation, soil nitrogen availability, and biomass in pure and mixed plantations of alder and pine in central Korea.

- Journal of Plant Nutrition 30(11): 1841-1853.
- Yi, K., Park, C.W., Ryu, S.R., Lee, K. H., Yi, M. J., Kim, C., Park, G.S., Kim, R. and Son, Y. 2013. Simulating the soil carbon dynamics of *Pinus densiflora* forests in central Korea. Scandinavian Journal of Forest Research 28(3): 241-256.
- Yoon, T.K., Noh, N.J., Han, S., Lee, J. and Son, Y. 2014. Soil moisture effects on leaf litter decomposition and soil carbon dioxide efflux in wetland and upland forests. Soil Science Society of America Journal 78(5): 1804-1816.
- Yoon, T.K., Noh, N.J., Chung, H., Yang, A.R. and Son, Y. 2015. Soil nitrogen transformations and availability in upland pine and bottomland alder forests. Forests 6(9): 2941-2958.
- You, Y.H., Kim J.H., Mun, H.T. and Lee, C.S. 2002. Input, output and budget of nitrogen and sulphur in forested watershed ecosystems. Korean Journal of Ecology 25(3): 189-195. (In Korean with English abstract)
- Zaehle, S. and Friend, A.D. 2010. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates. Global Biogeochemical Cycles 24(1): GB1005.

Manuscript Received : May 4, 2018

First Revision : May 25, 2018

Accepted : May 31, 2018