

국가산림자원조사와 모델을 활용한 우리나라 산림지 온실가스 인벤토리 개선 방안

김형섭* · 이정민** · 이선정*** · 손요환****†

*코넬대학교 농업생명과학대학 통합식물과학부 박사후연구원, **고려대학교 환경생태공학과 박사과정,

국립산림과학원 산림탄소연구센터 임업연구사, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Methodologies for improving forest land greenhouse gas inventory in South Korea using National Forest Inventory and model

Kim, Hyung-Sub* · Lee, Jeongmin** · Lee, Sun Jeoung*** and Son, Yowhan****†

*Postdoctoral associate, School of Integrative Plant Science, College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, Ithaca, New York, United States

**Ph.D candidate, Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul, South Korea

***Research Officer, Forest Carbon on Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul, South Korea

****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, South Korea

ABSTRACT

Following the Paris Agreement, countries are required to report their efforts to mitigate greenhouse gas emissions. Particularly, reliable estimation of greenhouse gas sequestration by forest lands has gained significant attention. Nevertheless, comprehensive guidelines for the Tier 3 method, which is regarded as the most reliable method, remain ambiguous. This study analyzed the requirements for the Tier 3 method by reviewing IPCC guidelines and national inventory reports from developed countries such as the United States, Canada, and Sweden. Additionally, the study proposed methodologies for the Tier 3 inventory report tailored to the situation in South Korea by reviewing domestic modeling research studies and available data. The requirements for the Tier 3 method included seven criteria, including the combined use of measurement- and model-based inventories, temporal and spatial interpolation of measurement data, and model verification and validation. However, the degree to which these requirements were met varied among the United States, Canada, and Sweden. This study proposed that South Korea could report a Tier 3 forest land greenhouse gas inventory using national forest inventory data and domestic models. For the Tier 3 inventory, it is necessary to assess the uncertainty of national forest inventory data, perform spatial interpolation, adjust model parameters, and conduct model verification and validation. This study will facilitate discussions among relevant departments and experts involved in the forest land greenhouse gas inventory report. Moreover, the proposed methodologies in this study will adhere to the Tier 3 inventory requirements, using time and resources effectively and progressively advancing the reliability of greenhouse gas inventory reports.

Key words : Forest Land, Greenhouse Gas Inventory Report, Model, National Forest Inventory, Tier 3 Method

†Corresponding author : yson@korea.ac.kr (Korea University, Anam-Ro 145, Sung-Buk Gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3469)

ORCID 김형섭 0000-0003-1447-0620
이정민 0000-0002-6730-6034

이선정 0000-0001-6948-7900
손요환 0000-0001-5621-9894

1. 서론

인간에 의한 온실가스 배출과 함께 전지구 기온이 상승하고 있으며, 이에 따른 기후변화가 인류의 존속을 위협하고 있다(Arrhenius, 1896; Callendar, 1938; IPCC, 2023; Keeling, 1970; Pales and Keeling, 1965). 국제사회는 이러한 기후변화의 위협을 인지하고 2015년 파리협정을 채택하였다. 파리협정의 목표는 전지구 기온 증가 폭을 산업화 이전 대비 2°C 이하로 유지하고, 나아가 기온 증가를 1.5°C 이하로 제한하기 위해 모든 국가가 노력하는 것이다. 이 때 각국은 온실가스 감축 목표를 스스로 정해 국제사회에 약속하고 실천해야 하며, 국제사회는 그 이행에 대해서 공동으로 검증한다.

파리협정에 참여하는 국가는 격년 투명성보고서를 작성하여 온실가스 감축 과정을 2년 주기로 보고해야 하며, 국가 온실가스 통계와 감축이행 실적 등을 보고서에 포함시켜야 한다(UNFCCC, 2016). 국가 온실가스 통계는 국가의 감축과정을 확인할 수 있는 기초자료로 기후 변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)가 제공한 지침에 따라 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report; NIR)를 작성 및 제출하였으며, 2024년부터는 온실가스 인벤토리 문서(National Inventory Document; NID) 형태로 작성해야 한다(IPCC, 2006, 2019). IPCC 지침은 산정의 신뢰도 수준을 활동자료와 배출흡수계수로 구분하여 Tier 1, Tier 2, Tier 3 등으로 제시하는데, 배출흡수계수의 경우 Tier 1은 IPCC 지침이 제시하는 기본 배출흡수계수, Tier 2는 국가 고유 배출흡수계수, Tier 3는 다수의 고정 표본점에서 주기적으로 반복 측정된 자료 또는 모델을 활용하는 수준을 의미한다. 여기에서 IPCC는 각 국가가 보유한 자료 수준에 맞는 Tier를 이용하되 가능하면 자료 수집, 모델 개발 등에 노력을 기울여 보다 높은 Tier를 이용할 것을 권고한다. 또한 IPCC 지침은 온실가스 배출량 및 흡수량을 에너지, 산업 공정, 농업, 폐기물, 그리고 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land Use Change, and Forestry; LULUCF) 등 5개 분야(대분류)로 구분하고, 농업과 LULUCF분야를 통합하여Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)로 구분한다.

LULUCF 분야는 다른 분야와 달리 온실가스 흡수 역할을 할 수 있다. 온실가스종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center; GIR)가 발간한 우리나라 NIR에 따르면, 2020년 기준 온실가스 총배출량(LULUCF

분야 제외)은 654.4 백만톤 CO₂eq이며, LULUCF 분야를 통한 온실가스 흡수는 37.9 백만톤 CO₂eq이다(GIR, 2023). 즉, 온실가스 총배출량의 약 5.8%가 LULUCF 분야를 통해 흡수되었다. LULUCF 분야에는 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타토지, 수확된 목재제품 등 7개의 부문(중분류)이 포함되는데, 2020년 기준으로 산림지, 초지, 수확된 목재제품 부문은 각각 40.5, 0.02, 0.5 백만톤 CO₂eq의 온실가스를 흡수하였다. 한편 농경지와 습지는 오히려 각각 2.8 및 0.3 백만톤 CO₂eq의 온실가스를 배출하였으며, 정주지 및 기타토지는 활동자료 부족을 이유로 산정되지 않았다. LULUCF 분야 중에서도 산림지 부문을 통해 대부분의 온실가스(약 98.7%)가 흡수되고 있으며, 산림지 부문의 산정 방법과 그 Tier 수준이 주목받아 우리나라 다른 LULUCF 부문의 산정을 위한 실시 예로 활용되고 있다.

산림지 부문의 산정은 산림지로 유지된 산림지, 타토지에서 전용된 산림지, 질소 시비로 인한 N₂O 배출, 산림지 바이오매스 연소에 의한 배출 등으로 구분된다. 우리나라는 타토지에서 전용된 산림지는 산림지로 유지된 산림지에 포함하여 산정하였으며, 질소 시비로 인한 N₂O 배출과 산림지 바이오매스 연소에 의한 배출은 활동자료 미비로 산정하지 않고 있다(GIR, 2023). 산림지로 유지된 산림지의 산정 항목은 입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 등 4개의 탄소 저장고이다. 우리나라는 입목 바이오매스만 Tier 2로 산정하고 있으며, 나머지 탄소 저장고에 대한 산정은 Tier 1 수준에 머무르고 있다. 이러한 이유 때문에 산림지 부문 산정의 관장기관인 농림축산식품부 및 산림청, 산정기관인 국립산림과학원, 총괄기관인 GIR, 그리고 관련 학계의 전문가들은 Tier 수준을 높이기 위해 자료 구축, 문헌 조사, 기술 개발 등 다방면의 노력을 기울이고 있다(GIR, 2020).

그러나 LULUCF 산정 수준을 높이는 것은 도전적인 과제이다. Tier 1 수준을 Tier 2 수준으로 높이기 위해서는 많은 인력과 비용을 들여 장기간 다양한 활동 자료를 수집해야 한다(Han et al., 2017; Ham et al., 2020; Park et al., 2018). 우리나라에서는 산림지 부문의 경우 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)를 활용하여 Tier 2 수준의 산정이 가능하지만, Tier 2 수준을 Tier 3 수준으로 높이는 것은 자료 구축과는 다른 어려움이 존재한다. 이는 IPCC 지침이 Tier 1, 2 수준과 달리 Tier 3 수준에 대해서는 상세한 방법론을 제공하지 않기 때문이다. IPCC 지침은 서론에서 Tier 3 수준과 관련하여 다음과 같

이 언급하고 있다. “The methods and data presented focus on Tier 1 inventories. The methods will be generally applicable to Tier 2 inventories, but the default data presented for Tier 1 will be partly or wholly replaced with national data as part of a Tier 2 estimation. **Tier 3 methods are not described in detail, but good practice in application is outlined.**” 즉, IPCC 지침 자체가 Tier 1, 2 수준에 대해 집중하고 있다. 아울러 Tier 3 수준에 대한 지침은 간략하고 생략된 행간이 많아 전문가가 아니면 산정에 직접 활용하기 어렵다.

한편 국외 선진국들은 간략한 Tier 3 지침과 다년간의 자료 축적 및 모델 개발 경험을 함께 활용하여 Tier 3 수준으로 NIR을 작성하고 있다. 실제로 탄소 및 온실가스 동태를 모의하는 모델은 1930년대부터 2000년대까지 약 250여개가 개발되었고(Campbell and Paustian, 2015), 그 중 CENTURY, DAYCENT, CBM-CFS3, Yasso 등의 모델이 국외 선진국의 NIR 작성에 사용되었다. 한편 우리나라의 상황은 이들 국가와 매우 다르다. 우리나라는 2006년에 들어서서야 고정 표본점 체계의 NFI를 운영하고, 모델 연구에 착수했기 때문에 상대적으로 관련 경험이 부족하다. 특히 우리나라는 NIR 작성과 관련된 총괄기관, 관장기관, 산정기관이 산정 분야, 그리고 동일 분야 내에서도 산정 부문에 따라 상이하다. 아울러 산정과 관련된 학계의 전문 분야도 산림과학, 생물지구화학, 통계학, 모델링 등으로 다양하다. 이러한 상황에서 명확하고 상세한 공식 지침의 부재가 기관 및 전문가들 사이의 논의와 의견 통합을 어렵게 하고 있다.

이에 본 연구는 (1) IPCC 지침, (2) Tier 3 수준 방법론을 이용하는 국가의 산림지 부문 NIR (3) 국내 관련 모델 개발 및 활용 사례, 그리고 (4) Tier 3 수준의 산정에 활용할 수 있는 국내 자료를 검토하고, 이를 토대로 우리나라 실정에 맞는 Tier 3 수준의 산정 방법론을 제시하고자 한다. 연구의 범위는 산림지 부문 내 산림지로 유지된 산림지로 한정하고, 유기토양(Organic soil), 토양 무기탄소, non-CO₂ 온실가스, 그리고 바이오매스 연소에 의한 배출과 관련된 내용은 다루지 않았다. 이는 국내에 타토지에서 전용된 산림지, 질소 시비로 인한 N₂O 배출, 산림지 바이오매스 연소에 의한 배출, 바이오매스 연소에 의한 배출 등에 대한 활동자료가 미비하고, 국내 산림의 유기토양 비율, 토양 무기탄소 함량, non-CO₂ 온실가스 배출이 극히 낮은 수준이기 때문이다.

2. 연구 방법

IPCC 지침은 2006년에 새로 정립된 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories(이하 IPCC 지침)의 Tier 3 수준에 대한 내용을 중심으로 검토하였으며, 2019 Refinement to 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories(이하 2019 IPCC 지침 개선본; IPCC, 2019)에 추가된 내용이 있는 경우 이를 함께 검토하였다. 이때 Tier 1, 2 수준과 활동자료와 관련된 내용은 국내의 타 연구 논문(Han et al., 2017; Ham et al., 2020; Park et al., 2018)에서 이미 다루었으므로, 본 연구에서는 해당 내용을 별도로 기술하지 않았다. 아울러 IPCC 지침의 내용이 충분히 구체적이지 않은 경우 저자가 해석 및 참고문헌과 함께 예시를 제시하였다.

국가별 NIR은 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC)가 공개한 2023년 기준의 NIR을 활용하여 분석을 수행하였다(<https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>).

Tier 3 수준을 이용하는 국가는 미국, 캐나다, 스웨덴, 호주, 오스트리아, 핀란드, 영국, 이탈리아, 일본, 노르웨이, 뉴질랜드 등이 있었으나, 서로 유사한 산정 방법을 이용하는 국가들은 제외하고, NFI를 이용하는 동시에 서로 다른 방법론을 적용하는 미국, 캐나다, 스웨덴의 NIR을 대표로 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. IPCC 지침

IPCC 지침은 Tier 3 수준의 산정 방법을 두 가지로 구분하고, 각각의 방법론에 대해 간략한 지침을 제공한다(IPCC, 2006). 첫번째는 측정에 기반한 산정(Measurement-based Tier 3 inventories)이며, 두번째는 모델에 기반한 산정(Model-based Tier 3 inventories)이다(Fig. 1).

IPCC 지침은 Tier 3 수준이 온실가스 흡수 및 배출의 비선형적 동태를 추정한다는 점에서 Tier 1, 2 수준과 구분된다고 말한다. Tier 1, 2 수준은 기본 배출흡수계수 또는 국가 고유 배출흡수계수(예: 연간 토양 탄소 변화량)를 이용한다. 그렇기 때문에 낮은 Tier 수준은 토지이용변화와 같은 외부 요인에 의해 토양 탄소가 선형적으로 변화한다고 가정한다. 그러나 실제로 토양 탄소는 선형적으로 변화하지 않으며 외부 요인이 발생한 당시에는 크게 변화

A) Measurement-based Tier 3 inventories

1. Develop sampling schemes
2. Select sampling sites
3. Collect initial samples
4. Re-sample the monitoring network on a periodic basis
5. Analyze data and determine carbon stock changes/non-CO₂ emissions, and infer national emissions and removal estimates and measures of uncertainty
6. Reporting and Documentation

B) Model-based Tier 3 inventories

1. Model selection or development
2. Model calibration
3. Evaluate model behavior
4. Collect and collate require model data inputs
5. Implement the model
6. Quantify uncertainties
7. Validation of inventory estimates
8. Reporting and documentation

Fig. 1. Methodologies for measurement-based Tier 3 inventories (A) and model-based tier 3 inventories (B) represented by international panel on climate change good practice guideline (IPCC, 2006, 2019).

하다가 평형상태에 가까워질수록 느리게 변화하는 등 비선형적 동태를 보인다. 즉, IPCC 지침은 이러한 비선형적 동태를 고려하는 것이 Tier 3 수준의 특징이며, 측정에 기반한 산정과 모델에 기반한 산정 모두 이러한 특징을 반영할 수 있어야 한다고 말한다.

3.1.1. 측정에 기반한 산정

IPCC 지침과 2019 IPCC 지침 개선본에 따르면 측정에 기반한 산정은 (1) 측정 계획 수립(Develop sampling schemes), (2) 표본점 선정(Select sampling sites), (3) 측정 및 시료 수집(Collect initial samples), (4) 주기적 반복 측정(Re-sample the monitoring network on a periodic basis), (5) 자료 분석, 온실가스 인벤토리 산정, 불확실성 계산(Analyze data and determine carbon stock changes/non-CO₂ emissions, and infer national emissions and removal estimates and measures of uncertainty), (6) 보고 및 문서화(Reporting and Documentation) 등 여섯 단계의 과정이 필요하다.

첫 번째 및 두 번째 단계에서는 국가의 산림 면적과 예산을 고려해서 가능한 다양한 유형의 산림에 대한 측정이 이루어지도록 해야 한다. 이는 산림의 이산화탄소 흡수 및 배출 과정은 산림의 유형, 환경 요인, 관리 방법에 따라 큰 변이를 보이기 때문이다. 그러나 IPCC 지침은 적절한 단위면적당 표본점의 개수나 반복 측정 주기를 명확히 제시하지 않는다. 대신 나무가 비교적 느리게 자라고 유기물의 분해가 느린 한대림이나 온대림에서는 반복 측정 주기를 길게 하는 등 기후와 특성을 고려해서 반복 측정 주기를 결정하도록 언급하고 있다. 추가로 IPCC 지침은 모델 평가를 위한 측정 자료를 설명하면서 반복 측정 주기는 3년, 5년, 또는 10년이 적정하며, 3년 이하의 주기는

토양 탄소 변화가 크게 나타나지 않기 때문에 필요하지 않다고 언급하였다(Smith, 2004).

세 번째 및 네 번째 단계에서는 인벤토리 측정 시스템 또는 플럭스 타워 시스템을 활용하여 자료를 수집한다. 인벤토리 측정 시스템은 국가 전역에 고르게 분포하는 다수의 고정 표본점에서 탄소 저장고를 주기적으로 반복 측정하는 것이며, 이를 통해 축적차이법(Stock-difference method)으로 시간당 탄소 저장량 변화를 산정할 수 있다. 한편 플럭스 타워 시스템은 에디 공분산 시스템을 이용하여 대기과 산림 사이의 순 생태계 이산화탄소 교환량(Net Ecosystem CO₂ Exchange)을 산정하는 것이다. 그러나 IPCC 지침은 플럭스 타워 시스템이 두 가지 한계를 지닌다고 언급한다. 첫째, 국가 전체 산림의 이산화탄소 동태를 대표하려면 플럭스 타워의 밀도가 충분히 높아야 한다. 그러나 플럭스 타워의 설치와 관리 비용이 높아 다수의 플럭스 타워를 운용하기 어렵다. 둘째, IPCC 지침은 탄소 저장고별 산정을 요구하나 플럭스 타워 시스템은 생태계 전체 단위에서 이산화탄소 흡수 및 배출을 계산한다. 이러한 이유 때문에 생태계 전체에 대한 값을 탄소 저장고별로 분리하기 위해 별도의 보정 수식이 요구되고, 이는 불확실성 요인의 증가로 이어진다. 추가로 에디 공분산 시스템은 측정을 위해 활성화된 난류를 이용하는데, 난류가 약하거나 아예 없는 날씨에는 시스템의 불확실성이 높아진다(Hollinger and Richardson, 2005). 아울러 에디 공분산 시스템 자료를 활용하려면 기기 보정, 오작동, 전원 등의 문제로 인한 결측 보정, 난류가 약한 밤 시간의 자료 보정, 이상치 보정 등의 과정이 필요하다. 보정을 위해 다양한 수식과 방법론이 적용되는데, 이 과정의 복잡성과 이 과정상의 불확실성은 다시 산정 결과의 불확실성으로 이어진다.

다섯 번째 단계에서는 적절한 통계 기법을 선택하여 자료를 분석하고, 측정과 실험 오류에서 비롯된 불확실성을 평가한다. 이 단계에는 측정 자료가 전체 산림 면적을 대표할 수 있도록 단순 평균 또는 가중 평균 방법을 이용하여 자료를 시공간적으로 확장하는 과정이 필요하다. 그러나 표본점의 개수가 전체 산림 면적에 비해 적거나, 반복 측정 주기가 너무 길면 측정 자료가 전체 산림 면적의 특성을 대표한다고 보기 어려울 수 있다. 이 경우에는 측정 계획을 수정하거나 단순 평균 및 가중 평균 방법 대신 고도화된 공간 보간 및 외삽(interpolation and extrapolation) 방법을 이용한다.

2019 IPCC 지침 개선본에서는 측정이 이루어지지 않은 산림의 바이오매스 추정을 위해 바이오매스 밀도 지도(biomass density map)를 활용할 수 있는 것으로 언급되어 있다. 바이오매스 밀도 지도는 원격탐사로 얻은 자료와 측정 결과를 이용하여 만들어지며, 표본점에서 측정된 점 자료를 면자료로 공간 보간하는 방법론이다. 실제로 브라질은 바이오매스 밀도 지도를 사용하여 아마존 지역의 탄소 저장량을 추정하였으며, 407개 표본점에서 측정한 자료를 이용하여 바이오매스 밀도 지도의 신뢰성을 검증하였다(Chave et al., 2014; Longo et al., 2016).

여섯 번째 단계에서는 산정 결과를 요약하고, 측정 설계와 사용된 통계 방법 등을 문서화한다. 그리고 외부 전문가를 통해 산정 과정의 신뢰성을 평가받고 QA/QC 과정을 거친다.

3.1.2. 모델에 기반한 산정

모델은 실제 생태계에서 일어나는 다양한 현상을 측정과 실험을 통해 수식으로 모방하고, 서로 연관된 수식을 연결해서 구조화한 것이다. 모델은 일종의 함수라고 볼 수 있으며, 입력자료를 모델에 넣으면 출력자료를 얻을 수 있다.

IPCC 지침에서 말하는 모델은 과정기반모델(process-based model) 또는 상대성장식(allometric equations)을 의미한다. 과정기반모델은 탄소 흡수와 배출, 탄소 저장 등 탄소 동태와 관련된 광합성, 성장, 입목 고사, 낙엽낙지 생성, 유기물 분해, 미생물 호흡 등의 현상을 측정하고 이를 수식으로 모방하고 연결한 것이다. 일반적으로 산림탄소 모델은 기후, 토양 특성, 식생 정보 등을 입력 자료로 요구하며, 이산화탄소 흡수 및 배출량, 탄소 저장량, 탄소 저장량 변화 등을 결과로 출력한다(Kim et al., 2018). 추가로 2019 IPCC 지침 개선본은 과정기반모델과 상대성장

식을 결합한 형태의 모델도 활용할 수 있음을 언급하고 있다.

상대성장식은 시간에 따른 임분 재적 증가 추세를 고펜페르츠 수식 등으로 모방한 것으로 주로 임분의 지위지수와 함께 사용된다. 일반적으로 상대성장식은 임분의 주요 수종, 임령, 지위지수를 입력자료로 요구하며, 임분 재적을 결과로 출력한다. 추가로 상대성장식은 기후, 토양 특성으로 지위지수를 추정하는 모델과 결합되어 사용되는 경우가 많으며, 출력된 임분 재적에 수종별 목재 밀도, 목재 탄소 함량비를 곱해서 임분 바이오매스 탄소 저장량을 결과로 출력하기도 한다.

2019 IPCC 지침 개선본에 따르면 모델에 기반한 산정은 (1) 모델 선택 및 개발(Model selection or development), (2) 모델 보정(Model calibration), (3) 모델 기작 평가(Evaluate model behavior), (4) 모델 입력 자료 수집(Collect and collate require model data inputs) (5) 모델 구동(Implement the model), (6) 불확실성 평가(Quantify uncertainties), (7) 추정 결과 검증(Validation of inventory estimates), (8) 보고 및 문서화(Reporting and documentation) 등 여덟 단계의 과정이 필요하다. 그러나 이 과정은 단계에 따라 순차적으로 진행되는 것이 아니며, 필요에 따라 이전 단계로 돌아가거나 여러 단계가 동시에 진행되기도 한다.

첫 번째 단계에서는 모델을 선택한다. 모델은 기존에 개발된 모델을 활용할 수도 있고 필요한 경우 모델을 직접 개발해서 이용할 수도 있다. Tier 1, 2 수준보다 더 정확하게 온실가스 흡수 및 배출 과정을 모의할 수 있다면 어떤 모델이라도 활용할 수 있다. 모델은 국가 및 지역 단위에서 반복 측정되는 고해상도의 GIS 자료를 바탕으로 임상, 토양, 토지이용변화 등의 정보를 확보하고, 이들이 온실가스 배출 및 흡수에 미치는 영향을 고려하여 산정의 정확도를 향상시킬 수 있다. 특히 모델은 앞서 설명한 탄소의 비선형적 동태를 모의할 수 있어야 한다. 그러나 모델 구동에 필요한 입력자료를 수집할 수 있는지, 모델 구동에 필요한 컴퓨터 리소스를 감당할 수 있는지 등을 종합적으로 고려하여 모델을 선택해야 한다.

IPCC 지침은 모델의 필수 구조와 탄소 동태를 간략히 설명한다(Fig. 2). 첫 번째, 모델은 산정 항목인 입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 등 4개의 탄소 저장고를 구조로 포함해야 한다. 두 번째, 모델은 입목 바이오매스의 탄소 저장량 변화, 입목 고사, 낙엽낙지량 등을 모의할 수 있어야 한다. 세 번째, 입목 고사와 낙엽낙지가 고

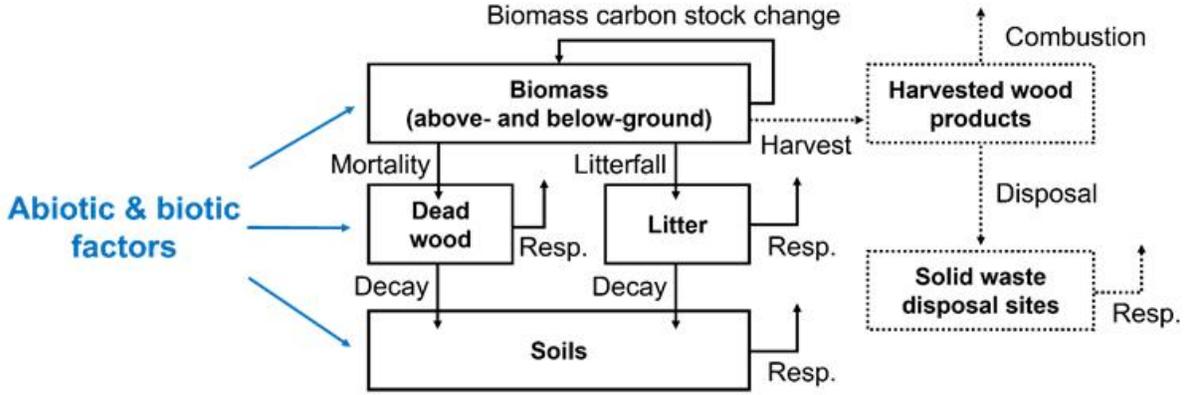


Fig. 2. Basic model structure (solid lines) and additional model structure for harvested wood products (dotted lines) represented by international panel on climate change good practice guideline (Resp. indicates heterotrophic respiration; IPCC, 2006, 2019).

사목과 낙엽층의 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 고려해야 한다. 네 번째, 고사목과 낙엽층이 물리적으로 파편화되어 토양 탄소에 유입되는 과정을 모의해야 한다. 다섯 번째, 토양 미생물 호흡에 의한 고사목, 낙엽층, 토양 탄소의 분해를 모의해야 한다. 그리고 마지막으로 연평균 기온, 연강수량, 토양 물리화학적, 수종 구성 등의 비생물적 및 생물적 요인이 탄소 동태에 미치는 영향을 고려해야 한다. 추가로 모델은 수확된 목재제품을 탄소 저장고로 포함시키고, 입목 바이오매스 수확, 수확된 목재제품의 연소 또는 폐기 등을 탄소 동태로 포함시킬 수도 있다. 아울러 2019 IPCC 지침 개선본은 모델이 토양 침식 및 퇴적, 그리고 바이오차 시비에 의한 토양 탄소 저장량 변화도 모의에 포함시킬 수 있다고 언급하였다.

IPCC 지침은 모델의 입목 고사, 낙엽낙지, 고사목과 낙엽층의 물리적 파편화 등 탄소 이동의 결과가 4개 탄소 저장고의 변화량 및 생태계 전체의 온실가스 흡수 및 배출과 정량적으로 일치하여야 한다고 강조한다. 예를 들어 입목 고사로 인한 입목 바이오매스 탄소 저장량 감소는 이로 인한 고사목 탄소 저장량 증가와 일치해야 한다. 또한 모델은 토지 이용과 관리 그리고 다양한 환경 요인(예: 기후, 토양 특성 등)이 토양으로 유입되는 탄소의 양(예: 입목의 성장과 낙엽낙지의 생성)과 토양 미생물의 유기물 분해에 미치는 영향 등을 고려할 수 있다. 예를 들어, 모델은 간벌 또는 수확벌채에 따른 낙엽낙지량 감소와 수관 개방에 따른 토양 온도 증가가 토양 미생물에 미치는 영향을 고려할 수 있다.

두 번째 단계에서는 모델을 보정한다. 모델 보정은 모

델의 구조와 수식, 그리고 모수를 교정하는 과정이다. 예를 들어 장기간 축적된 다량의 자료를 이용하여 상대성장식의 모수를 수종 및 지역에 맞게 보정하거나, 고사율, 낙엽낙지율, 분해율 등의 모수를 기후 및 토양 환경, 관리 방법에 맞게 보정한다. 이러한 보정에 따라 세 번째 단계에서 확인된 오류가 해소되는지, 여섯 번째 단계에서 확인한 불확실성이 감소되는지 확인해야 한다. 모델 보정에도 불구하고 오류가 나타나고 불확실성이 큰 경우에는 첫 번째 단계로 돌아가 모델을 재선택해야 할 수도 있다. 한편 2019 IPCC 지침 개선본은 머신러닝 또는 베이지언 통계를 활용해서 측정 결과(예: 탄소 저장량 변화, 탄소 흡수 및 배출)를 가장 잘 설명할 수 있는 모수를 추정할 수 있다고 하였다.

세 번째 단계에서는 모델을 검증한다. 일반적으로 모델 평가는 검증(Verification)과 검정(Validation) 과정으로 구분되는데(Luo and Smith, 2022), 검증은 모델이 설계 의도에 따라 합리적인 결과를 보이는지 확인하는 과정이다. 예를 들어 탄소 저장량이 음수가 되거나 탄소 배출량이 흡수량보다 큰 상황에서 탄소 저장량이 지속적으로 증가하는 결과를 보이는 모델은 기존의 지식과 이론에 위배되므로 타당하다고 볼 수 없다. 2019 IPCC 지침 개선본은 모델 검증을 위해 대표본 추출이나 민감도 분석을 수행하고, 추정 결과가 일반적인 범위를 벗어나거나 물질 수지(Mass balance)에 위배되지 않는지 확인하도록 하고 있다.

네 번째 단계에서는 모델 구동에 필요한 기상, 기후, 토양 특성, 수종, 자연재해 이력, 산림 관리 이력 등의 입력

자료를 수집한다. 모델 구동에 필요한 입력자료를 수집할 수 없는 경우에는 첫 번째 단계로 돌아가 더 적은 입력자료의 종류를 요구하는 모델을 선택하거나 직접 개발한다.

다섯 번째 단계에서는 보정을 거친 모델을 네 번째 단계에서 획득한 자료를 이용해 구동한다.

여섯 번째 단계에서는 추정 결과와 측정 자료를 비교하여 모델을 검증하고, 불확실성을 평가한다. 검증에 사용되는 측정 자료는 모델 보정에 사용되지 않은 새로운 자료여야 한다. 또한 비교를 위해 통계적 방법을 이용하거나 시각적으로 모델 결과가 측정 자료의 경향과 유사하다는 것을 다방면에서 보여주어야 한다. 검정을 위해 통계적 수치로 결정계수(Coefficient of determination)와 평균 제곱 오차(Mean squared error) 등을 제시할 수 있으며, 시각적으로 산점도와 히스토그램을 이용할 수 있다. 2019 IPCC 지침 개선본은 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용해 모델 추정의 불확실성을 평가할 수 있다고 언급한다. 또한 검증에 필요한 적절한 측정 결과를 획득할 수 없는 경우에는 관련 국가 통계나 기준에 보고된 산정 결과를 검증 기준으로 활용할 수 있다고 언급하고 있다.

그러나 검증 과정 상에서의 문제는 모델이 아니라 기존의 지식과 이론, 그리고 측정 자료의 한계에서 기인할 수도 있다. 모델은 기본적으로 측정 자료를 수식으로 모방한 것이기 때문에 측정 자료가 실제 생태계에서 일어나는 과정과 그 변이를 충분히 설명하지 못하면 모델 결과도 큰 불확실성을 보이기 때문이다. 실제로 IPCC 지침은 모델의 불확실성은 온실가스 흡수 및 배출 과정과 그 과정에 영향을 미치는 요인들에 대한 불완전한 지식에서 기인한다고 설명하고 있다(“*Uncertainties are due to imperfect knowledge about the activities or processes leading to greenhouse gas fluxes, and are typically manifested in the model structure and inputs.*”).

대표적 예로 입목 고사는 산림 탄소 순환에 가장 큰 영향을 미치는 과정이지만, 시공간과 환경에 따른 큰 변이와 불확실성을 내포한다(McMahon et al., 2019). 이러한 불확실성은 일차적으로 입목이 고사하는 시점을 관측하고, 입목 고사의 원인을 파악하는 것이 어렵기 때문에 발생한다. 먼저 입목의 수명이 길고, 입목 고사가 발생하는 시점이 초기 임분 성장 단계에 집중되어 있기 때문에 일정 임령이 지나면 입목 고사를 관측하는 일 자체가 어렵다. 또한 현지조사를 통해 고사목 발생 여부, 수종, 크기, 부후등급 등은 파악할 수 있더라도, 입목이 고사한 시점과 입목 고사에 영향을 미쳤을 당시의 요인을 직접 파악

하기 어렵다. 이러한 이유 때문에 입목 고사와 관련된 연구는 짧은 주기의 지속적인 모니터링을 요구하고, 그러한 연구 설계가 여의치 않은 경우 고사목의 부후등급과 임분 환경을 이용하여 입목 고사 시점과 그 환경을 불확실하게 추정하게 된다. 그리고 입목 고사의 원인은 입목 간의 경쟁, 병해충, 기후, 토양, 재해 등 다양한 요인이 알려져 있지만(McDowell et al., 2018), 이러한 요인들이 오랜 기간(즉, 입목의 긴 수명) 동안 서로 상호작용하며 입목 고사에 영향을 미치기 때문에 입목 고사의 원인을 통계적으로 명확하게 파악하기 어렵다.

이러한 불확실성을 토대로 구성된 모델 수식은 자연스럽게 고사목 모의의 불확실성으로 이어지고, 나아가 고사목이 영향을 미치는 낙엽층, 토양 탄소 모의의 불확실성으로 상속된다. 다시 말해 측정 자료 자체의 불확실성이 큰 경우에는 모델을 다시 보정하거나 새로운 모델을 선택하더라도 검증 결과가 개선되기 어렵다(Loucks and van Beek, 2017). IPCC 지침에 따로 언급되지는 않았지만, 모델 검증 이전에 측정 결과의 불확실성을 먼저 검토하는 것이 타당하다. 그리고 측정 결과의 불확실성이 크지 않음에도 불구하고 모델 검증 결과가 좋지 않다면 그때는 모델을 다시 보정하거나 재선택해야 한다.

일곱 번째 단계에서는 모델 검증 결과를 요약하고, 여덟 번째 단계에서는 전체 단계를 요약하여 모델의 구조와 수식, 입력 자료, 출력 결과, 그리고 모델 검증에 사용한 측정 자료를 문서화한다. 그리고 외부 전문가를 통해 산정 과정의 신뢰성을 평가받고 QA/QC 과정을 거친다.

3.1.3. 측정과 모델을 모두 활용한 Tier 3 수준의 산정

IPCC 지침이 Tier 3 수준의 산정 방법으로 측정 기반의 산정과 모델 기반의 산정으로 구분해서 제시하기는 하나, 맥락상 두 가지 방법론 모두 활용할 것을 권고하고 있다. 먼저 IPCC 지침은 측정 기반의 산정을 위해 모델을 활용할 것을 권고한다. 이는 모델 없이 측정 자료만 이용하는 산정은 광범위한 측정과 높은 비용이 요구되고, 측정의 범위가 넓더라도 국가 전체에서 나타나는 다양한 요인의 시공간적 변이를 대표하기 어렵기 때문이다(“*However, measurement networks, which serve as the basis for a complete inventory, will have a considerably larger sampling density to minimize uncertainty, and to represent all management systems and associated land-use changes, across all climatic regions and major soil types*”).

예를 들어, 우리나라 NFI는 약 4,500개의 표본점으로

구성되어 있으며, 표본점은 서로 4km 떨어져 있다. 따라서 하나의 표본점이 주변의 산림 1,600 ha를 대표한다. 그리고 각 표본점에서 5년 주기로 입목 바이오매스와 고사목을 반복 측정하고 있으며, 4개의 표본점 중 하나에서 10년 주기로 낙엽층과 토양 탄소를 반복 측정하고 있다. 이때 우리나라가 산정에 NFI만 이용한다면, 그 산정은 두 가지 가정을 포함하게 된다. 첫번째 가정은 표본점 하나의 탄소 저장량과 그 변화가 주변 1,600 ha의 산림(낙엽층과 토양 탄소는 6,400 ha의 산림)을 대표한다는 것이다. 그러나 1,600 ha 산림 내에서도 기후, 토양 환경, 관리 방법 등이 다양하게 나타나며, 이러한 요인에 따라 탄소 저장량 및 그 변화가 달리 나타난다. 두 번째 가정은 이 1,600 ha 산림의 탄소 저장량이 5년 또는 10년 동안 선형적으로 변화한다고 가정하는 것이다.

그러나 앞서 언급한 바와 같이 Tier 3 수준은 온실가스 흡수 및 배출의 비선형적 동태를 추정한다는 점에서 Tier 1, 2 수준과 구분된다. 즉, 두 가지 가정 모두 Tier 3 수준의 산정 요건에 부합하지 않는다. 한편 NFI 표본점의 개수를 늘리거나 측정 주기를 단축하는 것은 예산도 문제지만, 아무리 많은 표본이 존재하더라도 표본이 전체를 대표할 수는 없다는 한계를 지닌다. 이러한 이유로 IPCC 지침은 측정의 시공간적 범위를 보완하기 위해 적절한 통계 모델이라도 사용할 것을 권고하고 있다(“Purely measurement-based inventories, e.g., based on repeated measurements using a national forest inventory can derive carbon stock change estimates without relying on process models, but they do require appropriate statistical models for the

spatial and temporal scaling of plot measurements to a national inventory.”).

IPCC 지침은 모델 검증 및 검정에 사용되는 측정 자료가 고정 표본점에서 반복적으로 측정되어야 하며, 고정 표본점의 수는 다양한 주요 기후대, 토양 특성, 관리 방법을 포함할 수 있을 정도로 충분해야 한다고 언급하고 있다. 그러나 이러한 자료의 특징은 앞서 설명한 측정에 기반한 산정에 필요한 자료와 거의 동일하며, IPCC 지침 또한 다음과 같이 이를 직접적으로 언급하고 있다. “*In addition to model-based approaches, Tier 3 methods afford the opportunity to develop a measurement-based inventory using a similar monitoring network as needed for model evaluation.*” 즉, 모델에 기반한 산정과 그 검증에 사용되는 자료는 측정에 기반한 산정에도 사용될 수 있고, 그 반대의 경우도 가능하다는 것이다. 다시 말해 모델 기반의 산정에도 측정 기반의 산정과 비슷한 수준의 측정 자료가 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 IPCC 지침은 불확실성과 측정 비용 감소를 위해 가능하면 측정 기반의 산정과 모델 기반의 산정을 모두 활용하라고 권고하고 있다.

3.2. 다른 국가 산림지 부문 NIR

IPCC 지침이 Tier 3 수준의 산정에 요구하는 요건을 요약하면 크게 (1) 측정 기반의 산정과 모델 기반의 산정을 함께 활용, (2) 탄소 저장량의 시간에 따른 비선형적 변화 고려, (3) 다양한 기후, 토양 환경, 관리 방법이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향 고려, (4) 측정 자료의 공간 보간, (5) 측정 자료의 시간 보간, (6) 탄소 저장고 간의 탄소 이

Table 1. Tier 3 criteria for the land use, land use change, and forestry sector described in the international panel on climate change good practice guideline (IPCC, 2006, 2019).

No.	Tier 3 criteria	U.S.	Canada	Sweden
1	Integrating measurement- and model-based approaches	O	O	△
2	Non-linear changes in carbon stock over time	O	O	△
3	Impacts of climate, soil physicochemical properties, and management on changes in carbon stock over time	△	O	△
4	Spatial interpolation of measurement data	△	X	X
5	Temporal interpolation of measurement data	O	O	O
6	Carbon transfer between carbon pools as well as between atmosphere and land	X	O	X
7	Verification and validation	△	O	X

*O: Fully addressed; △: Partially addressed; X: Not addressed

동 고려, (7) 다량의 측정 자료를 이용한 검증 및 검정 등 일곱 가지이다. 이러한 요건에 초점을 맞추어 다른 국가 산림지 부분 NIR을 분석하였다(Table 1).

3.2.1. 미국

미국은 NFI와 탄소 저장량 변화를 모의하는 Forest Carbon Accounting Framework (FCAF)를 함께 활용한다(Table 1; No. 1; EPA, 2023). 미국 본토에 설치된 NFI 표본점 개수는 약 130,000개이며, 하나의 표본점이 약 2,400 ha의 면적을 대표한다. 반복 측정 주기는 NFI 조사 차수(cycle)와 주(state)에 따라 다르며 일반적으로 5년에서 7년 사이이다. 모든 표본점에서 입목 측정과 고사입목(Standing dead wood)이 측정되지만, 쓰러진 도목(Downed dead wood), 낙엽층, 토양 탄소 등은 16개의 표본점 중 하나에서만 측정된다. 이 때문에 미국은 랜덤포레스트 모델에 기반한 공간 보간 기법과 산림 유형, 기온, 강수량, 고도, 토양 특성 등의 정보를 이용하여 모든 NFI 표본점의 쓰러진 도목(Smith et al., 2022), 낙엽층(Domke et al., 2016), 토양 탄소(Domke et al., 2017)를 추정하고 있다. 그러나 표본점과 표본점 사이의 산림에 대한 공간 보간은 이루어지지 않으며, 표본점 하나가 그대로 2,400 ha의 면적을 대표한다고 가정한다(Table 1; No. 4).

FCAF는 크게 토지이용변화 모듈(Land use dynamics module)과 임분동태 모듈(Forest dynamics module)로 구성되며 NFI 표본점 각각의 탄소 저장량과 그 변화를 계산한다(Coulston et al., 2015). 토지이용변화 모듈은 연간 토지이용변화율을 계산하고, 임분동태 모듈은 산림지의 연간 탄소 저장량 변화를 추정한다. FCAF의 임분동태 모듈은 행렬 모델(Matrix model)로 구분된다. 이 행렬 모델은 입목 직경, 수관 면적 등의 임분 구조를 여러 개의 단계로 구분하고, 시간에 따른 임분 구조 단계 변화를 모의하는 특징이 있다(Liang and Picard, 2013). 임분동태 모듈은 임분 구조와 임령을 고려하여 임분을 26개의 임령 단계(Age class; 0년부터 125년까지 5년 간격)로 구분하고, (1) 임령 단계별 산림 면적 행렬(26×1 ; ha), (2) 임령 단계별 단위면적당 탄소 저장량 변화 행렬(1×26 ; $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), (3) 단위시간당 임령 단계 변화 행렬(26×26 ; $\text{Age class year}^{-1}$)을 이용하여 연간 탄소 저장량 변화(Mg C year^{-1})를 추정한다. 그리고 이 행렬들의 각 항, 즉 모수는 NFI 자료를 이용해 계산되며, NFI 자료가 갱신될 때마다 주기적으로 조정되어 사용된다. FCAF는 이러한 구조를 통해 5년에서 7년 주기로 측정되는 NFI 자료를 시간적으로 보간하고

(Table 1; No. 5), 임령에 따라 탄소 저장량이 비선형적으로 변화하는 경향을 반영한다(Table 1; No. 2).

미국 NFI 표본점은 기후, 토양 환경, 관리 방법 등 다양한 요인이 나타나는 미국 산림 전체에 고르게 분포하고 있다. 그러나 FCAF의 수식은 이러한 요인이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 고려하지 않는다. 따라서 기후, 토양 환경, 관리 방법 등이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향은 NFI 반복 측정 주기(5년에서 7년)에 맞추어 선형적으로 부분 반영된다(Table 1; No. 3). 아울러 FCAF는 탄소 저장고의 저장량 변화는 모의하지만, 탄소 저장고 사이의 탄소 이동은 모의하지 않는다(Table 1; No. 6). 예를 들어 FCAF는 낙엽층과 토양 탄소의 연간 저장량 변화는 추정하지만, 낙엽층이 물리적으로 파편화되어 토양 탄소로 유입되는 양은 추정하지 않는다. 즉, 낙엽층의 탄소 저장량 변화가 토양 탄소의 저장량 변화에 영향을 미치지 않는다.

미국의 NFI는 조사자 간의 측정 표준 통일, 동일한 표본점에 대한 중복 측정, 측정 기록 간의 상호 비교 등을 통해 지속적으로 품질 보증 및 품질 관리 과정을 거치고 있다. 아울러 NFI 자료를 통해 추정된 탄소 저장량을 다른 산림자원통계 자료와 비교하였으며(Oswalt et al., 2019), 측정 자료의 분산과 모델의 평균 제곱 오차를 이용하여 탄소 저장량 추정의 불확실성을 계산하였다. 그러나 미국 NIR, NIR 부록, 관련 기관(USDA Forest service)의 보고서, 관련 논문(Coulston et al., 2015) 등은 모두 검증 및 검정 과정에 대한 상세 내용을 기재하지 않고 있으며, 추정 결과와 측정 결과를 시각적으로 비교하여 제시하지 않았다. 미국 NIR은 추후 산정 시스템을 개선하고, 불확실성 추정 방법론을 고도화할 예정이라고 언급하였다. 따라서 현재로서는 미국이 IPCC 지침이 요구하는 검증 및 검정 절차를 온전히 따른다고 보기 어렵다고 판단된다(Table 1; No. 7).

3.2.2. 캐나다

캐나다는 National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System (NFCMARS)를 산정에 활용한다. NFCMARS는 NFI와 탄소 저장량 변화를 모의하는 모델, Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector 3 (CBM-CFS3)를 포함한다(Table 1; No. 1; ECCC, 2023). NFI 표본점 개수는 약 26,000개이며, 모든 표본점에서 항공 또는 위성 사진이 수집된다(NFI, 2021; Vidal et al., 2016). 그러나 모든 NFI 표본점을 대상으로 현지조사를

수행하지 않고, 1,114개 NFI 표본점에서만 입목 축적, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 등이 10년 주기로 반복 측정된다. 캐나다의 산림 면적(Forest land; 약 360,000,000 ha)을 고려하면 현지조사가 수행되는 표본점 하나가 약 330,000 ha의 면적을 대표하게 되지만, 이를 보완할 공간 보간이 수행되었는지는 확인할 수 없었다(Table 1; No. 4).

Kurz et al. (2009)은 CBM-CFS3가 IPCC 지침에 따라 개발된 모델이라 언급하고 있으며, 실제로 미국 및 스웨덴을 포함하여 Tier 3 수준을 이용하는 다른 국가들에 비해 Tier 3 수준의 산정 요건을 많이 충족하고 있다(Table 1). CBM-CFS3는 수확표 기반의 입목 축적 상대성장식과 임령을 이용하여 연간 입목 바이오매스 탄소 저장량 변화를 추정한다. 이 때 수확표는 다양한 산림 경영 관련 기관 및 산업에서 구축된 자료를 종합한 것이며, 입목 축적을 탄소 저장량으로 변환하는 수식은 캐나다에서 조사된 약 133,000개의 표본점 자료를 종합한 보고서를 준용하고 있다(Boudewyn et al., 2007).

탄소 저장고 간의 탄소 이동과 대기로의 탄소 배출은 고사목, 낙엽낙지물, 분해물 등의 모수를 입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 저장량에 곱하여 연 단위로 계산된다(Table 1; No. 6). 그리고 이와 같은 탄소 이동 및 탄소 배출을 종합한 결과가 연간 탄소 저장량 변화로 계산된다. 이러한 구조를 통해 10년 주기로 측정되는 NFI 자료가 시간적으로 보간되며(Table 1; No. 5), 시간과 임령에 따라 탄소 저장량이 비선형적으로 변화하는 경향이 반영된다(Table 1; No 2).

한편 CBM-CFS3는 지역, 우점수종, 임지생산력에 따라 상대성장식의 모수를 조정하고, 기온 상승에 따른 분해율 증가를 고려하여 기후와 토양 환경이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 반영한다(Table 1; No 3). 아울러 교란 행렬(Disturbance matrix)을 활용하여 벌채 및 간벌 등의 관리 방법과 자연 재해의 유형 및 강도가 탄소 저장고 사이의 탄소 이동과 탄소 배출 변화에 미치는 영향을 추정한다. 이 때 산림 경영과 관련된 통계 자료와 자연 재해의 유형, 위치, 발생 면적을 추정하기 위해 원격 탐사 자료가 활용된다(Kurz et al., 2013).

캐나다의 NIR은 상세한 모델 검증 및 검증 과정을 확인할 수 있도록 관련 참고문헌을 제시하고 있다(Table 1; No. 7). CBM-CFS3의 추정 불확실성은 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 계산되었으며(Metsaranta et al., 2017), CBM-CFS3의 탄소 저장량 추정 결과는 약 700개의 NFI 표본점의 측정 결과와 비교되었다(Shaw et al., 2014). 이

때 비교에 사용된 측정 결과는 모델 추정에 이용된 입력 자료와 완전히 독립적으로 구성되었으며, 상관계수(r)를 이용하여 추정 결과와 측정 결과 사이의 관련성을 표현하였다. 아울러 CBM-CFS3는 베이지언 통계 기반 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 기법을 이용하여 모수를 보정하였으며, 이에 따른 불확실성 감소가 확인되었다(Hararuk et al., 2017).

3.2.3. 스웨덴

스웨덴의 NIR은 NFI와 함께 모델을 산정에 활용한다고 언급하나, 모델의 역할은 크지 않고 NFI와 측정차이법에 기반한 산정을 수행하고 있다(Table 1; No. 1). NFI 표본점 개수는 약 30,000개이며, 스웨덴 산림 면적(약 280,000,000 ha)를 고려하면 하나의 표본점이 약 9,300 ha를 대표한다. 표본점의 밀도는 남쪽보다 북쪽이 더 낮게 계획되었는데, 이는 북쪽 산림의 자기상관(autocorrelation)이 높아 조밀한 표본점 설계가 필요하지 않기 때문이다(Fridman et al., 2014). 모든 표본점에서 5년 주기로 입목 축적과 고사목을 반복 측정하고 있으며, 두 개의 표본점 중 하나에서 표토를, 네 개의 표본점 중 하나에서 심토를 채취하여 10년 주기로 반복 측정한다. 그러나 표본점과 표본점 사이의 산림에 대한 공간 보간은 물론, 토양 측정 자료가 없는 표본점에 대한 공간 보간도 수행되지 않는다(Table 1; No. 4).

입목 바이오매스 탄소 저장량은 표본점에서 조사된 수종 및 흉고직경과 바이오매스 상대성장식을 이용하여 계산된다. 고사목 탄소 저장량은 표본점에서 조사된 고사목 축적에 수종 및 부후등급별 목재밀도와 탄소 함량비를 곱해서 계산된다. 토양 탄소 저장량은 표토 및 심토의 탄소 함량비, 용적밀도, 석력함량 등을 이용해서 계산된다. 입목 바이오매스, 고사목, 토양 탄소 저장량 변화는 측정차이법을 따라 이전 시기의 탄소 저장량과 그 이후 시기의 탄소 저장량 차이를 반복 조사 주기로 나눠서 계산된다. 추가로 목재 수확 이후 남겨진 지하부 바이오매스 탄소 저장량 변화를 추정하기 위해 분해 모델이 함께 활용된다(Melin et al., 2009).

낙엽층 탄소 저장량 변화는 크게 (1) 고사목에서 유래한 가지(직경 1 ~ 10 cm), (2) 낙엽낙지량, (3) 파편화된 낙엽(2 mm미만 입자)으로 구분하여 산정된다. 고사목에서 유래한 가지의 탄소 저장량은 고사목 탄소 저장량의 15%라고 가정되나, 가정의 근거는 제시하지 않았다. 낙엽낙지량은 낙엽낙지 모델과 수종, 흉고직경, 흉고단면적, 임령,

위도 등을 이용하여 추정된다(Berg, Albrektson, et al., 1999; Berg, Johansson, et al., 1999). 낙엽낙지량은 1년뒤 표토의 유기물층(O층)에 포함되어 측정된다고 가정되나, 가정의 근거는 제시하지 않았다. 그리고 파편화된 낙엽은 표토의 유기물층 또는 부식층(H층)에 포함되어 측정된다고 언급하였다.

5년 또는 10년 주기로 측정되는 NFI 자료를 시간적으로 보간하기 위해 표본점 각각에 대해 외삽 및 내삽 방법이 적용된다(Table 1; No. 5). 그러나 외삽 및 내삽 기간 동안의 탄소 저장량 변화량은 기존의 조사 결과와 동일하다고 가정하기 때문에, 반복 측정 주기 내에서는 탄소 저장량의 비선형적 변화가 고려되지 않는다(Table 1; No. 2).

스웨덴의 NFI 표본점은 기후, 토양 환경, 관리 방법 등 다양한 요인이 나타나는 산림 전체에 분포하고 있으나, 스웨덴의 산정 시스템은 이러한 요인이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 고려하지 않는다. 따라서 기후, 토양 환경, 관리 방법 등이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향은 NFI 반복 측정 주기에 맞추어 5년 또는 10년 주기로 선형적으로 부분 반영된다(Table 1; No. 3). 또한 스웨덴의 산정 시스템은 미국과 마찬가지로 탄소 저장고 사이의 탄소 이동을 모의하지 않는다(Table 1; No. 6).

스웨덴의 NIR은 탄소 저장량 변화 추정의 불확실성을 평가하기 위해 추정 결과의 분산을 제시한다. 그러나 추정 결과와 측정 결과를 비교하지 않으며, 추정에 사용된 방법론에 따른 불확실성 요인은 언급하지만 그 불확실성을 정량화하지 않았다. 스웨덴의 NIR 및 그 부록을 비롯하여 어떤 문헌에서도 IPCC 지침이 요구하는 검증 및 검증 절차에 대한 상세 내용을 찾을 수 없었다. 또한 낙엽층 탄소 저장량 변화와 관련하여 몇 가지 가정을 하고 있으나, 그 가정의 근거를 제시하지 않았다. 따라서 따라서 스웨덴이 IPCC 지침이 요구하는 검증 및 검증 절차를 따른다고 보기 어렵다(Table 1; No. 7).

3.2.4. 비교 분석

본 연구의 목적 중 하나는 IPCC 지침과 다른 국가의 NIR을 검토하여, Tier 3 수준의 산정으로 인정받기 위한 요건을 파악하는 것이다. 그러나 미국, 캐나다, 스웨덴 모두 동일한 IPCC 지침을 따름에도 불구하고 국가마다 IPCC 지침이 제시하는 요건을 충족하는 정도가 상이하였다(Table 1). 즉 IPCC 지침에 대한 해석이 국가별로 다르

다. 따라서 본 연구에서 정리한 Tier 3 수준의 산정 요건은 Tier 1, 2와 Tier 3를 구분하는 명확한 기준으로 받아들이기 보다는, 보다 신뢰성 있는 산정을 위한 요건으로 활용하는 것이 더 타당할 것이다.

아울러 본 연구에서 분석한 국가 중 IPCC 지침의 Tier 3 수준 산정 요건을 모두 충족하는 국가는 없는 것으로 나타났다(Table 1). 특히 캐나다는 다른 요건은 모두 충족하지만, 미국과 스웨덴에 비해 적은 밀도의 NFI 표본점을 운용 중임에도 공간 보간을 수행하지 않았다. 미국과 스웨덴은 캐나다보다 더 많은 측정 자료를 확보하였으나, 모델 검증에는 비교적 간단한 방법론만 활용하였다. 그러나 이들 세 국가는 입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 등 모든 탄소 저장고에 대해 산정을 완료했다는 공통점이 있다. 많은 측정 자료를 구축하고, 고도화된 방법론을 산정에 적용하는 것은 시간과 인력의 문제임으로 단기간에 해결할 수 없다. 따라서 이들 국가는 IPCC 지침에 제시된 Tier 3 수준의 산정 요건을 충족하거나, 더욱 고도화된 방법론을 사용하는 것보다는 보유하고 있는 자료와 비교적 간단한 방법론을 활용하여 완전한 통계 산정을 하는 것을 우선시하였다고 판단된다.

실제로 캐나다는 IPCC 지침을 참고하되, 산정에 활용할 수 있는 최대한의 자료와 방법론을 이용하려 노력하였다. 캐나다는 IPCC 지침보다 더 고도화된 수준의 방법론을 활용했다고 판단할 수 있는데, 이는 2017년 캐나다가 IPCC 지침이 구체적으로 언급하지 않은 Monte Carlo 시뮬레이션과 MCMC 기법을 이용했고, 실제로 2019 IPCC 개선본이 이를 적절한 불확실성 평가 및 모델 고도화 사례로 인정하고 예시로서 본문에 포함시켰기 때문이다.

한편 IPCC 지침에 대한 각국의 해석에 따라 산정 수준을 표현하는 방식이 달라지는 것으로 판단된다. 스웨덴은 미국과 캐나다에 비해 IPCC 지침이 제시하는 Tier 3 요건을 덜 반영하고 있지만, Tier 3 수준의 방법론을 이용하고 있다고 NIR에 수차례 명시하고 있다. 반면, 미국의 NIR은 스웨덴보다 고도화된 모델을 이용하고, 스웨덴과 캐나다보다 높은 밀도의 NFI 표본점을 운용하고 있지만, Tier 3 수준의 방법론을 이용하고 있다고 명시하지 않는다. 미국의 NIR내 다른 LULUCF 부문은 Tier 3 수준의 방법론을 따른다고 명시하는 것으로 보아, 미국은 산림지 부문의 Tier 3 수준의 산정을 위해 산정 체계를 보다 고도화할 필요가 있다고 판단하거나 산림지 부문에 대한 Tier 수준의 명시가 불필요하다고 판단하는 것으로 보인다.

3.3. 국내 관련 모델 개발 및 활용 사례

국내에서 산림 탄소 저장량과 그 변화량을 추정하는 모델을 개발하고 활용한 연구가 여러 차례 진행되었다. 2010년 이전에는 토양 탄소 순환을 모의하는 Yasso가 국내 산림에 적용되었고(Lee et al., 2009), 2010년대 초기에는 KFSC라 불리는 한국형 산림 토양 탄소 순환 모델을 개발하고 활용하였다(Park, Lee, et al., 2013; Park, Yi, et al., 2013; Yi et al., 2013). 그러나 Yasso와 KFSC는 각각 광릉의 천연소나무림과 전국의 소나무림을 대상으로 하였기 때문에, 모의 결과가 공간적으로 우리나라 산림을 대표하기 어려워 산정에 활용할 수 없는 한계가 있다.

이후 KFSC는 FBDC라 불리는 모델로 고도화되어 토양 탄소 뿐만 아니라, 입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층의 탄소 저장량과 그 변화량도 모의할 수 있게 되었다(Lee et al., 2014). FBDC는 캐나다의 CBM-CFS3와 마찬가지로 수확표 기반의 입목 측정 상대생장식과 임령을 이용하는 것이 특징이며, 고사율과 낙엽낙지율, 그리고 분해율과 같은 모수는 국내의 관련 연구 결과를 토대로 임상별(소나무림, 굴참나무림 등)로 결정되었다. FBDC는 Yasso 및 KFSC와 달리 우리나라 산림 전체를 대상으로 모의가 가능하며, 1954년부터 2012년까지 모의한 결과가 기존 연구 사례, 임업통계연보, NFI 자료와의 비교를 통해 부분적으로 검증되었다. 이후 FBDC는 국내뿐만 아니라, 부탄(Lee, Dorji, et al., 2016), 터키(Lee, Tolunay, et al., 2016), 브루나이(Lee J et al., 2017) 등 다양한 국가에 확대 적용되었다. 아울러 FBDC는 산림 경영이 탄소 저장량과 그 변화에 미치는 영향을 평가하는 데에도 활용되었다(Lee, Lim, et al., 2018; Lee, Makineci, et al., 2018; Lee et al., 2020).

그러나 FBDC는 Tier 3 수준의 산정을 위한 요건을 모두 충족하고 있다고 보기 어렵다(Table 1). 먼저 FBDC는 고사율, 낙엽낙지율, 분해율 등의 모수가 같은 임상끼리는 모두 동일하다고 가정하였고, 따라서 다양한 기후, 토양 환경, 관리 방법이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 충분히 고려하지 못하고 있다(Table 1; No 3). 특히 FBDC는 지역에 따른 기온 차이가 분해율에 미치는 영향은 반영했지만, 그 외의 다른 환경 인자가 미치는 영향은 반영하지 않았다.

아울러 FBDC는 모의 결과를 측정 자료로 검증하는 과정을 엄밀히 거쳤다고 보기 어렵다(Table 1; No 7). Lee et al. (2014)는 FBDC의 입목 바이오매스 탄소 저장량 모의 결과를 우리나라 전체 산림의 총 입목 축적(Volume)으

로 변환하고, 그 변환된 값을 임업통계연보의 총 입목 축적과 비교하여 검증하였다. 그러나 이러한 변환을 거치지 않고, FBDC의 모의 결과를 NFI 자료의 입목 바이오매스의 탄소 저장량 값과 그대로 비교하는 것이 더 타당하다. 또한 Lee et al. (2014)는 낙엽층 및 토양 탄소 저장량 모의 결과를 행정구역별(서울특별시, 경기도, 강원도 등)로 평균하고, 이를 NFI 측정 결과와 비교하였다. 그러나 이러한 비교는 동일한 행정구역 내에 존재하는 산림은 동일한 탄소 저장량을 보유한다고 가정하는 것이 된다. 보다 타당한 검정을 위해서는 모의 결과를 행정구역별로 평균한 값이 아니라, NFI 표본점 각각에 대한 모의 결과를 해당 표본점에서 측정된 결과와 일대일로 비교하여, 모델이 다양한 기후, 토양 환경, 관리 방법이 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 고려하고 있는지 판단할 수 있게 해야 한다(Table 1; No 3).

2020년대에 들어서 FBDC는 탄소 뿐 아니라 질소 순환과 질소 순환이 탄소 순환에 미치는 영향까지 모의할 수 있는 과정기반모형 FBD-CAN으로 고도화 되었다(Kim, Luo, et al., 2021). 특히 FBD-CAN은 캐나다의 CBM-CFS3와 마찬가지로 NFI자료와 MCMC 기법을 이용하여 모수를 추정하였으며, 미국의 FCAF와 마찬가지로 행렬 모델로 분류된다. FBD-CAN은 산림 녹화 사업이 탄소 및 질소 저장량과 그 변화에 미치는 영향을 추정하고, NFI 자료와의 비교를 통해 검증되었다(Kim, Noulékoun, et al., 2021). 또한 FBD-CAN는 미래의 기후변화 및 인간 활동이 우리나라 산림의 탄소 및 질소 저장량에 미치는 영향을 추정하였고(Kim et al., 2022), 다양한 국외 모델과의 상호 비교 프로젝트를 통해 민감도 분석과 검증 과정을 거쳤다(Hou et al., 2023). 그러나 Kim, Luo, et al. (2021)는 낙엽층 및 토양 질소 저장량을 측정할 일부 NFI 표본점에 대해서만 FBD-CAN의 결과를 검증하고, 질소 저장량을 측정하지 않은 다른 NFI 표본점에 대한 검증 결과는 제시하지 않아 모델 검증 과정을 온전히 문서화했다고 볼 수 없다(Table 1; No 7).

일본에서 개발된 VISIT을 이용하여 1981년부터 2010년까지 남한과 북한 산림의 GPP 및 NPP가 추정되었다(Cui et al., 2014). 해당 연구는 토지 이용 변화에 따른 산림 탄소 수지 변화를 모의하였으며, 모의 결과는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer GPP/NPP Project (MODIS17) 자료와 비교하여 검증되었다. 그러나 MODIS17 자료 역시 광합성유효복사(Photosynthetically active radiation)와 온도 및 수분과 관련 모수를 이용하여 추정된 값이며, 해당 자료를

모델 검정 자료로 활용하기 위해서는 국내 플렉스 타워에서 획득한 측정값과 비교하는 별도의 과정이 추가로 필요하다. 아울러 VISIT은 우리나라의 산림 부문 산정에 이용되고 있는 NFI 자료를 활용하지 않았고, 모의 결과를 NFI자료를 통해 검정하지도 않았기 때문에 측정 기반의 산정과 모델 기반의 산정을 함께 활용한다고 보기 어렵고(Table 1; No 1), 다량의 측정 자료를 이용해 검정 과정을 거쳤다고 볼 수 없다(Table 1; No 7).

캐나다에서 개발된 CBM-CFS3을 이용하여 1992년부터 2022년까지 우리나라 산림 전체의 입목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 저장량과 그 변화량이 모의되었다(Kim et al., 2017). 해당 연구는 국내에서 활용할 수 있는 임상도, NFI 자료 등을 모델의 입력 자료로 활용하였고, 산림청의 지속가능한 산림경영 지침에 따라 간벌 및 벌채가 탄소 순환에 미치는 영향도 고려하였다. 그러나 낙엽낙지물, 분해물 등의 계수를 CBM-CFS3이 제공하는 기본값(default)을 사용하여 우리나라 임상에서 나타나는 탄소 순환 과정을 반영하고 있지 않다(Table 1; No 3). 또한 검정 자료로 전국적으로 평균한 NFI 측정값을 사용했기 때문에 FBDC와 마찬가지로 IPCC 지침이 제시하는 타당한 검정 과정을 거쳤다고 보기 어렵다(Table 1; No 7).

KO-G-Dynamic을 이용하여 1961년부터 2014년까지의 탄소 저장량 변화(Kim et al., 2019)와 다양한 산림경영 시나리오가 미래 산림 탄소 흡수(Hong et al., 2022)에 미치는 영향이 모의되었다. 그러나 KO-G-Dynamic은 입목 바이오매스 탄소 저장량만 모의할 수 있고, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 등 다양한 탄소 저장고 사이의 탄소 이동을 모의하지 않는다는 한계가 있다(Table 1; No 6).

그 외에 Cho et al. (2021)은 머신러닝과 플렉스 타워 측정 자료를 이용하여 2000년과 2018년 사이의 GPP와 NEE를 추정하였다. 그러나 해당 연구에서 모델 개발과 검정에 사용된 플렉스 타워의 개수는 10개에 불과하여 추정 결과가 우리나라 산림 전체를 대표한다고 보기 어렵다. 또한 FBDC 및 CBM-CFS3를 사용한 연구와 마찬가지로 NFI 자료를 이용한 검정에서 전국적으로 평균한 NFI 측정값을 이용했기 때문에 IPCC 지침이 제시하는 타당한 검정 과정을 거쳤다고 보기 어렵다(Table 1; No 7). 한편 Yu et al. (2023)은 머신러닝 기반 메타 모델과 NFI자료를 이용하여 미래 기후변화 시나리오에 따른 전국 산림 탄소 저장량을 추정하였으나, 측정 자료를 이용한 모델 검정 결과를 문서화하지 않았다(Table 1; No 7).

3.4. Tier 3 수준의 산정에 활용할 수 있는 국내 자료

Tier 3 수준의 산정에 NFI 자료를 활용할 수 있다. 우리나라 NFI는 약 4,500개의 표본점으로 구성되어 있다. 고정 표본점이 설치된 2006년부터 각 표본점에서 5년 주기로 입목 바이오매스와 고사목이 반복 측정되고 있으며, 4개의 표본점 중 하나에서 10년 주기로 낙엽층과 토양 탄소를 반복 측정되고 있다. 현재 5차(2006~2010), 6차(2011~2015), 7차(2016~2020) NFI가 완료되었고, 8차(2021~2025) NFI가 진행 중이다. 우리나라의 표본점 밀도는 미국, 캐나다, 스웨덴보다 높으며, 반복 측정 주기는 스웨덴과 유사하다. NFI 자료는 측정에 기반한 Tier 3 수준의 산정에 활용되는 자료이나, IPCC 지침이 언급한 바와 같이 모델과 연계되어 사용되어야 더욱 신뢰성이 높다. 또한 모델과 연계되어 활용되는 경우 모델의 모수 보정과 검정에 NFI 자료를 이용할 수 있다.

국내에 플렉스 타워 시스템이 존재하지만, 현재로서는 Tier 3 수준의 산정에 직접적으로 활용하기는 어려울 것으로 생각된다. 우리나라는 산림에 설치된 플렉스 타워의 개수가 약 10개(광릉 활엽수림, 광릉 침엽수림, 태화산 침엽수림, 태화산 활엽수림, 안면도, 완도, 제주도, 홍천 매화산, 삼척 검봉산, 평창 가리왕산)에 불과하고, 플렉스 관측의 대표면적은 약 1 km²로 좁은데다, 자료 수집 기간도 짧기 때문이다(Cho et al., 2021; Lee B et al., 2017). 이에 따라 우리나라 산림지에서 나타나는 다양한 토지 이용과 관리, 그리고 환경 요인이 이산화탄소 흡수 및 배출에 미치는 영향을 충분히 고려하기 어렵다. 아울러 플렉스 타워 시스템에 기반한 모델을 개발하고 산정에 활용하더라도, 국내에서 얻을 수 있는 가장 광범위한 측정 자료인 NFI 자료를 통해 다시 검정되어야 그 신뢰성을 인정받을 수 있다. 따라서 플렉스 타워의 분포가 더 다양해지고, 충분한 자료 수집 기간이 확보되기 전까지는 Tier 3 수준의 산정에 직접 활용하기 보다는 플렉스 타워의 측정 결과를 NFI에 기반한 추정 결과와 비교하는 형태로 활용하는 것이 더 적합할 것으로 판단된다.

그 외에도 기후 정보, 임상도, 토양 입지도 등의 자료를 NFI 자료의 공간 보간과 모델에 활용할 수 있다. 기후 정보는 연평균기온, 연강수량 등의 정보뿐만 아니라, 가장 더운 달의 최대기온, 가장 건조한 달의 최대 강수량 등 다양한 정보를 포함할 수 있다. 이러한 기후 정보는 기상청을 통해 획득할 수 있으며, WorldClim과 같은 전지구 기후 정보 공유 시스템을 활용할 수도 있다. 한편 임상도와 산림입지도양도는 산림공간정보서비스를 통해 획득할 수

있다. 임상도의 경우 임상, 임령, 수종 구성 등의 자료를 포함하고, 산림입지토양도는 토성, 토양형, 방위, 경사 등 토양 물리성 자료를 포함한다. 그러나 산림공간정보서비스가 제공하는 임상도와 산림입지토양도도는 군사분계선 근처의 약 350,000 ha에 해당하는 정보가 누락되어 있으므로 사용 시에 유의해야 한다.

아울러 활동자료와 관련하여 사유림 및 국유림 경영정보 시스템, 서울행정정보시스템, 산림자원 통합관리시스템, 조림 숲가꾸기 이력 관리 시스템, 산지정보시스템, 토지이용 규제정보서비스, 한국보호지역 통합 데이터베이스 관리 시스템 등을 활용할 수 있다(Ham et al., 2020). 특히 사유림 및 국유림 경영정보 시스템에는 숲가꾸기, 조림, 벌채지 등에 대한 정보가 2018년 3월 기준으로 약 180만 여건이 등록되어있다. 그러나 이러한 국내 활동자료들 중에는 공간정보, 지적 면적, 작업 면적, 주소 등이 누락되거나 활동자료끼리 중복되는 경우가 있고, 숲가꾸기, 조림, 벌채 등 시업의 유형과 시기가 누락 또는 오기입된 경우도 있다. 따라서 활동자료의 수집 현황을 분명히 파악하고, 이를 정리하는 시스템을 개발할 필요가 있다.

4. 제언

IPCC 지침, 다른 국가의 NIR, 국내 관련 모델 개발 및 활용 사례, 국내 가용 자료 등을 검토한 결과, 현재 우리나라에 구축된 자료와 방법론을 이용해 산림지로 유지된 산림지의 Tier 3 수준의 산정이 가능할 것으로 판단된다. 이의 근거는 다음과 같다. 첫째, 5차부터 7차까지 이어진 NFI를 통해 임목 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소에 대한 반복 측정이 완료되었다. 아울러 우리나라 NFI는 미국, 캐나다, 스웨덴 등 Tier 3 수준의 산정을 수행중인 다른 국가보다 조밀한 표본점 밀도를 가지고 있다. 둘째, 우리나라 산림 탄소 순환을 모의하는 다양한 모델들을 개발하고 활용한 사례가 이미 다수 존재하며 해당 모델을 산정에 활용할 수 있다. 그 중 FBDC, FBD-CAN, 동적성장 모형 등은 NFI 자료를 통해 이미 검증 과정을 거쳤다. 특히 FBDC 및 FBD-CAN은 CBM-CFS3와 유사한 구조를 지니고 있으며, CBM-CFS3와 마찬가지로 MCMC 기법을 이용해 모수를 추정하였고, 미국의 FCAF와 마찬가지로 행렬 모델의 특성을 지닌다. 셋째, 공간 보간에 필요한 기후 정보, 임상도, 산림입지토양도 등의 자료를 활용할 수 있다. 이를 통해 일부 표본점에서만 측정된 낙엽층 및 토양 탄소 자료를 모든 표본점에 대해 공간적으로 확장할 수

있으며, 표본점과 표본점 사이의 산림의 탄소 저장량도 기후, 토양 환경 등의 정보를 이용하여 추정할 수 있다.

우리나라 실정에 맞는 Tier 3 수준의 산정 방법론은 크게 세 가지 과정으로 요약할 수 있다. 첫째, NFI 측정 결과의 오류 및 불확실성을 검토한다. 측정 결과의 불확실성은 그에 기반하여 개발된 모델의 불확실성으로 상속된다. 따라서 측정 자료에서 나타나는 오류와 불확실성 요인을 파악하고 제거하는 것이 우선이다. 측정 자료의 오류는 산점도, 히스토그램 등을 통해 자료를 시각화하여 파악할 수 있다. 측정 결과의 불확실성 검토는 간단하게는 탄소 저장량 변화의 분산을 비교 제시하는 방법이 있으며, 보다 고도화된 방법으로는 Monte Carlo 시뮬레이션을 활용하는 방법이 있다. 이때 다른 국가들과 마찬가지로 처음에는 비교적 간단한 방법론을 활용하여 완전한 통계 산정을 완료하고, 그 이후에 보다 고도화된 방법론을 활용해야 시간과 인력을 효율적으로 사용하면서도 산정의 수준을 점진적으로 고도화시킬 수 있다.

둘째, NFI자료를 공간적으로 보간한다. 낙엽층과 토양 탄소 조사를 시행하지 않는 표본점에 대한 공간 보간이 우선이며, 그 이후에 표본점과 표본점 사이의 산림에 대한 공간 보간을 고려한다. 공간 보간에는 미국과 마찬가지로 랜덤포레스트 모델을 사용할 수 있으며, 그 외에도 regression-kriging이나 Inverse distance weighted 방법론 등을 활용할 수 있다. 이때 우리나라에서는 기후 정보, 임상도, 산림입지토양도 등의 자료를 활용할 수 있으므로, 이러한 자료와 탄소 저장량 변화량 간의 관계를 고려하는 공간 보간 기법을 사용하면 보다 신뢰할 수 있는 공간 보간 결과를 얻을 수 있을 것이다.

셋째, NFI와 함께 활용할 모델을 개발 또는 선택하고, 모수 보정, 검증 및 검정 과정을 거친 다음 산정에 활용한다. 모델은 IPCC 지침이 제시하는 Tier 3 수준의 산정 요건을 만족해야 한다(Table 1; No. 2, 3, 5, 6). 이때 새로운 모델을 개발하기보다 이미 국내 산림에 적용된 사례가 있는 모델을 활용하면 시간과 노력을 절약하면서도 빠르게 산정을 완료할 수 있을 것이다. 그리고 불확실성 감소를 위해 매년 새로 추가되는 NFI를 이용하여 모델의 모수를 지속적으로 보정할 필요가 있으며, 이때 캐나다의 CBM-CFS3 및 FBD-CAN이 활용한 MCMC 기법을 적용할 수 있을 것이다. 추가로 매년 반복되는 모수 보정 및 모델 검정 절차를 컴퓨터 소프트웨어로 자동화한다면, 이에 필요한 시간과 노력을 산정 시스템의 고도화에 활용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 우리나라 실정에 맞는 Tier 3 수준의 산림지 부문 온실가스 인벤토리 산정 방법론을 제시하기 위해 IPCC 지침, 다른 국가의 NIR, 국내 관련 모델 개발 및 활용 사례, 국내 가용 자료 등을 분석하였다. 이러한 결과는 Tier 3 수준의 산정과 관련된 구체적인 지침이 존재하지 않는 상황에서, LULUCF 산림지 부문과 관련된 정부 부처 및 전문가 간 논의를 원활하게 하는 계기가 될 것이다. 또한 우리나라의 산림지 부문 온실가스 인벤토리 산정은 농경지, 초지 등 타 부문의 실시 예로 활용되고 있기에, 본 연구의 결과는 산림지 뿐만 아니라 타 부문의 산정에도 참고할 수 있을 것이다. 아울러 본 연구에서 제시한 Tier 3 수준의 산정 방법론을 따르면, IPCC 지침이 제시한 Tier 3 수준의 요건을 충족할 수 있으며, 시간과 인력을 효율적으로 사용하며 점진적으로 산정의 수준을 고도화시킬 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 국립산림과학원의 파리체제 대응 산림흡수원의 온실가스 감축실적 MRV 체계 개발(FM0200-2023-01-2024)과 국토교통과학기술진흥원의 온실가스 저감을 위한 국토도시공간 계획 및 관리기술 개발(RS-2020-KA158194)과 한국임업진흥원의 간벌과 수확별체가 산림탄소 저장에 미치는 영향 평가 및 예측 모형 개발(RS-2022-KF002024)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Arrhenius S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos Mag* 41(251): 237-276. doi: 10.1080/14786449608620846
- Berg B, Albrektson A, Berg MP, Cortina J, Johansson MB, Gallardo A, Madeirag M, Pausash J, Kratzki W, Vallejo R, et al. 1999. Amounts of litter fall in some pine forests in a European transect, in particular Scots pine. *Ann For Sci* 56(8): 625-639. doi: 10.1051/forest:19990801
- Berg B, Johansson MB, Tjarve I, Gaitnieks T, Rokjanis B, Beier C, Andreas R, Thomas B, Axel G, Gerstberger P. 1999. Needle litterfall in a North European spruce forest transect. Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Boudewyn PA, Song X, Magnussen S, Gillis MD. 2007. Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada. Victoria, Canada: Canadian Forest Service. Information Report BC-X-411.
- Callendar GS. 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Q J R Meteorol Soc* 64(275): 223-240. doi: 10.1002/qj.49706427503
- Campbell EE, Paustian K. 2015. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: A review. *Environ Res Lett* 10(12): 123004. doi: 10.1088/1748-9326/10/12/123004
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WBC, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC, et al. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob Change Biol* 20(10): 3177-3190. doi: 10.1111/gcb.12629
- Cho S, Kang M, Ichii K, Kim J, Lim JH, Chun JH, Park CW, Kim HS, Choi SW, Lee SH, et al. 2021. Evaluation of forest carbon uptake in South Korea using the national flux tower network, remote sensing, and data-driven technology. *Agric For Meteorol* 311: 108653. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108653
- Coulston JW, Wear DN, Vose JM. 2015. Complex forest dynamics indicate potential for slowing carbon accumulation in the southeastern United States. *Sci Rep* 5(1): 8002. doi: 10.1038/srep08002
- Cui G, Lee WK, Kim D, Lee EJ, Kwak H, Choi HA, Kwak DA, Jeon S. 2014. Estimation of forest carbon budget from land cover change in South and North Korea between 1981 and 2010. *J Plant Biol* 57(4): 225-238. doi: 10.1007/s12374-014-0165-3
- Domke GM, Perry CH, Walters BF, Nave LE, Woodall CW, Swanston CW. 2017. Toward inventory-based estimates of soil organic carbon in forests of the United States. *Ecol Appl* 27(4): 1223-1235. doi: 10.1002/eap.1516

- Domke GM, Perry CH, Walters BF, Woodall CW, Russell MB, Smith JE. 2016. Estimating litter carbon stocks on forest land in the United States. *Sci Total Environ* 557-558: 469-478. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.090
- ECCC (Environment and Climate Change Canada). 2023. National inventory report 1990-2021: Greenhouse gas sources and sinks in Canada. Ottawa, Canada: ECCC.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2023. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2021. Washington, DC: EPA.
- Fridman J, Holm S, Nilsson M, Nilsson P, Ringvall AH, Ståhl G. 2014. Adapting National Forest Inventories to changing requirements - The case of the Swedish National Forest Inventory at the turn of the 20th century. *Silva Fenn* 48(3): 1095. doi: 10.14214/sf.1095
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2020. The second national greenhouse gas inventory comprehensive management plan (2020-2024). Cheongju, Korea: GIR.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2023. 2023 National Inventory Report. Cheongju, Korea: GIR.
- Ham B, Song C, Park E, Choi SE, Lee WK. 2020. Development of forest activity data and forest management rate for national greenhouse gas inventory in the forest sector (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 11(1): 53-63. doi: 10.15531/KSCCR.2020.11.1.53
- Han SH, Lee SJ, Chang H, Kim S, Kim R, Jeon EC, Son Y. 2017. Priority for developing emission factors and quantitative assessment in the forestry sector (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 8(3): 239-245. doi: 10.15531/kscrcr.2017.8.3.239
- Hararuk O, Shaw C, Kurz WA. 2017. Constraining the organic matter decay parameters in the CBM-CFS3 using Canadian National Forest Inventory data and a Bayesian inversion technique. *Ecol Modell* 364: 1-12. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.09.008
- Hollinger DY, Richardson AD. 2005. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiol* 25(7): 873-885. doi: 10.1093/treephys/25.7.873
- Hong M, Song C, Kim M, Kim J, Lee SG, Lim CH, Cho K, Son Y, Lee, WK. 2022. Application of integrated Korean forest growth dynamics model to meet NDC target by considering forest management scenarios and budget. *Carbon Balance Manag* 17(1): 5. doi: 10.1186/s13021-022-00208-8
- Hou E, Ma S, Huang Y, Zhou Y, Kim HS, López-Blanco E, Jiang L, Xia J, Tao F, Williams C, et al. 2023. Across-model spread and shrinking in predicting peatland carbon dynamics under global change. *Glob Change Biol* 29(10): 2759-2775. doi: 10.1111/gcb.16643
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for policymakers. In: The Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds). *Climate change 2023: Synthesis report*. Geneva, Switzerland: IPCC. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Keeling CD. 1970. Is carbon dioxide from fossil fuel changing man' environment? *Proc Am Philos Soc* 114(1): 10-17.
- Kim H, Lee J, Han SH, Kim S, Son Y. 2018. Approaches for developing a forest carbon and nitrogen model through analysis of domestic and overseas models (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 107(2): 140-150.
- Kim HS, Luo Y, Noulékoun F, Noh NJ, Lee J, Son Y. 2021. Carbon and nitrogen turnover times of South Korean forests estimated via data-model fusion. *J Geophys Research: Biogeosci* 126(10): e2021JG006368. doi: 10.1029/2021JG006368
- Kim HS, Noulékoun F, Noh NJ, Son YW. 2021. Impacts of the national forest rehabilitation plan and human-induced environmental changes on the carbon and nitrogen balances of the South Korean forests. *Forests* 12(9): 1150. doi: 10.3390/f12091150

- Kim HS, Noulèkoun F, Noh NJ, Son YW. 2022. Future projection of CO₂ absorption and N₂O emissions of the South Korean forests under climate change scenarios: Toward net-zero CO₂ emissions by 2050 and beyond. *Forests* 13(7): 1076. doi: 10.3390/f13071076
- Kim M, Kraxner F, Son Y, Jeon SW, Shvidenko A, Schepaschenko D, Ham BY, Lim CH, Song C, Hong M, et al. 2019. Quantifying impacts of national-scale afforestation on carbon budgets in South Korea from 1961 to 2014. *Forests* 10(7): 579. doi: 10.3390/f10070579
- Kim M, Lee W, Kurz W, Kwak D, Morken S, Smyth C, Ryu D. 2017. Estimating carbon dynamics in forest carbon pools under IPCC standards in South Korea using CBM-CFS3. *iForest - Biogeosc For* 10(1): 83-92. doi: 10.3832/ifor2040-009
- Kurz WA, Dymond CC, White TM, Stinson G, Shaw CH, Rampley GJ, Smyth C, Simpson BN, Neilson ET, Trofymow JA, et al. 2009. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecol Modell* 22(4): 480-504. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018
- Kurz WA, Shaw CH, Boisvenue C, Stinson G, Metsaranta J, Leckie D, Dyk A, Smyth C, Neilson ET. 2013. Carbon in Canada's boreal forest - A synthesis. *Environ Rev* 21(4): 260-292. doi: 10.1139/er-2013-0041
- Lee AR, Noh NJ, Yoon TK, Lee SK, Seo KW, Lee WK, Cho YS, Son Y. 2009. Estimation of forest soil carbon stocks with Yasso using a dendrochronological approach (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 98(6): 791-798.
- Lee B, Kang W, Kim CK, Kim G, Lee CH. 2017. Estimating carbon uptake in forest and agricultural ecosystems of Korea and other countries using eddy covariance flux data (in Korean with English abstract). *J Environ Impact Assess* 26(2): 127-139. doi: 10.14249/eia.2017.26.2.127
- Lee J, Dorji N, Kim S, Wang SW, Son Y. 2016. Piloting the FBDC model to estimate forest carbon dynamics in Bhutan. *Korean J Environ Biol* 34(2): 73-78. doi: 10.11626/KJEB.2016.34.2.073
- Lee J, Kim H, Song C, Kim GS, Lee WK, Son Y. 2020. Determining economically viable forest management option with consideration of ecosystem services in Korea: A strategy after successful national forestation. *Ecosyst Serv* 41: 101053. doi: 10.1016/j.ecoser.2019.101053
- Lee J, Lee S, Han SH, Kim S, Roh Y, Abu SK, Pietsch SA, Son Y. 2017. Estimating carbon dynamics in an intact lowland mixed dipterocarp forest using a forest carbon model. *Forests* 8(4): 114. doi: 10.3390/f8040114
- Lee J, Lim CH, Kim GS, Markandya A, Chowdhury S, Kim SJ, Lee WK, Son Y. 2018. Economic viability of the national-scale forestation program: The case of success in the Republic of Korea. *Ecosyst Serv* 29(Part A): 40-46. doi: 10.1016/j.ecoser.2017.11.001
- Lee J, Makineci E, Tolunay D, Son Y. 2018. Estimating the effect of abandoning coppice management on carbon sequestration by oak forests in Turkey with a modeling approach. *Sci Total Environ* 640-641: 400-405. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.341
- Lee J, Tolunay D, Makineci E, Çömez A, Son YM, Kim R, Son Y. 2016. Estimating the age-dependent changes in carbon stocks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Turkey. *Ann For Sci* 73: 523-531. doi: 10.1007/s13595-016-0546-5
- Lee J, Yoon TK, Han S, Kim S, Yi MJ, Park GS, Kim C, Son YM, Kim RH, Son Y. 2014. Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012. *Biogeosciences* 11(17): 4637-4650. doi: 10.5194/bg-11-4637-2014
- Liang J, Picard N. 2013. Matrix model of forest dynamics: An overview and outlook. *For Sci* 59(3): 359-378. doi: 10.5849/forsci.11-123
- Longo M, Keller M, dos-Santos MN, Leitold V, Pinagé ER, Baccini A, Saatchi S, Nogueira EM, Morton DC. 2016. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. *Global Biogeochem Cycles* 30(11): 1639-1660. doi: 10.1002/2016GB005465
- Loucks DP, van Beek E. 2017. System sensitivity and

- uncertainty analysis. In: Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. Cham: Springer. p. 331-374. doi: 10.1007/978-3-319-44234-1_8
- Luo Y, Smith B, editors. 2022. Land carbon cycle modeling: Matrix approach, data assimilation, & ecological forecasting. Boca Raton: CRC Press. doi: 10.1201/9780429155659
- McDowell N, Allen CD, Anderson-Teixeira K, Brando P, Brienen R, Chambers J, Christoffersen B, Davies S, Doughty C, Duque A, et al. 2018. Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytol* 219(3): 851-869. doi: 10.1111/nph.15027
- McMahon SM, Arellano G, Davies SJ. 2019. The importance and challenges of detecting changes in forest mortality rates. *Ecosphere* 10(2): e02615. doi: 10.1002/ecs2.2615
- Melin Y, Petersson H, Nordfjell T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden - A modelling approach. *For Ecol Manag* 257(5): 1445-1451. doi: 10.1016/j.foreco.2008.12.020
- Metsaranta JM, Shaw CH, Kurz WA, Boisvenue C, Morken S. 2017. Uncertainty of inventory-based estimates of the carbon dynamics of Canada's managed forest (1990-2014). *Can J For Res* 47(8): 1082-1094. doi: 10.1139/cjfr-2017-0088
- NFI (Canada's National Forest Inventory). 2021. Canada's National Forest Inventory business process (Version 8.0); [accessed 2023 Oct 16]. <https://nfi.nfis.org/en/general>
- Oswalt SN, Smith WB, Miles PD, Pugh SA. 2019. Forest resources of the United States, 2017: A technical document supporting the forest service 2020 RPA assessment. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report No. WO-97. doi: 10.2737/WO-GTR-97
- Pales JC, Keeling CD. 1965. The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii. *J Geophys Res* 70(24): 6053-6076. doi: 10.1029/JZ070i024p06053
- Park CW, Lee J, Yi M, Kim C, Park GS, Kim RH, Lee KH, Son Y. 2013. Estimation of change in soil carbon stock of *Pinus densiflora* forests in Korea using KFSC model under RCP 8.5 climate change scenario (in Korean with English abstract). *Clim Change Res* 4(2): 77-93.
- Park CW, Yi K, Lee J, Lee KH, Yi MJ, Kim C, Park GS, Kim RH, Son Y. 2013. Estimation of long-term effects of harvest interval and intensity, and post-harvest residue management on the soil carbon stock of *Pinus densiflora* stands using KFSC model (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 102(1): 82-89. doi: 10.14578/jkfs.2013.102.1.082
- Park EB, Song CH, Ham BY, Kim JW, Lee JY, Choi SE, Lee WK. 2018. Comparison of sampling and wall-to-wall methodologies for reporting the GHG inventory of the LULUCF sector in Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 9(4): 385-398. doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.4.385
- Shaw CH, Hilger AB, Metsaranta J, Kurz WA, Russo G, Eichel F, Stinson G, Smyth C, Filiatrault M. 2014. Evaluation of simulated estimates of forest ecosystem carbon stocks using ground plot data from Canada's National Forest Inventory. *Ecol Modell* 272: 323-347. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.10.005
- Smith JE, Domke GM, Woodall CW. 2022. Predicting downed woody material carbon stocks in forests of the conterminous United States. *Sci Total Environ* 803: 150061. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150061
- Smith P. 2004. Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *Soil Use Manag* 20(2): 264-270. doi: 10.1111/j.1475-2743.2004.tb00367.x
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2016. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104. https://treaties.un.org/Pages/showDetails.aspx?objid=0800000280458f37&clang=_en
- Vidal C, Alberdi IA, Hernández Mateo L, Redmond JJ, editors. 2016. National forest inventories: Assessment of wood availability and use. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-44015-6
- Yi K, Park CW, Ryu SR, Lee KH, Yi MJ, Kim C, Park GS, Kim RH, Son Y. 2013. Simulating the soil

carbon dynamics of *Pinus densiflora* forests in Central Korea. Scand J For Res 28(3): 241-256. doi: 10.1080/02827581.2012.735698

Yu M, Song YI, Ku H, Hong M, Lee WK. 2023. National-scale temporal estimation of South Korean forest carbon stocks using a machine learning-based meta model. Environ Impact Assess Rev 98: 106924. doi: 10.1016/j.eiar.2022.106924