



LULUCF 부문 산림 온실가스 인벤토리 구축을 위한 Sampling과 Wall-to-Wall 방법론 비교

박은빈* · 송철호** · 함보영*** · 김지원**** · 이종열***** · 최솔이** · 이우균*****†

*고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, **고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생,
 고려대학교 환경 GIS/RS 센터 연구원, *고려대학교 기후환경학과 석사과정학생,
 *****고려대학교 생명자원연구소 연구원¹, 녹색기술센터 기후기술협력센터 연구원²
 *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Comparison of Sampling and Wall-to-Wall Methodologies for Reporting the GHG Inventory of the LULUCF Sector in Korea

Park, Eunbeen*, Song, Cholho**, Ham, Boyoung***, Kim, Jiwon****,
 Lee, Jongyeol*****, Choi, Sol-E** and Lee, Woo-Kyun*****†

*M.S. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea
 **Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea
 ***Researcher, Environmental GIS/RS Center, Korea University, Seoul, Korea
 ****M.S. Student, Dept. of Climatic Environment, Korea University, Seoul, Korea
 *****¹Researcher, Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul, Korea
 *****²Researcher, Center for Climate Technology Cooperation, Green Technology Center, Seoul, Korea
 *****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Although the importance of developing reliable and systematic GHG inventory has increased, the GIS/RS-based national scale LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) sector analysis is insufficient in the context of the Paris Agreement. In this study, the change in CO₂ storage of forest land due to land use change is estimated using two GIS/RS methodologies, Sampling and Wall-to-Wall methods, from 2000 to 2010. Particularly, various imagery with sampling data and land cover maps are used for Sampling and Wall-to-Wall methods, respectively. This land use matrix of these methodologies and the national cadastral statistics are classified by six land-use categories (Forest land, Cropland, Grassland, Wetlands, Settlements, and Other land). The difference of area between the result of Sampling methods and the cadastral statistics decreases as the sample plot distance decreases. However, the difference is not significant under a 2 km sample plot. In the 2000s, the Wall-to-Wall method showed similar results to sampling under a 2 km distance except for the Settlement category. With the Wall-to-Wall method, CO₂ storage is higher than that of the Sampling method. Accordingly, the Wall-to-Wall method would be more advantageous than the Sampling method in the presence of sufficient spatial data for GHG inventory assessment. These results can contribute to establish an annual report system of national greenhouse gas inventory in the LULUCF sector.

Key words: LULUCF, Land-use change matrix, Approach 3, Sampling method, Wall-to-Wall method, Forest CO₂ storage

1. 서 론

파리 협정 (Paris Agreement) 이후 자발적 감축목표 (Nationally

Determined Contributions, NDC) 달성을 위해서는 IPCC 지침에 따른 국가 온실가스 인벤토리 (National Greenhouse Gas Inventory Report, NIR) 작성이 필수적이다 (IPCC, 2000). 특

† **Corresponding author:** leewk@korea.ac.kr (145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea, 02-3290-3470)
 Received October 29, 2018 / Revised November 13, 2018 1st, November 30, 2018 2nd / Accepted December 10, 2018

히, 최근 NDC에 포함된 LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) 부문은 IPCC GL (2006)에서 정의한 6 가지 토지이용범주 (산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타 토지)를 기본으로 하여, 범주 내 유지되는 면적과 전용되는 면적을 구분하여 작성되어야 한다. 그러나 현재까지 우리나라에서 활용되고 있는 범주별 국가 통계 면적 자료는 타 토지에서 전용되는 면적을 공간적으로 산정하지 못하고 있으며, 정주지와 기타토지 범주의 경우에는 전체 면적이 산정되지 않기 때문에 면적의 일관성과 신뢰성에 문제를 드러내고 있다 (GIR, 2017; Yu et al., 2015). 현재 국가 온실가스 인벤토리 보고서에는 국가 온실가스 산정·보고·검증 지침 (Measurement, Reporting and Verification, MRV)의 범주별 구분 및 면적 결정 방법에 따라 통계자료를 기반으로 면적을 산정하고 있다(GIR, 2014). 또한, 다양한 부처에서 토지관련 공간정보를 제공하고 있으나 각 부처의 제작 목적과 범주별 분류기준의 차이로 범주별 면적이 중복되거나 일치하지 않는 등의 문제가 발생하고 있어 IPCC 지침에서 제시하는 면적산정 방법을 고려하는 것이 필요하다 (Hwang et al., 2018; GIR, 2017).

IPCC GL (2006)에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 공간적 접근방법 (Approach 3)으로 Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법을 제시하고 있다. 특히, 산림지 (Forest Land)는 이산화탄소의 주요 흡수원이기 때문에 산림지 변화 분석은 LULUCF 매트릭스 작성에 중요하게 작용한다 (Fuchs et al., 2009). DeFries et al. (2007)에 따르면 Approach 3의 두 가지 방법론은 각 국가의 능력, 산림 특성 등에 따라 적절하게 결정되어야 하며, 결과의 정확성을 시계열적으로 일관적이고 투명하게 보고할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서는 표본 조사를 통해 전체 모집단을 추정하는 Sampling 방법과 공간 단위로 전체 면적의 토지 변화를 파악할 수 있는 Wall-to-Wall 방법의 장단점을 비교하여 적용해야 한다 (IPCC, 2003). 기존에 수행되었던 대표적인 연구로 Park et al. (2017a)은 표본점 간격에 따른 표본점 기반 매트릭스와 원격탐사 자료를 이용하여 작성한 주제도 매트릭스를 비교, 분석하였으며, Park et al. (2017b)은 Sampling 방법에 중점을 두고 표본점 간격에 따른 산림항공사진과 토지피복지도를 비교하여 매트릭스를 작성하였다. 또한, Yu et al. (2015)은 위성영상과 국내 공간 자료 등의 자료를 활용하여 2000년과 2009년의 토지전환율을 분석한 바 있다.

이렇듯 기존 국내 연구의 대부분은 두 가지 방법론을 모두 고려하지 못하고 Sampling 방법을 집중적으로 수행하거나 면적 변화에 대한 부분만을 고려하고 있다. 또한, 추후 온실가

스 인벤토리 보고서 작성에 필요한 국가 탄소배출계수, 자료 간의 공간 정합성 등을 고려하는 과정에 대한 검토까지는 이르지 못하고 있다. 토지이용 범주별 면적에 대한 정보는 탄소 축적량 변화와 온실가스 배출 및 흡수량 추정 기초가 되기 때문에 (Kim, 2009), 면적산출과 CO₂ 저장/흡수량의 연계성을 고려하는 연구가 필요한 시점이다. 특히 공간자료를 활용하는 접근 방식은 IPCC GL (2006)에서 가장 고도화된 방법으로 제시되고 있으며, 산정된 면적을 바탕으로 다양한 산림 활동자료와 산림공간정보가 연계되어 온실가스 인벤토리 산정으로 이어져야 하는 시점에서 중요하게 다루어 질 수 있다.

특히 이산화탄소의 주요 흡수원인 산림지 범주의 국가 온실가스 인벤토리 시스템은 국가산림자원조사 (National Forest Inventory, NFI)의 활동자료 및 산림 관련 통계자료와 국가에서 개발되어 승인된 국가 고유 배출계수를 바탕으로 임상별로 보고하고 있다 (GIR, 2017). 따라서 고도화된 온실가스 인벤토리 보고서 작성을 위해서는 공간적 측면의 정합성과 함께 국가고유 배출-흡수계수를 적용한 CO₂ 저장량과 관련된 다양한 자료간의 활용성을 고려하여 현재 인벤토리 체계를 향상시키는 과정이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법의 공간 적용 가능성을 산림을 중심으로 우선 파악하였다. 이 과정에서 기존의 국가통계, 국가 공간자료, 국가고유 배출계수 등을 고려하여 산림지의 CO₂ 저장량 계산 과정을 포함한 가용한 방법을 제시하였다. 이를 통해 향후 LULUCF 작성 과정과 국가 온실가스 인벤토리 작성 과정에서 발생하는 문제점과 개선 방안에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1 연구 대상지

본 연구의 대상지는 도시화로 인해 우리나라 인구의 약 50%가 밀집하고 있으며, LULUCF 토지이용 범주를 다양하게 포함하고 있는 수도권 지역이다. 백령도를 포함한 일부 도서 지역과 DMZ 인근 지역 등은 자료 활용문제를 고려하여 연구 대상지에서 제외하였다 (Fig. 1).

2.2 연구재료

Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법의 토지이용변화 매트릭스 작성과 산림 CO₂ 저장량 산정을 위해 각 자료별 가용한 시기, 속성 등을 종합적으로 검토하였다. 특히, Approach 3에 해당하는 공간자료 구성에 있어서 부처별 자료 제작 시기가

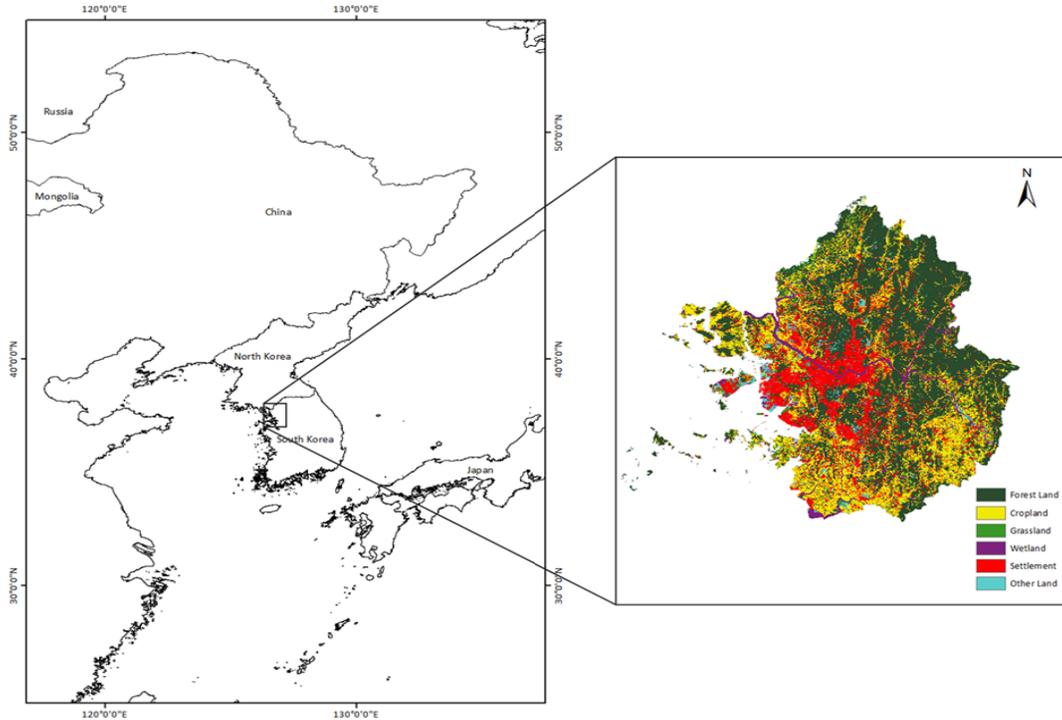


Fig. 1. Study area and land cover map.

상이고 자료의 속성에 따라 활용성이 다르기 때문에 먼저 2000년대와 2010년대의 연대별 활용 가능한 자료를 파악하였다 (Table 1).

2.2.1 Sampling 방법을 위한 자료

Sampling 방법에 사용된 산림항공사진은 국가산림자원조사를 위해 1971년부터 2005년까지 4차례에 걸쳐 촬영되었으며, 도엽별 흑백사진으로 제공되고 있다. 제4차 산림항공사진은 수도권 지역을 중심으로 2002년에 촬영되었으며, 일부지역은 2001년, 2003년에 촬영되었다. 국내 보안상 등의 이유로 DMZ (DeMilitarized Zone) 지역 등은 제공되지 않고 있으며, 육안판독이 어려운 경우에 국토지리정보원에서 제공하는 유사한 시기의 정사사진과 항공사진, Google Earth 등을 보정하여 보조자료로 활용하였다.

2.2.2 Wall-to-Wall 방법을 위한 자료

Wall-to-Wall 방법의 토지이용변화 매트릭스 작성을 위해 환경부에서 제공하는 2000-2004년, 2013년에 제작된 중분류 토지피복지도를 이용하였다. 2000-2004년 토지피복지도는 Landsat 1999년 영상과 IRS-IC 2000 영상으로 제작되었으며,

2013년 토지피복지도는 2010년 정사영상과 아리랑 2호 2007-2011년 영상으로 제작되었다. 중분류 토지피복지도는 LULUCF 부문 토지이용범주를 모두 포함하고 있어 범주별 공간경계 파악에 용이하고, 전 국토에 대한 현재 토지이용현황 및 면적을 파악할 수 있다는 데 장점이 있다 (GIR, 2015). 중분류 토지피복지도 분류 체계는 23개 항목이며, 특히 산림지의 경우 침엽수, 활엽수, 혼효림으로 구분되어 있다. 중분류 토지피복지도의 공간 해상도는 5 m, 폴리곤 형태의 벡터 (Vector) 형식으로 제공되고 있다 (ME, 2002).

2.2.3 Sampling 방법 및 Wall-to-Wall 방법에 따른 실제 통계와의 비교를 위한 자료

지적통계연보는 국토지리정보원에서 1970년부터 지적공부에 등록된 전체 국토의 면적 필지 수를 지목별로 집계하여 연간으로 제공·발간되는 국가통계이다. 행정구역별로 임야, 전, 답, 양어장 등 29개의 토지이용항목으로 작성되어 지적정보 기반의 면적이 제공되고 있으며, 본 연구에서는 각 방법의 실제통계와의 비교를 위해 사용되었다. 지적통계연보는 지적정보 기반의 면적으로 산정되기 때문에 임업통계연보를 비롯한 타 부처별 토지 관련 통계, MRV에서의 범주별 면적과 차

Table 1. Available Data for LULUCF matrix (2000-2010) and Forest CO₂ storage estimation analysis

Sector	Data	Description	Year of data taken	Source
Sampling Matrix	Aerial Photography	Aerial photography for 2000s	2001-2003	National Geographic Information Institute
	Orthophoto	Orthophoto for 2010s and additional data for 2000s	2000-2003 2010-2013	National Geographic Information Institute
	National Forest Inventory	NFI location information		Korea Forest Promotion Institute
	Sample Point	Sample Point for visual interpretation (4 km, 2 km, 1 km)		
Wall-to-Wall Matrix	Land Cover	Land Cover map for 2000s	1999-2000	Ministry of Environment
	Land Cover	Land Cover map for 2010s	2011	Ministry of Environment
Matrix Accuracy	Cadastral Statistics	Accuracy for estimated matrix by Sampling, Wall-to-Wall method	2000, 2011	National Geographic Information Institute
Forest CO ₂ storage estimation	National Forest Inventory	NFI data attribute (volume, forest species, etc) (2006-2010, 2011-2015)	2006-2010 2011-2015	Korea Forest Promotion Institute
	Forest Type Map	5 th Forest type map		Korea Forest Service
	Carbon Emission Factors	Carbon Emission Factors by species in Korea		National Institute of Forest Science
	Forest Statistics	Accuracy for CO ₂ storage estimation	2000, 2011, 2016	Korea Forest Service

이가 있다. 그러나 지적통계연보는 현재 MRV에서의 전체 국토면적, 초지, 습지 면적에 사용되고 있으며, LULUCF 분야 토지이용범주를 모두 포함한 연간 데이터 확보가 가능하다는 장점이 있다 (MOLIT, 2016). 따라서 부처별로 산재하는 토지 관련 통계 중 하나의 통계 내에서 일관성 있는 자료의 비교를 위해 지적통계연보를 실제 통계치로 간주하여 연구에 활용하였다.

2.2.4 산림의 CO₂ 저장량 추정을 위한 자료

국가산림자원조사는 1972년부터 현재까지 산림자원 변화 모니터링, 온실가스통계 검증자료 등의 활용 목적으로 수행되고 있다. 제5차 국가산림자원조사 (2006년-2010년)부터 주기적으로 5년마다 조사가 수행되고 있으며, 연년 조사체계와 계통추출법으로 조사체계와 표본설계가 변화하여 전국 기준으로 약 4,000개의 고정표본점이 4 km × 4 km 간격으로 배치되어있다 (KFRI, 2011b). 특히, 제5차 국가산림자원조사부터 공간 표본점을 바탕으로 임황정보와 수종, 흉고직경, 수고 등의 자료를 파악할 수 있다 (KFRI, 2009).

임상도는 1972년도부터 국가산림자원조사와 연계하여 제

작된 산림지도이며 임종, 임상, 수종, 경급 등 다양한 공간 속 성정보를 포함하고 있는 주제도이다. 제5차 임상도는 제5차 국가산림자원조사 사업과 연계하여 GIS 기반의 디지털환경으로 전환된 축척 1:25,000 도엽별로 제공되고 있으며, 연차별 임상별/주요수종별/영급별 면적 변화 추이를 파악할 수 있다 (KFRI, 2011c).

국가고유 배출계수는 국립산림과학원에서 수종별로 개발하고 있으며, 현재 22개 수종, 66개 계수가 도출되어 국가 온실가스종합정보센터 (GIR)에서 검증 이행절차가 진행되고 있다 (KFRI, 2014). 국가고유 배출계수는 목재기본밀도 (Basic wood density), 바이오매스 확장계수 (Biomass expansion factor), 뿌리함량비 (Root-shoot ratio), 탄소전환계수 (Carbon fraction) 등이 포함되어 있다.

임업통계연보는 산림청에서 전국 산림을 대상으로 조사, 평가하여 산림정책 수립의 기본자료로 제공하고자 제작되고 있으며, 1968년부터 현재까지 연별로 제공되고 있다. 주로 행정구역별, 소관별 등을 기준으로 산림면적, 임목축적을 산출한 정보를 포함하고 있다.

2.3 연구방법

본 연구는 Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법을 통해 LULUCF 부문 토지이용변화 매트릭스를 작성하여 비교하고, 각 방법에 온실가스 인벤토리 작성을 위한 산림의 CO₂ 저장량 산정으로 이어지는 과정을 적용하고자 하였다. 이를 위해 Approach 3 수준으로 작성된 LULUCF 매트릭스를 통해 면적을 산정하고, 이를 바탕으로 추정된 산림의 CO₂ 저장량을 기존의 통계자료와 비교하여 각 과정에서 발생하는 문제를 파악하였다. 이러한 과정을 정리하면 두 시점에서 Sampling과 Wall-to-Wall 방법론을 통한 토지이용변화 매트릭스 작성 과정과 이후 산림의 CO₂ 저장량 산정을 통한 인벤토리 적용 가능성을 파악하는 과정으로 종합된다 (Fig. 2).

2.3.1 Sampling 방법

Sampling 방법은 전체 모집단에 대한 정보를 표본으로 예측하는 방법으로 국토 면적이 넓은 경우에 활용도가 높으며 특히 현장표본조사에서 인벤토리 해석과 검증에 위한 자료로 사용된다 (IPCC, 2006). 본 연구에서는 활용된 영상시기를 기준으로 2001년-2003년을 2000년대로, 2010년-2013년을 2010년대로 가정하여 두 시기로 구분하였다. 육안판독을 위한 고정표본점 (Sample point) 표본설계의 경우, 추후 국가산림자원조사 자료와의 공간 활용 가능성을 염두에 두어 NFI 집락 표본점의 중심인 S1 표본점의 위치정보를 기준으로 제5차 NFI 조사부터 사용하고 있는 계통추출법 (Systematic

sampling)을 적용하였으며, 대상지 전역에 4 km (732개), 2 km (2,935개), 1km (11,734개) 간격으로 배치하였다 (KFRI, 2011a). 표본점을 바탕으로 육안판독 시 토지피복분류는 IPCC GL (2006)에서 제시하는 LULUCF 부문의 6가지 토지이용범주를 기준으로 분류하였으며, 타 항목으로 판독되지 않는 경우에는 기타토지 범주로 분류하였다. 토지이용면적 추정 시에는 일반적으로 비율면적 추정 (eq. 1)과 직접면적 추정 방법 (eq. 2)을 적용할 수 있다.

$$A_i = p_i \times A \quad (\text{where } P_i = \frac{n_i}{n}) \quad (\text{eq. 1})$$

A : Total area

A_i : Estimated area of land-use category i

P_i : Estimation of proportions of land-use category i

n_i : Number of point located in land-use category i

n : Total number of points

$$A_i = n_i \times r^2 \quad (\text{eq. 2})$$

A_i : Estimated area of land-use category i

n_i : Number of point located in land-use category i

r : Distance between the points

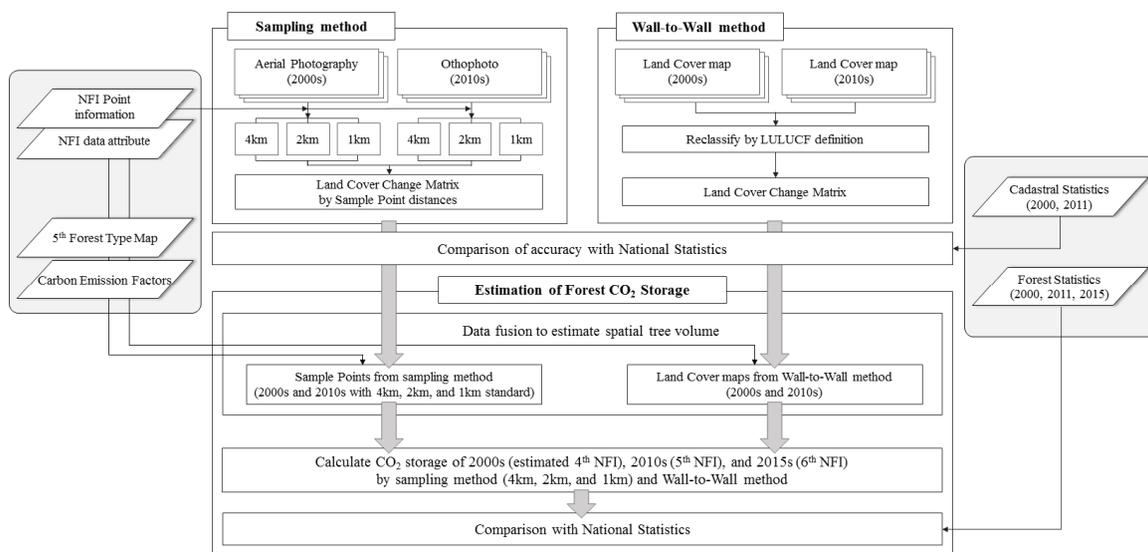


Fig. 2. Research flow of comparing Sampling and Wall-to-Wall method considering Forest CO₂ storage calculation.

비율면적 추정방법은 국토 총면적 정보가 존재하는 경우에 각 토지이용범주가 할당되는 표본점 비율을 곱하여 예측할 수 있다. 직접 면적추정방법은 국토 총면적 정보가 존재하지 않은 경우에도 활용할 수 있으며 각 표본점에 공간 해상도를 곱하여 예측할 수 있다 (IPCC, 2006; IPCC, 2003). 우리나라는 전체 인벤토리 통계면적을 주기적으로 갱신하여 비율면적 추정방법이 가능하고, 다양한 국가 공간정보와의 활용성 측면에서 공간적인 접근으로 직접 면적추정방법이 가능하기 때문에 두 가지 방법을 모두 적용할 수 있다. 본 연구에서는 토지이용변화 매트릭스 작성 시 비율면적 추정방법을 활용하였다. 면적 추정에 대한 불확실성 평가는 사용된 표본점 간격에 따라 구분하였으며, 항목별 면적은 비율면적 추정방식을 이용하였다 (eq. 3). 이를 바탕으로 IPCC GL (2006)에서 제시한 Standard Error (SE), Relative Standard Error (RSE)의 식을 이용하여 불확실성을 평가하였다 (eq. 4, eq. 5)

$$A_i = P_i \times A \quad (\text{eq. 3})$$

$$SE = s(A_i) = A \times \sqrt{\frac{P_i(1 - P_i)}{n - 1}} \quad (\text{eq. 4})$$

$$RSE = \frac{s(A_i)}{A_i} \times 100 \quad (\text{eq. 5})$$

A: Total area

P_i: Estimation of proportions of land-use category *i*

A_i: Estimated area of land-use category *i*

n: Total number of points

s(A_i): Standard error of an area estimate for land-use category *i*

2.3.2 Wall-to-Wall 방법

Wall-to-Wall 방법은 대상지 면적 전체를 조사하여 면적 변화를 파악하는 방법이며, 주로 원격탐사자료 등의 영상정보와 국가통계, 보조 공간지도데이터를 함께 활용하여 공간적인 변화를 파악한다 (MFE, 2017; IPCC, 2006). 본 연구에서는 시기별 환경부 중분류 토지피복지도를 활용하였으며 토지피복지도의 영상시기를 고려하여 2000년-2004년 토지피복지도는 2000년대, 2013년 토지피복지도는 2010년대로 가정하고 두 시기로 구분하였다. 본 연구에서는 토지피복지도 기준 23개의 항목 중 주거, 상업지역, 인공적으로 만들어진 초지나 시설 등의 경우에는 정주지로 분류하였으며, 나지의 경

우 기타토지로 분류, 수역은 습지로 분류하는 등 IPCC GL (2006)의 LULUCF 부문 6가지 범주로 재분류하였다. 분류 후 두 시기의 토지피복지도를 중첩하여 공간적으로 중첩되는 부분을 분석하였으며 토지이용변화 매트릭스 작성 시 면적을 벡터 면적을 계산하여 활용하였다.

2.3.3 Sampling 방법 및 Wall-to-Wall 방법에 따른 실제 통계와의 비교

본 연구에서는 2000년, 2011년 지적통계 연보를 활용하여 2000년대와 2010년대의 각 방법론에 따른 토지이용범주별 면적과 비교하였다. 지적통계연보의 29개 토지이용항목 중 공장용지, 주차장, 도로 등의 시설은 정주지로 분류하였으며, 전, 담, 과수원은 농경지, 임야는 산림지로 분류하는 등 IPCC GL (2006)의 LULUCF 부문 6가지 범주로 재분류하였다.

2.3.4 산림의 CO₂ 저장량 추정

본 연구에서는 앞서 추정된 토지이용변화 면적 결과를 바탕으로 공간적인 산림지 CO₂ 저장량을 추정하고 실제 통계와 비교하여 방법론에 따른 차이를 파악하고자 하였다. 분석을 통해 도출된 각 범주별 항목의 면적에서 산림지로 분류되는 지역을 추출하였으며, 추출된 산림 면적은 Sampling 방법의 4 km, 2 km, 1 km와 Wall-to-Wall 방법에서 도출된 총 4가지 경우가 있다. 해당 자료는 산림면적만을 파악할 수 있으며, CO₂ 저장량을 산정하는데 필요한 임목 재적 등을 포함한 공간정보가 필요하다. 이를 위해 제5차 NFI와 제6차 NFI 자료, 임업통계연보, 국가고유 배출계수를 활용하였다. 앞서 언급한 4가지 경우의 산림 CO₂ 저장량 추정을 위한 공간 자료 구축은 Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법에서 사용된 자료시기와 일치하도록 제5차 NFI, 제6차 NFI의 공간속성정보를 보정하고 중첩하는 것으로 시작하였다. 이때 앞서 도출한 Sampling 방법의 면적정보를 공간화하기 위해 표본점에 공간 해상도를 곱하여 사용하였다 (eq. 2). 산림경계를 설정하기 위해 산림청에서 제공하는 5차 임상도를 준용하였으며, NFI 자료와 임상도, 국가고유 배출계수를 고려하여 CO₂ 저장량 추정을 위한 수종을 선택하였다. 공간정보간의 중첩분석 시 공간적으로 임상도, NFI의 수종정보가 일치할 경우, 재적 값을 그대로 적용하였으며 수종정보가 일치하지 않거나 Sampling 방법의 2 km, 1 km에서 NFI 재적 값이 필요한 경우에는 임상도의 수종정보를 기반으로 해당 수종의 수도권 NFI 평균 재적 값을 적용하였다. 결정된 수종과 재적 값을 바탕으로 국가고유 배출계수 및 탄소 전환계수를 해당

식에 적용하여 산림의 탄소저장량을 산출하였다 (KFRI, 2014; IPCC, 2003; GIR, 2017; KFRI, 2012) (eq. 6). 산림의 CO₂ 저장량은 탄소저장량에 이산화탄소/탄소 전환계수를 곱하여 도출되기 때문에, 온실가스 감축목표와 NIR의 개념에서의 접근을 위해 CO₂ 양으로 통일하여 평가하였다.

$$tCO_2 = \sum [V_i \times D_i \times BEF_i \times (1 + R_i)] \times CF \times 44/12 \quad (\text{eq. 6})$$

tCO₂: Estimated CO₂ storage

V_i: Estimated Volume of Forest land by tree species *i*

D_i: Basic wood density by tree species *i* (td.m./m³)

BEF_i: Biomass expansion factor by tree species *i*

R_i: Root-shoot ratio by tree species *i*

CF: Carbon fraction (tC/td.m.)

44/12: Stoichiometric ratio of CO₂ and C

제4차 NFI (1995년-2005년)는 공간정보로 제공되지 않고, 현재 조사체계와 상이하기 때문에 2000년대의 산림 CO₂ 저장량을 추정 시 제5차 NFI 자료를 바탕으로 2000년대 임업통계연보를 이용하여 재적 비율 차이를 통한 보정계수를 통해 공간적으로 추정하였다 (GIR, 2017; Lee et al., 2016). 2000년대와 2010년대 CO₂ 저장량을 추정함에 있어 추가적인 경향성 파악을 위해 2015년대 CO₂ 저장량을 함께 비교하였다. 실제 통계와 Sampling, Wall-to-Wall 방법으로 추정된 4가지 경우의 산림 CO₂ 저장량을 비교하기 위해 실제통계는 현행 인벤토리 통계 산정 시 활용하고 있는 임업통계연보 상의 산림면적 및 축적정보를 활용하였으며, 도출된 CO₂ 저장량을 바탕으로 각각 비교하였다. 임업통계연보 상에서의 추정 값은 시기별로 추정된 행정구역별 ha당 축적과 임상별 면적, 현행 인벤토리 보고서에서 활용하고 있는 임상별 계수를 활용하였으며, 평균값으로 적용하여 산출하였다. 이를 통해 최종적으로 다양한 면적 산정 방법과 기존 인벤토리 통계 산정과 정에서의 CO₂ 저장량 간 차이를 파악하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 현재 국가 공간자료 중 가장 활용 가능성이 높은 토지피복지도와 NFI, 임상도 자료를 활용하여 Approach 3에 적용 가능한 다양한 방법에 대해 논의하고자 하였다. 따라서 1990년부터 2010년까지 20년간의 토지이용변화를 파악

하기에 앞서 각 자료간의 시계열이 일치하는 2000년부터 2010년까지의 두 가지 방법에 따른 10년간의 토지이용변화 매트릭스를 도출하고, 현행 LULUCF 부문 인벤토리 산정방법을 바탕으로 잠재적인 산림의 CO₂ 저장량을 파악하고 비교하였다.

3.1 Sampling 방법을 이용한 토지이용매트릭스

Sampling 방법으로 작성된 2000년대와 2010년대의 토지이용변화 매트릭스로 추정된 범주별 유지된 면적과 전용된 면적 결과는 다음과 같다 (Table 2). 전체 범주별 면적 비율은 표본점 간격, 시기와 무관하게 산림지, 농경지, 정주지, 습지, 기타토지, 초지 순으로 나타났다. 범주별 유지되는 면적은 산림지에서 표본점 간의 거리가 4 km에서 1 km로 감소할수록 각각 2.5%, 0.3% 증가하여 최종적으로 4 km에서 1 km로 변화 시 총 2.8% 증가하였으며, 농경지에서는 4 km에서 1 km로 변화 시 각각 1.3% 감소, 0.5% 증가하였다. 타 토지 항목에서도 표본점 간의 거리가 감소함에 따라 대체로 증가하는 추세지만 차이가 0.2% 이하로 유의미하지 않았다. 타 범주에서 전용된 면적 비율은 표본점 간의 거리에 무관하게 정주지 (약 8.0%), 농경지 (약 5.0%), 산림지 (약 4.1%) 이며, 타 토지 항목에 대해서는 비율이 평균 약 3.0% 이하로 큰 차이가 나타나지 않았다.

불확실성 평가 결과로 2000년대와 2010년대에서 모든 범주에서 표본점 간의 거리가 감소함에 따라 낮아지는 것을 확인할 수 있었다 (Table 3). 특히 산림지의 경우 타 범주에 비해 RSE값이 가장 낮았으며, 표본점 거리 간격에 따른 변화율은 감소하였다.

Sampling 방법은 동일한 위치의 표본점에서 토지이용변화를 파악하여 전용된 면적을 포함한 전체면적을 산출할 수 있었다. 그러나 실질적인 범주별 경계를 공간적으로 파악할 수 없었으며 산정된 면적을 바탕으로 공간분석이 필요할 경우에는 표본점에 공간 해상도를 곱하여 면적을 산출하는 직접 면적추정 방법을 이용해야 한다는 점에서 한계점이 드러났다. 또한 Sim et al. (2017)과 IPCC (2006)에서 언급된 바와 같이 Sampling 방법의 표본점을 이용하여 면적을 추정하는 경우 정확도 측면에서 표본 추출률에 따라 값이 변화할 수 있다는 점으로 미루어보아 연구 대상지 범위가 작거나 세부 범주별 면적을 추정할 때 정확성과 일관성에 한계가 나타날 수 있다. 또한 범주별 특성에 따라 적합한 표본 간격이 다를 수 있어 이에 대한 고려가 필요하다.

Sampling 방법의 고도화된 공간면적을 산정하기 위해서는

Table 2. Land-use change matrix using Sampling method from 2000s-2010s (4 km, 2 km, 1 km)

		2010s						(unit: ha, (%))
LULC class	Forest land	Cropland	Grassland	Wetland	Settlements	Other land	Total 2000s	
4 km	Forest land	498,154 (42.5)	22,425 (1.9)	20,823 (1.8)	0 (0.0)	20,823 (1.8)	9,611 (0.8)	571,835 (48.8)
	Cropland	25,628 (2.2)	229,055 (19.5)	12,814 (1.1)	4,805 (0.4)	51,257 (4.4)	11,212 (1.0)	334,772 (28.6)
	Grassland	4,805 (0.4)	1,602 (0.1)	0 (0.0)	0 (0.0)	1,602 (0.1)	1,602 (0.1)	9,611 (0.8)
	Wetland	0 (0.0)	4,805 (0.4)	1,602 (0.1)	28,832 (2.5)	1,602 (0.1)	6,407 (0.5)	43,248 (3.7)
	Settlements	16,018 (1.4)	28,832 (2.5)	3,204 (0.3)	6,407 (0.5)	121,735 (10.4)	4,805 (0.4)	181,001 (15.4)
	Other land	4,805 (0.4)	3,204 (0.3)	0 (0.0)	4,805 (0.4)	12,814 (1.1)	6,407 (0.5)	32,036 (2.7)
	Total 2010s	549,411 (46.9)	289,922 (24.7)	38,443 (3.3)	44,850 (3.8)	209,833 (17.9)	40,045 (3.4)	1,172,503 (100.0)
2000s 2 km	Forest land	515,342 (44.0)	23,969 (2.0)	38,443 (3.3)	1,598 (0.1)	27,964 (2.4)	8,789 (0.7)	589,248 (50.3)
	Cropland	23,170 (2.0)	213,727 (18.2)	11,585 (1.0)	4,794 (0.4)	47,539 (4.1)	12,784 (1.1)	310,803 (26.5)
	Grassland	4,794 (0.4)	1,198 (0.1)	8,789 (0.7)	799 (0.1)	1,598 (0.1)	799 (0.1)	10,387 (0.9)
	Wetland	799 (0.1)	3,595 (0.3)	1,198 (0.1)	31,560 (2.7)	7,191 (0.6)	3,196 (0.3)	47,939 (4.1)
	Settlements	16,379 (1.4)	25,967 (2.2)	1,598 (0.1)	3,196 (0.3)	122,244 (10.4)	5,593 (0.5)	179,371 (15.3)
	Other land	6,392 (0.5)	3,196 (0.3)	5,992 (0.5)	4,394 (0.4)	13,982 (1.2)	5,193 (0.4)	34,756 (3.0)
	Total 2010s	566,876 (48.3)	271,653 (23.2)	1,598 (0.1)	46,341 (4.0)	220,518 (18.8)	36,354 (3.1)	1,172,503 (100.0)
1 km	Forest land	519,602 (44.3)	21,583 (1.8)	30,761 (2.6)	1,899 (0.2)	26,879 (2.3)	8,394 (0.7)	591,248 (50.4)
	Cropland	17,487 (1.5)	219,832 (18.7)	12,890 (1.1)	5,396 (0.5)	47,863 (4.1)	12,291 (1.0)	309,963 (26.4)
	Grassland	4,596 (0.4)	1,799 (0.2)	7,095 (0.6)	400 (0.0)	1,699 (0.1)	400 (0.0)	10,492 (0.9)
	Wetland	1,499 (0.1)	3,098 (0.3)	1,599 (0.1)	31,976 (2.7)	6,595 (0.6)	4,896 (0.4)	49,262 (4.2)
	Settlements	15,288 (1.3)	24,581 (2.1)	1,199 (0.1)	2,198 (0.2)	123,306 (10.5)	7,394 (0.6)	177,464 (15.1)
	Other land	4,596 (0.4)	4,896 (0.4)	4,696 (0.4)	4,497 (0.4)	13,889 (1.2)	4,796 (0.4)	34,074 (2.9)
	Total 2010s	563,069 (48.0)	275,789 (23.5)	1,399 (0.1)	46,365 (4.0)	220,232 (18.8)	38,171 (3.3)	1,172,503 (100.0)

Table 3. Uncertainty analysis from 2000s-2010s by Sample Point (4 km, 2 km, 1 km)

		2000s					
	LULC class	Forest land	Cropland	Grassland	Wetland	Settlements	Other land
4km	SE (ha)	200	164	7	28	105	21
	RSE (%)	0.04	0.05	0.07	0.06	0.16	0.07
2km	SE (ha)	50	39	2	8	26	6
	RSE (%)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
1km	SE (ha)	12	10	0	2	7	1
	RSE (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2010s					
	LULC class	Forest land	Cropland	Grassland	Wetland	Settlements	Other land
4km	SE (ha)	200	149	25	30	118	26
	RSE (%)	0.04	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07
2km	SE (ha)	50	36	5	8	31	6
	RSE (%)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
1km	SE (ha)	12	9	1	2	8	2
	RSE (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

범주별 경계를 파악할 수 있는 타 공간자료와의 통합이 필요하다. 특히, 본 연구에서는 산림항공사진을 이용하여 육안판독을 진행했으나 흑백영상과 육안판독으로 인한 시간효율적인 부분에서 한계가 존재하였다. 따라서, 이러한 한계를 보완하기 위해 면적 산정 시 과거 시점부터 현재까지 수집이 가능한 타 원격탐사 자료를 기반으로 다양한 분류기법을 접목하여 매트릭스를 작성한다면 시간 효율적인 한계를 보완할 수 있을 것이며, 산림항공사진에서의 DMZ 지역 등의 영상구득 등의 한계를 보완할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 추후 CO₂ 저장량을 함께 고려하거나 공간분석 등의 실질적인 공간적 면적 변화를 파악하기 위해서는 더 높은 해상도의 경계파악이 가능한 자료의 구축이나 고도화가 필요할 것이다.

3.2 Wall-to-Wall 방법을 이용한 토지이용 매트릭스

Wall-to-Wall 방법으로 작성된 2000년대와 2010년대의 토지이용변화 매트릭스로 추정된 범주별 유지된 면적과 전용된 면적 결과는 다음과 같다 (Table 4). 두 시기의 전체 범주별 면적 비율은 Sampling 방법과 동일하게 산림지, 농경지, 정주지, 습지, 기타토지, 초지 순으로 나타났다. 범주별 유지되는 면적은 산림지 (43.9%), 농경지 (18.6%), 정주지 (11.0%) 순이었으며, 습지, 기타토지, 초지의 경우 면적이 약 3%로 이내

로 나타났다. 범주별 전용된 면적은 정주지 (7.4%), 농경지 (4.9%), 산림지 (4.1%) 순으로 나타났으며, 앞서 추정된 Sampling 방법의 범주별 유지되는 면적비율과 유사하였다.

Wall-to-Wall 방법은 국토 전체의 면적을 계산하며 유지되는 면적과 전용되는 면적의 범주별 경계를 명확하게 공간적으로 파악 할 수 있었다. 그러나 본 연구에서 활용된 환경부 중분류 토지피복지도는 2000년대 이후에 제작되었으며, 이전 시기 분석에는 원격탐사 자료를 이용하여 토지피복을 분류한 후 분석을 진행해야하는 점에서 영상처리 등의 단점이 있을 수 있다 (Yim et al., 2015). 또한, 현재 배포되는 토지피복지도의 경우 대상지별 제작시기가 상이한 경우가 있어 국가 상황에 적절한 전국 대상 토지피복지도 구축을 위한 연구와 함께 시기별 공백을 최소화하기 위한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

3.3 Sampling과 Wall-to-Wall 방법에 따른 실제 통계와의 비교

Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법을 통해 추정된 범주별 토지이용면적을 LULUCF 6가지 토지이용범주로 재분류된 2000년, 2011년도 지적통계 면적과 비교하였다 (Fig. 3). 지적통계 면적과 비교 시 두 가지 방법 모두 시기에 무관하게 산림지와 습지에서 과소추정 되었으며, 2000년대에서 농경지와

Table 4. Land use change matrix using Wall-to-Wall (Vector) method

(unit: ha, (%))

LULC class	2010s						Total 2000s
	Forest land	Cropland	Grassland	Wetland	Settlements	Other land	
Forest land	514,907 (43.9)	21,626 (1.8)	12,631 (1.1)	1,148 (0.1)	23,574 (2.0)	9,208 (0.8)	583,094 (49.7)
Cropland	20,205 (1.7)	217,962 (18.6)	7,150 (0.6)	6,664 (0.6)	44,307 (3.8)	12,713 (1.1)	309,001 (26.4)
Grassland	4,231 (0.4)	2,058 (0.2)	1,360 (0.1)	724 (0.1)	1,475 (0.1)	541 (0.0)	10,389 (0.9)
Wetland	1,383 (0.1)	3,418 (0.3)	1,244 (0.1)	38,355 (3.3)	4,574 (0.4)	4,842 (0.4)	53,816 (4.6)
Settlements	16,709 (1.4)	26,139 (2.2)	4,369 (0.4)	2,230 (0.2)	128,664 (11.0)	7,869 (0.7)	185,980 (15.9)
Other land	4,855 (0.4)	4,556 (0.4)	2,227 (0.2)	1,726 (0.1)	12,911 (1.1)	3,949 (0.3)	30,224 (2.6)
Total 2010s	562,290 (48.0)	275,760 (23.5)	28,981 (2.5)	50,847 (4.3)	215,506 (18.4)	39,121 (3.3)	1,172,503 (100.0)

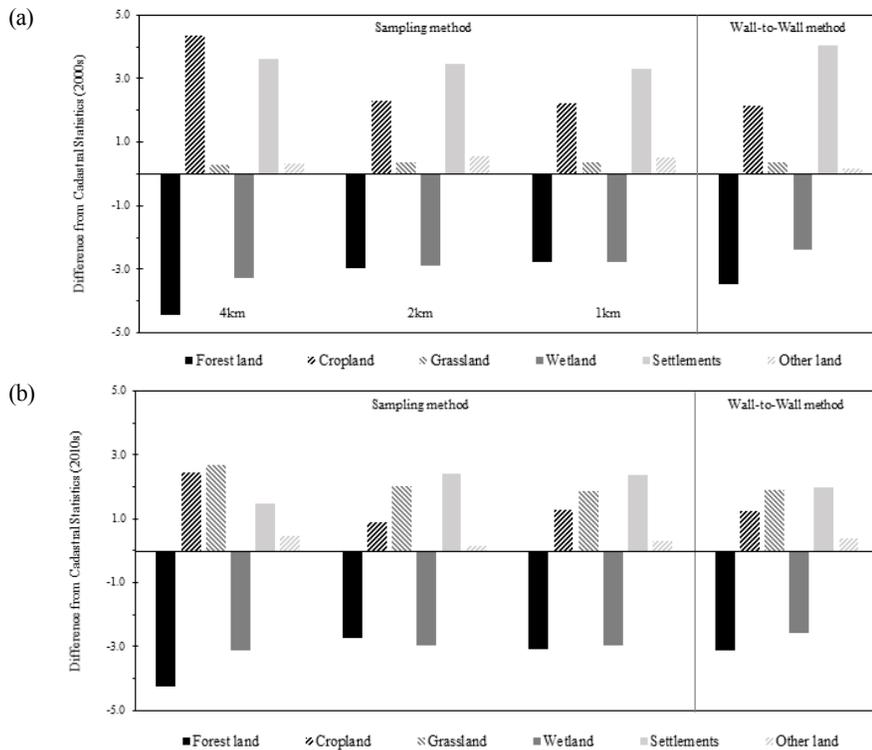


Fig. 3. Difference from Cadastral Statistics of Sampling method and Wall-to-Wall method (a: 2000s, b: 2010s).

정주지, 2010년대에서 초지, 정주지가 과대평가 되는 경향성을 파악할 수 있었다. 범주별 차이는 두 가지 방법 모두 지적

통계와 비교하여 약 5% 이내로 차이가 크지 않았다. Sampling 방법은 표본점 간의 거리가 4 km에서 1 km로 감소함에 따라

범주별 지적통계 연보와의 차이가 감소하여 실제 통계와 유사한 경향성을 보였다. 그러나 2 km에서 1 km로 표본 거리가 감소하였을 때 면적 변화율은 대부분 1% 이하로 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 이는 불확실성 평가 결과와도 비슷한 수준으로 나타났다.

FEA (2014)는 Sampling 방법에서 일반적으로 표본점 거리 감소에 따라 불확실성이 감소하지만, 일정 간격 이하에서는 크게 감소하지 않는다고 하였다. 스웨덴은 500 m 간격의 영구 표본점과 200 m 유효성 검토에 활용되는 서브 표본점을 배치하여 매년 조사하고 구축하고 있으며 (SEPA, 2017), 일본의 경우에는 산림경영활동에 대한 평가 및 모니터링을 위해 Sampling 표본간격을 500 m로 설정하여 분석하고 있다 (NIES, 2017). 이러한 점을 고려할 때 본 연구에서는 2 km 이하 표본점 거리에서 면적 변화율이 뚜렷하게 나타나지 않았으므로 추후 2 km 이내의 다양한 표본점 거리에 따른 비교를 통해 국내 상황에 적절한 표본점 간격을 설정할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Wall-to-Wall 방법은 2000년대의 정주지 범주를 제외하고 대부분 Sampling 방법의 2 km 이하 표본점 거리의 값과 유사하였다. 뉴질랜드는 10-30 m급 해상도를 가진 위성영상자료를 활용하여 1990년부터 현재까지 Wall-to-Wall 방법을 활용하고 Approach 3 수준의 면적통계를 구축하여 인벤토리 시스템을 구축하여 보고하고 있다. 원격탐사 자료 분류 시 LUCAS (Land Use and Carbon Analysis System) 시스템을 이용하여 공간주제도와 영상 중첩을 통해 피복의 자동분류 알고리즘을 이용하고 있다 (MFE, 2017). 그러나, 토지피복 정도의 경우 실제 토지피복 정보를 기반으로 산정하여 지적공부를 기반으로 하는 지적통계연보와 범주별 정의 차이에서 오는 면적 차이가 발생할 수 있으므로 국내 토지이용 및 피복 특성을 고려한 LULUCF 부문 범주별 정의설정을 위한 노력이 필요할 것이다.

3.4 산림의 CO₂ 저장량 추정

본 연구에서 적용한 4가지 경우 (Sampling 방법의 4 km, 2 km, 1 km, Wall-to-Wall 방법)로 추정된 ha당 CO₂ 저장량 및 총 CO₂ 저장량과 기존 방법을 활용하여 추정된 CO₂ 저장량 비교는 다음과 같다 (Fig. 4). 두 가지 방법에 따른 추정량은 현재 자료의 가용한 상태를 전제로 하여 일부 차이가 있었으나, 공간적인 정보와 자료 간의 정합 등의 한계에도 기존 방법을 활용하여 추정된 값과 전반적으로 유사하게 추정되었다.

Sampling 방법으로 추정된 2000년대의 ha당 CO₂ 저장량은 표본점 간의 거리가 4 km에서 1 km로 감소함에 따라 각각 89.7, 101.0, 100.4 tCO₂/ha로 추정되었으며, Wall-to-Wall 방법으로 추정된 값은 106.8 tCO₂/ha로 임업통계를 활용하여 추정된 값인 100.4 tCO₂/ha와 비교했을 때 Wall-to-Wall 방법이 과대추정 된 것을 확인할 수 있었다. 또한 2010년대 Sampling 방법으로 추정된 ha당 CO₂ 저장량은 각각 234.1, 230.8, 228.7 tCO₂/ha로 임업통계로 추정된 234.7 tCO₂/ha와 비교했을 때 과소추정 되었으며, Wall-to-Wall 방법으로 추정된 249.8 tCO₂/ha는 과대추정 되었다. 2015년대에서도 임업통계로 추정된 270.3 tCO₂/ha와 비교했을 때 Sampling 방법으로 추정된 값인 284.5, 282.4, 281.7 tCO₂/ha 와 Wall-to-Wall 방법으로 추정된 303.1 tCO₂/ha 값은 모두 과대추정 된 것을 확인할 수 있었다.

Sampling 방법으로 추정된 ha당 CO₂ 저장량은 주로 표본점 간의 거리가 감소할수록 감소하는 경향성을 보였으며, Wall-to-Wall 방법으로 추정된 값은 Sampling 방법의 4 km 표본간격에서 추정된 값과 유사하거나 과대추정되는 경향성이 있었다. 기존방법을 활용하여 추정값과 4가지 경우의 추정값에서 차이가 나타나는 이유는 현행 LULUCF 부문 산림 인벤토리 산정 시 임상별 탄소배출계수를 활용하는 반면, 본 연구에서는 수종별 탄소배출계수를 활용하여 공간적인 정합 과정에서 발생할 수 있다고 판단된다. 또한 2000년대와 2010년대의 ha당 CO₂ 저장량과 총 CO₂ 저장량이 대폭 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 NFI 공간자료의 한계로 제5차 NFI 공간정보를 바탕으로 2000년대 추정 시 임업통계 연보의 ha당 축적 비율을 적용하여 산출하였기 때문에 기존 임목축적 계산방식과 조사체계 개편에 따른 차이가 반영된 것으로 판단된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 임목축적 재계산 방법을 통해 보완해야 할 것이다 (KFS, 2010; Kim et al., 2018).

면적을 함께 고려한 총 CO₂ 저장량의 경우에는 Sampling 방법에서 4 km 표본점 간격의 총 CO₂ 저장량이 오히려 감소하였으며 2 km, 1 km 표본점 간격에서는 총 CO₂ 저장량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 표본점 간격에 따른 면적변화 결과가 반영되어 나타나는 것으로 판단되며, Wall-to-Wall 방법으로 추정된 값은 Sampling 방법의 2 km 이하 표본 간격에서 추정된 값과 유사하거나 과대추정 되는 경향성이 있었다.

이렇듯 Sampling 방법은 현재 활동자료로 활용되는 NFI의 위치정보를 기반으로 하여 CO₂ 저장량 추정 시 Wall-to-Wall 방법에 비해 실제 통계와 유사할 수 있고, 자료 간의 연계성

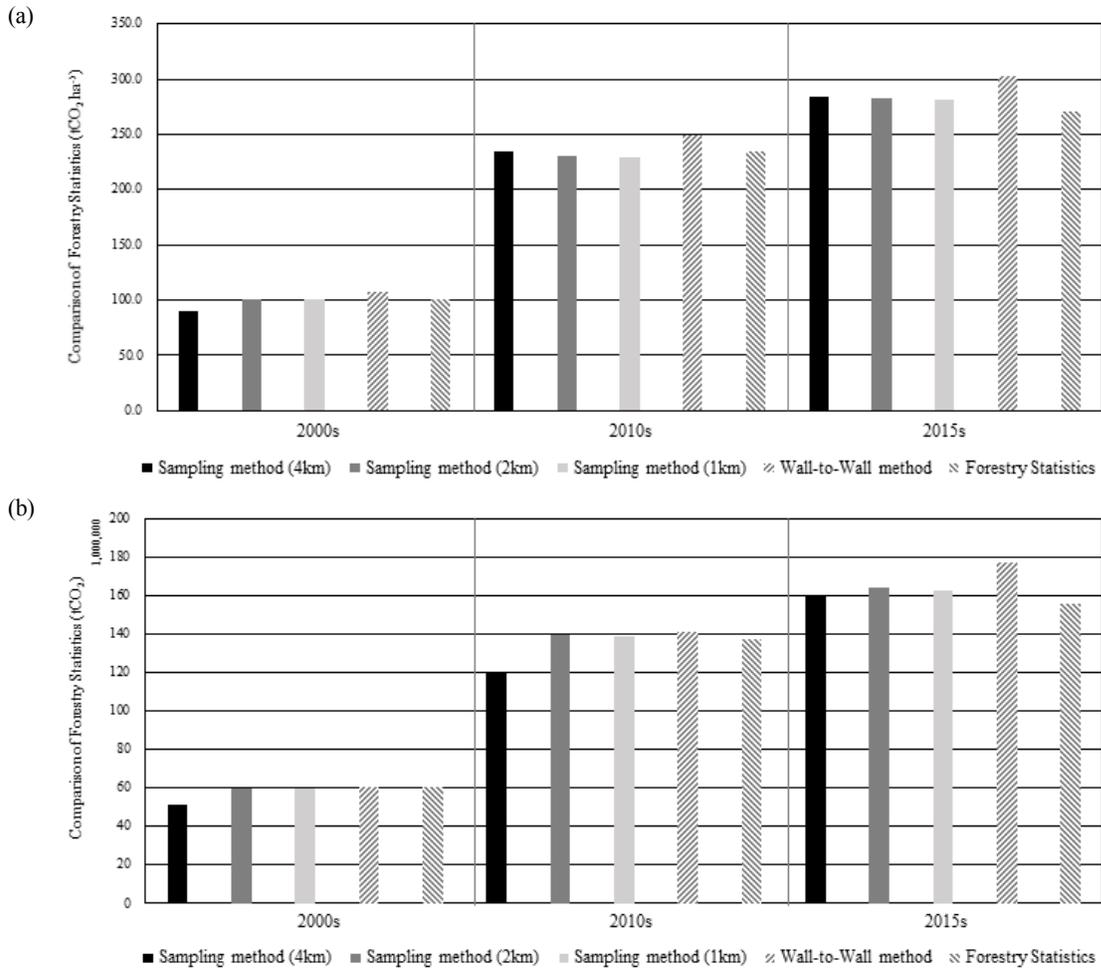


Fig. 4. Comparison of Forest Statistics of Sampling method and Wall-to-Wall method (a: CO₂ storage per ha, b: Total CO₂ storage).

을 고려할 때 더 효율적 일 수 있다. 그러나 표본점 간격이 4km 이하로 감소할 때 각 표본점에서의 CO₂ 저장량 산정과 공간적으로 타 범주와의 경계 정합에 한계가 있어 이를 보완하기 위한 임상도 등의 타 공간정보와의 정합성이 함께 고려되어야 한다. Wall-to-Wall 방법은 토지피복지도 특성상 임상과 면적 정보만을 확인할 수 있어 고도화된 인벤토리 산정을 위해서는 산림 내 수종별 경계를 파악할 수 있는 타 산림공간자료와의 정합성을 고려하는 연구가 필요할 것이다 (Jeon, 2015).

본 연구결과를 바탕으로 CO₂ 저장량 추정 과정까지 종합적으로 판단하였을 때 가용한 공간자료와 통계자료의 범위 내에서 두 가지 방법 모두 실제 통계와 10% 내외로 차이가 나타났으나 유사한 수준에서 결과를 도출할 수 있었다. 결과적으로 본 연구에서의 Wall-to-Wall 방법은 기 구축된 벡터

기반의 자료를 활용함으로써 토지이용변화 분석에 적은 시간이 소요되며, Sampling 방법에서의 표본점 거리 감소에 따른 판독량 증가의 한계점을 보완 할 수 있다고 판단된다. 따라서 국가차원에서 토지피복지도 시스템이 갖추어 진다면 Wall-to-Wall 방법이 공간적인 측면에서 정확한 면적 산정이 가능하기 때문에 고도화된 산림 인벤토리 산정을 위해서는 Wall-to-Wall 방법이 효과적일 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 LULUCF 부문 Approach 3 방법론인 Sampling 방법과 Wall-to-Wall 방법을 비교하였다. 공간정보를 실질적 공간 경계와 정합하고 자료 간의 융합을 하는 과정

에서 두 방법론 모두 장단점이 드러났다.

Sampling 방법에서는 NFI 표본점을 바탕으로 표본을 구축함에 따라 토지이용변화를 용이하게 파악할 수 있었으나, 범주별 경계 파악에 어려움이 있었다. 또한, 면적 추정 시 비율 추정방법이 적용됨에 따라 산림 인벤토리 산정과정의 CO₂ 저장량 추정에 한계점을 드러냈다. Wall-to-Wall 방법은 주제도 기반의 면적 추정으로 공간적인 토지이용과 면적변화를 쉽게 추정할 수 있으나, 토지피복과 토지이용의 차이로 인한 실제 면적과의 차이, 고도화된 CO₂ 저장량 추정 시 산림 축적 정보를 융합하는데 어려움이 있었다. 이러한 문제는 두 가지 방법에 따른 산림 CO₂ 저장량 추정 시 보다 두드러지게 나타났는데, 공간정보와 통계자료의 융합 과정에 따라 추정 방법과 결과가 다르게 나타났다. 이러한 방법론에 따른 CO₂ 저장량 차이가 향후 국가 온실가스 인벤토리 산정 시 장단점으로 적용될 것으로 예상된다. 따라서 두 가지 방법에 따른 공간적인 수준의 자료융합을 위한 정합성 향상 연구, 공간적 가용범위 및 세분화 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다. 이를 바탕으로 국가 상황에 적절한 방법론을 선택하거나 고도화하는 방안이 모색되어야 한다. 현재 가용한 자료 범위 내에서는 Wall-to-Wall 방법이 실제 통계와 유사한 수준에서 변화하는 토지피복 및 이용변화에 의한 산림부문 온실가스 인벤토리를 보다 신뢰도 높은 방법으로 보고할 수 있으며, IPCC 지침에서 제시하는 Approach 3 와 Tier 3 수준의 고도화된 공간적 통계 구축을 위한 방법론으로 적절하다고 판단된다. 그러나 본질적으로 부처 간 토지이용범주의 정의 통합과 공간자료 작성 시 활용되는 속성 정보 간의 시공간적 정합성이 요구되며, 각 방법론의 적절한 공간해상도와 다양한 자료를 추가적으로 검토하는 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 산림청 (한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발 사업 (2017045A00-1720-BB01)과 (2017044B10-1819-BB01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- DeFries R, Achard F, Brown S, Herold M, Murdiyarso D, Schlamadinger B & de Souza Jr C. 2007. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental science & policy*. 10 (4): 385-394.
- FEA (Federal Environment Agency). 2014. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2012. Dessau: Federal Environmental Agency
- Fuchs H, Magdon P, Kleinn C & Flessa H. 2009. Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: Combining satellite imagery and field inventory. *Remote Sensing of Environment*. 113 (3): 518-531.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2014. National Greenhouse Gas Statistics Measurement, Reporting and Verification (revised 2014). Seoul: Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2015. A study on Land Use and Land Use Change Matrix in LULUCF Field Using Spatial Image Information. Seoul: Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2017. 2017 National Greenhouse Gas Inventory Report. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Seoul: Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea
- Hwang JH, Jang RI & Jeon SW. 2018. Analysis of Spatial Information Characteristics for Establishing Land Use, Land-Use Change and forestry Matrix. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 21 (2): 44-55.
- IPCC. 2000. Good practice and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Chapter 7. Methodological Choice and Recalculation. Paris: IPCC/OECD/IEA
- IPCC. 2003. Good Practice Guideline for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Hayama: IPCC/IGES
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama: IPCC/IGES
- Jeon SW, Kim J & Jung H. 2013. A Study on the Forest Classification for Ecosystem Services Valuation-Focused on Forest Type Map and Land cover Map. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 16 (3): 31-39. (in Korean with English abstract)
- Kim HR. 2009. A study on Construction of National Green House Gas Inventory system. *Statistical Research*

- Institute Research Report. Daejeon, Korea: Statistical Research Institute. Research Report 2009-4.
- Kim S, Kim I, Jun B & Kwon H. 2018. A Study on the Availability of Spatial and Statistical Data for Assessing CO₂ Absorption Rate in Forests - A Case Study on Ansan-si. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 27 (2): 124-138.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2009. The 5th National forest Inventory and Forest health monitoring - Field manual version 1.3. Seoul: National Institute of Forest Science
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011a. The 5th National forest Inventory Report. Seoul: National Institute of Forest Science
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011b. The 6th National forest Inventory and Forest health monitoring - Field manual. Seoul: National Institute of Forest Science
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011c. The mapping of 5th Forest type map using Aerial photography DB data. Seoul: Korea Forest Research Institute
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2012. Standard carbon removal of major forest species briefing memo. Seoul: National Institute of Forest Science
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2014. Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea. Seoul: National Institute of Forest Science
- KFS (Korea Forest Service). 2010. Statistical yearbook of forest. Daejeon: Korea Forest Service
- Lee S, Yim JS, Son Y, Kim R. 2016. Recalculation of Forest Growing Stock for National Greenhouse Gas Inventory. *Journal of Climate Change Research*. 7 (4): 485-492. (in Korean with English abstract)
- ME (Ministry of Environment). 2002. Construction of land cover map using satellite image data. Daejeon: Korea Environment Institute
- MFE (Ministry for the Environment). 2017. New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990-2015. Wellington: Ministry for the Environment (MFE)
- MOLIT (Ministry Of Land, Infrastructure and Transport). 2016. Study on development of new control system using spatial information and improvement plan of application. Sejong: Ministry Of Land, Infrastructure and Transport
- NIES (National Institute for Environmental Studies). 2017. National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan 2017. Tsukuba: National Institute for Environmental Studies
- Park JW, Na HS & Yim JS. 2017a. Comparison of Land-use Change Assessment Methods for Greenhouse Gas Inventory in Land Sector. *Journal of Climate Change Research*. 8 (4): 329-337.
- Park J, Yim J & Lee J. 2017b. Evaluation of a Land Use Change Matrix in the IPCC's Land Use, Land Use Change, and forest Area Sector Using National Spatial Information. *Journal of forest and environmental science*. 33 (4): 295-304.
- SEPA (Sweden Environmental Protection Agency). 2017. National Inventory Report Sweden 2017. Stockholm: Sweden Environmental Protection Agency
- Sim W, Park JM, Lee JS. 2017. A Study on the Utilization Plan of National Geospatial Information for Land Use Change Matrix. *Journal of Forest Economics*. 24 (2): 41-50.
- Yu SC, Ahn W & Ok JA. 2015. A Study on Construction Plan of the Statistics for National Green House Gas Inventories (LULUCF Sector). *Journal of Korea Spatial Information Society*. 23 (3): 67-77.
- Yim J, Kim R, Lee SJ & Son YM. 2015. Land-use change assessment by permanent sample plots in national forest inventory. *Journal of Climate Change Research*. 6 (1): 33-40. (in Korean with English abstract)