

정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위한 공간 범위별 이산화탄소 흡수량 비교 분석 - 서울시를 대상으로 -

홍세기* · 함보영** · 최솔이*** · 김휘진*** · 하람** · 박수경**** · 이우균*****†

*고려대학교 기후환경학과 석사과정학생, **고려대학교 오정리질리언스연구원, ***고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생,
****APEC 기후센터 예측기술과, *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Comparative Analysis on the Sequestration of CO₂ Depending on Spatial Ranges for Estimating Greenhouse Gas Inventory in Settlement - In Case of Seoul -

Hong, Segi* · Ham, Boyoung** · Choi, Sol-E*** · Kim, Whijin*** · Ha, Ram** · Park, Sugyeong**** · Lee, Woo-Kyun*****†

*M.S. Student, Dept. of Climate Environment, Korea University, Seoul, Korea

**Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

***Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

****Researcher, Prediction Research Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

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

ABSTRACT

Land Use, Land-Use Change and Forestry includes the only carbon sink among greenhouse gas (GHG) inventory, and the significance of accurate statistics has increased. However, the exact amounts of GHG absorption and emissions cannot be calculated due to the absence of definition and activity data in the settlement sector. Therefore, this study established the concept and activity data of settlement area in South Korea by reviewing the definition suggested by IPCC and Annex 1 countries and calculated GHG absorption. Considering the possibility of connecting current MRV guidelines, existing national statistics, country and urban planning data, and unifying management authority, settlement can be defined in three ways, as a Land category, Urban area, and Urban & Plan management. The study built activity data based on concept 1 and 2, which rarely overlap with the other land categories, and the study area is Seoul, with the largest proportion of settlements in the country. Of the area of Korea, 10% was used as activity data based on systematic sampling, and GHG absorption was estimated applying the factors identified by the IPCC. The result showed GHG absorption by ‘land category’ and ‘urban area’ of 72,990.7 tCO₂·yr⁻¹ and 201,287.73 tCO₂·yr⁻¹, respectively. This means that CO₂ absorption can vary depending on the factors that influence the area of vegetation within the settlement. The study identified the share of GHG statistics in settlement sector based on outcomes and contributed to the basis for calculation at the national level.

Key words: LULUCF, National Greenhouse Gas Inventory Report, Settlement, Activity Data

1. 서론

2015년 파리협정이 채택됨에 따라 모든 당사국은 온실가스 감축 의무를 지니게 됨에 따라, 각국은 5년 주기로

국가온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)의 제출과 매년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report, NIR)를 발간하고 있다. 온실가스 인벤토리 보고서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 지침

†Corresponding author : leewk@korea.ac.kr (Room No. 319, East building College of Life Science & Biotechnology, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3016)

ORCID 홍세기 0000-0001-5299-1238
최솔이 0000-0002-9465-8174
하 램 0000-0001-6051-6269
이우균 0000-0002-2188-359X

함보영 0000-0002-3303-0201
김휘진 0000-0002-7093-7312
박수경 0000-0002-2065-041X

에 따라 작성하고 있고, LULUCF 분야는 IPCC 가이드라인(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC GL)에서 제시한 6가지 토지이용 분류(산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타토지)에 따라 산정하고 있다(GIR, 2020).

이에 따라 Annex 1 국가에서는 IPCC GL에서 제시하고 있는 LULUCF 내 각 부문의 정의를 기반으로 각 나라의 상황에 따라 공간적 범위를 구분하여 온실가스 인벤토리를 작성하고 있다. 국내에서도 LULUCF 부문 내 산림지, 농경지, 초지, 습지 등은 IPCC GL에서 제시하고 있는 정의에 따라 공간적 범위를 규정하여 산정하고 있다. 하지만 현재 국내 정주지 부문은 정의와 그에 따른 공간적 범위가 확정되지 않았기 때문에 산정하지 못하고 있다(GIR, 2020; Yu et al., 2015).

IPCC 2006 GL에서는 정주지를 타 토지이용범주에 포함되지 않는 교통 기반시설과 다양한 규모의 인간 거주지를 포함하는 모든 개발된 토지로 정의하고 있고(IPCC, 2006), Annex 1 국가들은 국가별 상황에 맞춰 자체적인 정의를 개발하였다. 독일은 모든 정주지 영역은 하나의 단일 범주로 통합하여 관리하고 세부유형으로는 정주지, 운송지역 그리고 수역을 동반한 황무지 및 식생이 없는 지역 등을 포함한다(FAO, 2019). 스웨덴의 경우 모든 정주지는 관리되는 토지로 가정하고 주요 기반시설이 밀집된 지역, 운송을 위한 영역 등으로 구분하고 있다(SEPA, 2019). 미국은 주거용, 산업용, 상업용 및 기관용 토지를 포함하는 0.1 ha 이상의 단위로 이루어진 개발 지역을 나타내는 토지이용범주로 정의하고 있다. 또한, 미국 NIR에서는 중복 사용에 대한 토지에 대해 우선순위를 매기는 방식을 적용해 다른 토지에 비해 구성요소가 가장 이질적인 정주지를 가장 우선 산정하고 있다(EPA, 2019). 일본은 주거지와 교통 인프라를 포함한 모든 개발된 토지로 정의하며 타 토지이용범주와 중복되는 토지는 배제한다(ME, 2019). 따라서 IPCC GL에서의 정주지의 정의와 국외의 사례들을 종합하여 국내 실정에 맞는 정주지의 정의 및 공간적 범위를 설정하고 이를 바탕으로 정주지 부문 온실가스 인벤토리 구축을 위한 기반 마련이 필요한 실정이다.

국내 실정에 맞는 정주지의 공간적 범위 설정을 위해서는 국내의 토지관리체제와 그에 따른 공간정보의 구축 현황에 대한 검토가 필요하다. 우리나라 국토관리 체계의 토지이용 구분 기준은 크게 ‘국토의 계획 및 이용에 관한 법률’ 상 용도지역과 ‘공간정보의 구축 및 관리 등에 관한

법률’ 상 지목으로 볼 수 있다(MOLIT, 2020). 용도지역에 따른 토지분류 체계에서는 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역으로 구분하고 있고, 도시지역을 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로 분류하고 있다(국토의 계획 및 이용에 관한 법률, 2013). 지목에 따른 분류에서는 산림지, 농경지, 초지, 습지 등으로 분류되는 지역을 제외한 19개 지목(광천지, 염전, 대, 공장용지, 학교용지, 주차장, 주유소 용지, 창고용지, 도로, 철도용지, 제방, 수도용지, 공원, 체육용지, 유원지, 종교용지, 사적지, 묘지, 잡종지)이 국내 정주지에 해당된다. Choi et al.(2020)에서는 정주지 부문의 온실가스 인벤토리 시범 산정을 위하여 정주지로 구분되는 19개 지목을 활용하여 정주지의 공간적 범위를 규정하고 온실가스 인벤토리를 산정하였다. Jeong (2013)은 도시형 토지관리를 위한 용도지역제와 지목제도의 연계 필요성 및 방향을 제시하였다.

정주지의 공간적 범위를 설정한 후에는 온실가스 통계 산정을 위해 토지간 전용관계 파악을 위한 접근방법 및 활동자료 구축 방법이 제시되어야 한다. 토지이용변화 파악을 위한 연구로 Park et al.(2020)은 토지피복지도를 활용한 Wall to Wall 방법을 적용하여 토지간 전용관계를 파악하였고, Park et al.(2018)은 Sampling 방법과 Wall to Wall 방법을 비교하여 토지이용변화 및 CO₂ 저장량을 추정하였다. 또한, 국가산림조사의 표본점과 산림항공영상 등을 활용한 토지이용변화 연구도 다수 수행된 바 있다(Park et al., 2017; Park et al., 2017; Park et al., 2019; Yim et al., 2020). LULUCF 부문에서의 활동자료는 온실가스 흡수·배출원에 대한 자료를 포함하도록 하고 있으며, 탄소저장고는 바이오매스, 토양, 고사유기물로 구분하여 활동자료를 구축하도록 하고 있다(IPCC, 2003). Park et al.(2016)은 토양형 구분에 따른 농경지 분야 활동자료 구축을 수행하였다. Choi et al.(2020)은 정주지 부문의 온실가스 산정을 위해 정주지 내 교목의 수관면적 변화를 통한 CO₂ 흡수량을 산정하였다. 또한, 토지피복도와 전국 도시림 현황통계 중 생활권도시림현황 면적 비율을 적용하여 정주지 내 임목 바이오매스 면적을 산출하여 인벤토리를 산정하는 연구가 수행되었다(GIR, 2015). Odile et al.(2018)은 LULUCF부문의 활동자료 구축을 위해 원격탐사자료와 토지이용·토지피복 통계자료를 활용하여 분류기법별 자동화를 수행하였다.

이상을 볼 때, LULUCF 분야는 현재 정주지 부문의 정의 및 활동자료 미비로 인해 통계구축이 이루어지지 않고 있어 인벤토리의 완전성이 미흡한 상황이라고 볼 수 있

다. 이에, 본 연구에서는 IPCC GL의 정주지 정의에 부합하며 국내 적용 가능한 정주지의 공간적 범위를 설정하고, 원격탐사자료와 국가공간자료를 활용한 활동자료 구축을 통해 온실가스 통계를 산정하고자 한다.

2. 연구 재료

2.1 연구 대상지

서울시의 총 면적은 약 60,524 ha이고 이는 전 국토면적의 약 0.6%에 해당하며, 지리적으로는 북위 37도 34분, 동경 126도 59분으로 한반도 중서부에 위치한 분지형의 도시이다. 서울시는 전체 면적 대비 용도지역 상 도시지역을 약 98.7% 포함하고, 지적상 정주지로 구분 가능한 19개 지목을 포함하는 면적이 약 63.9%에 해당한다. 이에 따라 전 국토에서 정주지로 정의될 수 있는 공간적 범위의 비율이 가장 높은 지역이기 때문에 본 연구의 대상지로 선정하였다(Fig. 1).

2.2 연구재료

정주지 부문의 공간적 범위 설정 및 활동자료를 구축하기 위해서는 이용 가능한 자료의 확보와 활동자료의 세부 범위 분석 및 관리현황 등이 함께 고려되어야 한다. 본 연

구에서는 국내에서 활용할 수 있는 원격탐사자료 및 국가공간자료를 검토 및 활용하여 정주지의 공간적 범위를 설정하고 그에 따른 활동자료를 구축하였다.

정주지의 공간적 범위를 설정하기 위한 자료로서 용도지역도와 연속지적도의 분류 및 세부항목을 검토하여 활용하였다. 용도지역도는 국토를 경제적, 효율적으로 이용하고 토지이용의 종합적인 조정과 관리를 위하여 토지를 구분한 공간자료이며, 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역으로 구분하고 있다. 연속지적도는 국내 지적 현황을 세부 지목별로 작성한 지도로서 도시계획도, 농지관리도, 등 지형도면고시의 기본도로 활용되고 있다. 연속지적도는 온실가스 통계 산정 시 토지이용범주별 세부 지목 변화에 대한 공간적인 면적의 확인이 가능하다(MOLIT, 2020). 정주지 부문을 비롯한 LULUCF 부문의 온실가스 산정 대상은 CO₂, CH₄, N₂O로, 이를 배출·흡수하는 대상에 대하여 활동자료를 구축해야 한다(GIR, 2020). 이에 따라, 정주지 부문의 활동자료는 정주지로 구분되는 지역 내의 바이오매스, 토양, 고사유기물 등에 대한 자료를 작성하여야 한다. 활동자료 구축을 위한 기초자료로서 국토지리정보원에서 제공하는 정사 항공영상을 사용하였으며, 정사 항공영상의 도시지역 해상도는 12 cm, 일반지역은 25 cm로 제작되고 1 : 5,000 도엽 단위로 제공된다. 본 연구에서는 25 cm 해상도의 2018년 항공영상을

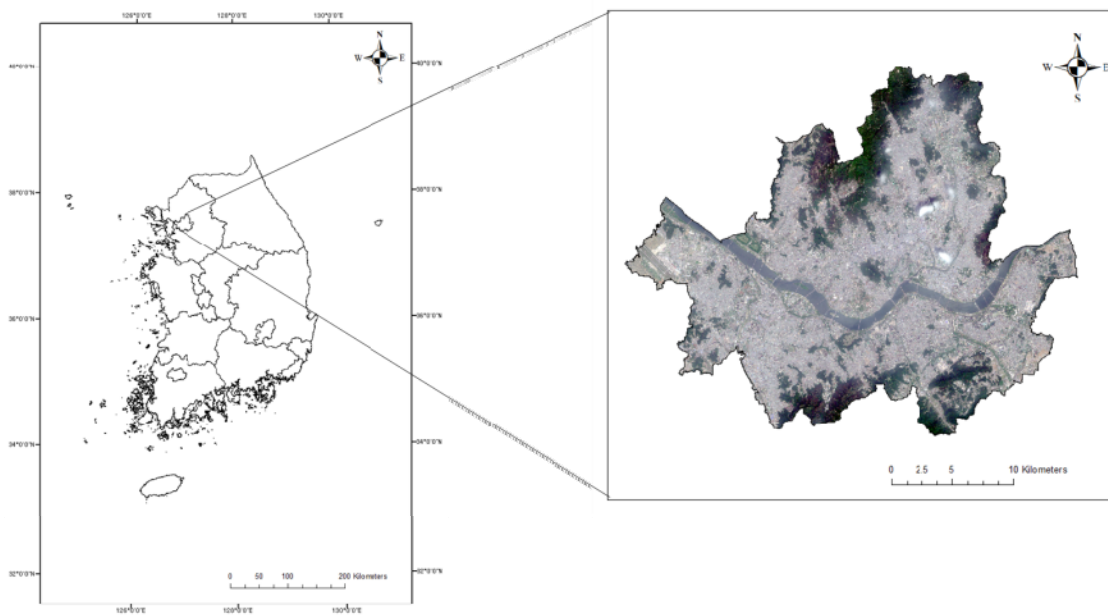


Fig. 1. Study area and orthographic images

사용하였고 ArcGIS를 활용하여 위치정보를 기반으로 한 수관의 형태를 육안판독하여 활동자료를 구축하였다. 또한, 활동자료 구축 시 임상도와 스마트팜 맵을 활용하여 정주지 내 산림지와 농경지의 분류 시 구획 및 속성정보 입력의 정확도를 향상시켰다.

3. 연구방법

3.1 정주지 공간적 범위 설정

정주지의 세부 범위 설정을 위해서 국가기본통계자료 및 공간자료 등을 활용하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 국내 정주지의 공간적 범위 설정을 위해 국토·도시계획과의 연계 가능성, 관리 주체 일원화 가능성, 현행 MRV (Measurement, Reporting and Verification) 지침과의 연계성 그리고 국가통계의 여부 등을 고려하였다. 또한, 공간적 범위 제시와 관련해서는 현재 통합된 국토이용체계가 개발되지 않았기 때문에 LULUCF 모든 부문에

적용 가능한 국가 통계자료에 근거한 세부 범위를 제시할 필요가 있다. 정주지역은 타 부문에 비해 토지 이용의 전환이 빠르고 토지 전용을 대비한 관리가 필요한 영역이기 때문에, 현재 토지이용 상황을 나타내는 지목과 용도에 따라 토지의 이용을 구분한 용도지역을 함께 고려하여야 할 필요가 있다(MOLIT, 2020). 따라서, 용도지역의 도시지역과 계획관리지역 그리고 연속지적도의 타 부문과 중복되지 않는 19개 지목을 활용하여 공간적 범위를 도출하였고 이를 종합하여 국내 정주지 개념 및 범위에 적용 가능한 대안을 도출하였다(Fig. 2[A]).

3.2 활동자료 구축 방법

표본추출 기법은 모집단의 정보를 얻기 위해 표본을 분석하는 것으로서, 국가산림자원조사(National Forest Inventories)와 같은 토지이용 관련 데이터는 대개 표본 조사를 통해 얻어지며 탄소저장량 산정에 사용된다(IPCC, 2006). 본 연구에서는 전국 정주지를 500 m × 500 m 격자로 구분한

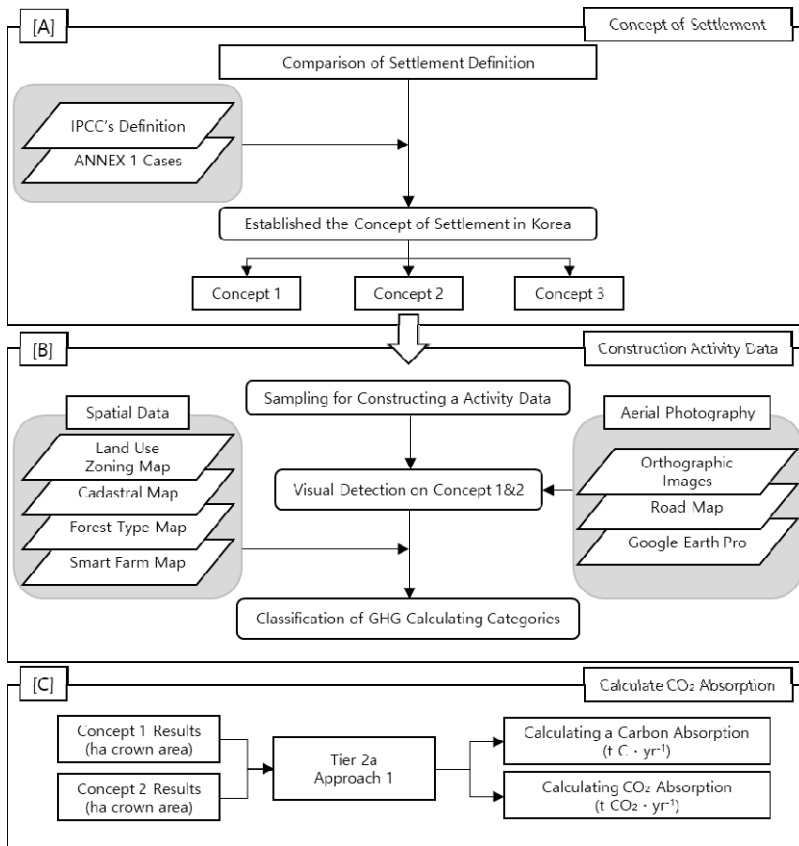


Fig. 2. Study flow of this study

모집단에서 표본추출의 기법 중 계통추출법(Systematic Sampling)(신뢰수준 95%, 표본오차 0.5%)을 통해 얻어진 10%의 표본구를 선정하여 표본 지역을 전수 판독하였고, 본 연구의 대상지인 서울시는 257개의 격자가 포함되었다(Fig. 2[B]). 활동자료의 판독 대상은 본 연구의 정주지 범위 내 지역의 녹화 지역과 나지를 대상으로 식생층위, 임상, 수종, 입지정보를 고려하여 판독하였다. 활동자료의 구획 방법은 10 m² 이상의 수관면적을 기준으로 하였고, 교목은 2 m 이상, 이하는 관목으로 분류하여 구획하였다. IPCC에서는 모든 탄소저장고(바이오매스, 고사유기물, 토양) 중 한 가지 만이라도 온실가스 통계를 산정한다면 해당 유형에 대한 통계로 인정하고 있으므로 본 연구에서는 바이오매스에 대한 온실가스 통계만을 산정범위로 하였다. 또한, IPCC에서 요구하는 최소산정요건이 교목이기 때문에 본 연구에서는 교목만을 판독하여 활동자료를 구축하였다(Fig. 2[B]).

3.3 온실가스 통계 산정방법

정주지 부문 온실가스 통계 산정을 위해서는 최소 20년 동안의 토지이용변화 면적에 대한 활동자료와 정주지 수목에 적합한 국가고유계수가 필요하다. LULUCF 분야의 온실가스 통계 산정 시 공통적으로 해당 지역의 바이오매스, 고사유기물, 토양에 관한 온실가스 통계를 산정하도록 권고하고 있으며, 정주지 부문의 온실가스 산정 유형을 ‘정주지로 유지된 정주지’와 ‘타 토지에서 전용된 정주지’로 구분하였다(IPCC, 2006). 본 연구에서는 단일 시기의 활동자료만을 구축하였으므로 전체 정주지의 공간적 범

위에 대하여 정주지로 유지된 정주지로 가정하였다. 이는, 토지전용에 대한 정보가 포함되지 않으므로 IPCC GL에서 명시한 Approach 1의 산정방법이고, Tier 2a의 산정방법을 적용하였다. 교목의 Tier 2a 기본 계수는 2.9 tonnes C (ha crown cover)⁻¹ yr⁻¹이며, Tier 2에서는 초본, 관목 식생은 0으로 간주하여 고려하지 않아도 된다(Equation. 1) (IPCC, 2006). 산정된 탄소흡수량 값에 이산화탄소 전환 계수 44/12를 곱하여 이산화탄소흡수량을 도출하였다.

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} A T_{i,j} \cdot CRW_{i,j} \quad (1)$$

ΔC_G = annual carbon accumulation attributed to biomass increment in Settlements Remaining Settlements, tonnes C yr⁻¹

$A T_{i,j}$ = total crown cover area of class i in woody perennial type j, ha

$CRW_{i,j}$ = crown cover area-based growth rate of class i in woody perennial type k, tonnes C (ha crown cover)⁻¹ yr⁻¹

4. 결과

4.1 국내 정주지 대안 및 공간적 범위 설정

정주지의 공간적 범위설정을 위해 IPCC 정주지 정의와 국내 실정을 고려하여 3개의 대안을 도출하였다(Table 1). 첫 번째 대안은 ‘지목형(Land category)’으로 현행 MRV 지침에 의거하여 타 부문과 동일한 수준에서의 국가통계

Table 1. Definition and spatial ranges of settlement

Division	Type	Characteristics	Description
Concept 1	Land category	Scope	19 categories of land not overlap with other LULUCF sector on the cadastral map (mineral spring site, salt farm, site, factory site, school site, parking zone, gas station, storage site, road, railroad, embankment, waterways, park, physical site, amusement park, religion site, historic site, graveyard, miscellaneous land)
		Advantage	quick calculation on a GHG statistics
		Disadvantage	difficulty of establishing future-oriented plan
Concept 2	Urban area	Scope	19 categories of land not overlap with other LULUCF sector on the cadastral map and urban area on the land use zoning map (residential area, commercial area, industrial area, green area)
		Advantage	high efficiency in terms of land management
		Disadvantage	complicated to calculate GHG due to detailed type
Concept 3	Urban & Plan management	Scope	19 categories of land not overlap with other LULUCF sector on the cadastral map and urban area on the land use zoning map and plan management area
		Advantage	spatio-temporal continuity for climate change adaptation & mitigation in terms of long term perspective
		Disadvantage	the area ratio currently calculated in other sector is high, consultation on the calculation system is needed

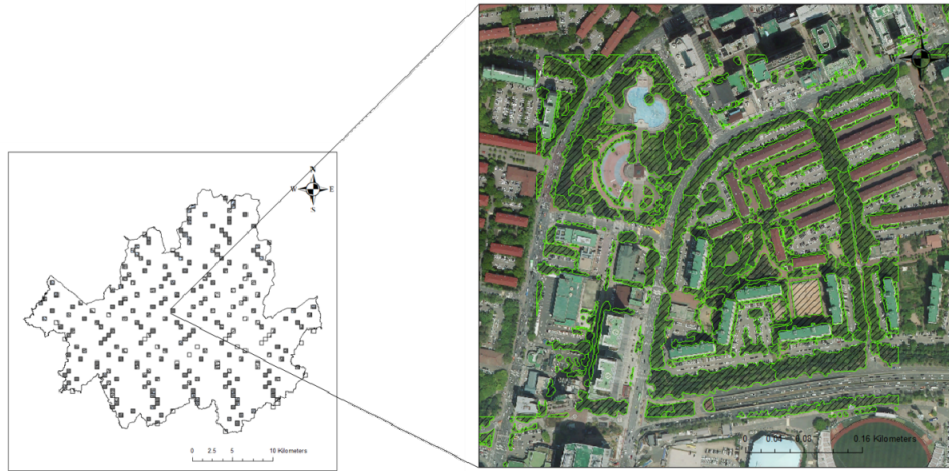


Fig. 3. Sample result of visual detection

를 이용하는 방법이며, IPCC의 정의에 따라 국내에서 지적 상 산림지(임야), 농경지(전, 답, 과수원), 초지(목장용지), 습지(하천, 구거, 유지, 양어장) 등 타 토지에서 산정하지 않는 토지를 대상으로 하는 방법이다. 이는 현행 관리 체계를 유지하여 실행 주체가 명확하고 빠른 온실가스 통계 산정이 가능하다. 또한, 공간 관리와 관련한 법적 근거가 충분히 확보되어 있어 기후변화 대응 계획 수립 시 업무 단위별 실행 주체가 확실하다. 그러나, 토지이용 현황 중심의 구분 단위로, 온실가스 관리를 위한 국토의 미래지향적 계획 수립에 어려움이 있을 수 있다. 실제로 지목형은 현재 토지의 이용현황에 따라 토지의 종류를 구분한 것으로(Ryu, 2019), 향후 토지의 이용현황에 변화를 예측할 수 없으며, 이를 관리하기 위한 계획 수립에 어려움

이 있다. 두 번째 대안은 ‘도시지역형(Urban area)’으로, 우리나라 국토·도시계획의 기본단위이자 현재 국토이용계획의 기반이 되는 용도지역 중 IPCC GL에서 제시하는 ‘교통시설과 다양한 규모의 인간 거주를 포함하는 모든 개발된 토지’에 해당하는 도시지역을 포함한다. 계획 수립과 실행 주체가 일원화되어 국토관리 측면에서 높은 효율을 보일 수 있고, 일부 선진 국가에서 적용하는 온실가스 산정 방식과 유사하여 국제 사회에 방법론을 제시하기 수월한 장점이 있다. 미국에서는 LULUCF 부문의 온실가스 산정을 위하여 국가 단위로 작성된 국가자원인벤토리(National Resources Inventory, NRI)와 산림인벤토리(Forest Inventory and Analysis, FIA), 국가 토지피복 데이터셋(National Land Cover Dataset, NLCD)을 활용하고 있

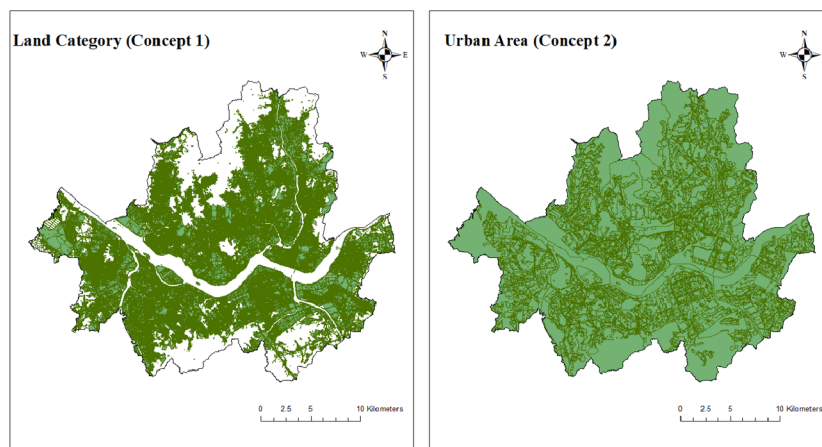


Fig. 4. Scope of settlement in Seoul for Land Category and Urban Area

Table 2. GHG statistics for Land Category and Urban Area

	Land category	Urban area	Urban & Plan management
Area of settlement in Seoul (ha)	38,720.48	60,521.90	60,521.90
Area of settlement in sample (ha)	3,823.10	6,126.72	6,126.72
Crown area of trees (ha)	7,380.22	19,850.78	19,850.78
Ratio of trees (ha)	19.06%	32.8%	32.8%
Carbon absorption ($tC \cdot yr^{-1}$)	21,402.66	57,567.28	57,567.28
CO ₂ absorption ($tCO_2 \cdot yr^{-1}$)	78,476.41	211,080.04	211,080.04

(unit: ha)

으며 특히, NRI에서 도시지역으로 대규모 및 시가화 지역, 4ha 미만의 소규모 시가화 지역, 농촌 운송 통로 등으로 구분하여 공간적 범위를 명시하여 활용하고 있다(EPA, 2019). 그러나, 도시지역 내 포함되는 다양한 세부 유형별 온실가스 산정으로 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정이 복잡해질 수 있다. 또한, 현행 관리 체계와의 차이가 있고 부처별 관리 범위에 대한 협의가 선행되어야 할 필요가 있다. 세 번째 대안은 ‘도시 및 계획관리형(Urban & Plan management)’으로, 국토계획과의 연계성을 통한 도시지역 탄소흡수원 추가 확보를 위해 도시지역 외에도 인간 정주활동을 지원하는 준 도시지역을 포함하는 범위로서 용도지역상의 계획관리지역을 포함한다. 도시 및 계획관리형은 비도시지역까지 통합관리하는 대안으로서 장기적인 관점에서 국토 전반에 대해 기후변화 대응 적응과 감축을 위한 시공간 연속성 확보가 가능한 장점이 있는 반면 현재 타 부문에서 산정하고 있는 면적 비율이 높아 산정체계에 대한 협의가 필요하다.

4.2 대안 1&2 활동자료 구축 및 온실가스 산정 결과

본 연구에서는 정주지 정의로 제시한 대안별 공간범위에 따른 활동자료를 구축하였다(Fig. 3). 도시 및 계획관리형의 경우 연구 대상지인 서울시에 대하여 도시지역형과 공간적 범위가 동일하기 때문에 활동자료 구축 시 도시지역형의 결과를 사용할 수 있다. 지목형의 공간적 범위인 19개 지목에 해당하는 면적은 전 국토면적의 약 10.8%인 1,086,700 ha에 해당한다. 도시지역형은 도시지역 내에 포함되는 모든 유형의 식생을 정주지 내의 흡수원으로 산정하며, 이러한 전국 도시지역의 면적은 국토면적의 약 21.7%인 2,178,400 ha에 해당한다. 활동자료 구축 시 용도지역도를 활용한다면, 도시지역으로 분류된 이외의 지역

은 MRV 지침에 따른 토지이용구분 방법을 적용하여 해당 공간 범위를 구축할 수 있다. 그 중, 본 연구 대상지인 서울시는 각 대안에 따른 정주지 면적이 38,720 ha, 60,521 ha이며 전체 서울시 면적의 약 63.9%, 99.9%가 해당한다(Fig. 4).

지목형 및 도시지역형의 활동자료 구축 결과 국내 정주지의 정의를 지목형으로 설정하였을 때 해당하는 면적은 38,720.48 ha이고 용도지역형으로 설정하였을 때 해당하는 면적은 60,521.90 ha로서 약 1.56배의 차이를 보인다. 지목형의 정주지보다 용도지역형의 녹지 비율이 높은 것은 지목형에서는 산림지의 면적은 활동자료 구축 범위에서 제외되기 때문인 것으로 보여진다. 대안별로 산정된 정주지 내 교목의 수관 면적은 지목형이 7,380.22 ha, 도시지역형은 19,850.78 ha이고, Tier 2a 방법에 따른 연간 CO₂ 흡수량은 각각 78,476.41, 211,080.04 t CO₂/ha · yr로 산출되었다(Table 2). 정주지 정의의 차이에 따른 공간적 범위의 차이는 정주지 내의 식생의 면적도 차이가 날 수 있음을 알 수 있고, 이때 CO₂ 흡수량은 약 3.7배의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 정주지 부문의 온실가스 산정을 위해서는 정주지 부문의 정의와 공간적 범위의 설정을 명확히 해야 함을 나타낸다.

5. 고찰

본 연구에서는 LULUCF 분야의 정주지 부문의 온실가스 통계 산정을 위하여 공간적 범위를 3가지 안으로 도출하였고, 서울시를 대상으로 활동자료의 시범 구축과 온실가스 통계 산정을 수행하였다. 그러나, 우리나라는 아직 LULUCF 부문별 공간적 범위에 대한 부처간 협의가 필요한 단계에 있어 정확한 정주지의 범위를 결정하기에는

어려움이 있었다(MOLIT, 2020). 정주지는 다양한 국가 공간자료를 사용하여 각 공간자료의 비정합성이 크게 나타나는 문제가 발생하는 지역이다. IPCC의 정주지 정의가 타 부문에서 산정하지 않는 영역을 대상으로 하기 때문에 공간 범위에 대한 기준이 모호하고(IPCC, 2006), 인구가 밀집하여 용도가 다양하게 분화되므로 이로 인한 국토 관련 법제에 영향을 받는 지역이다. 본 연구에서는 IPCC의 정주지 정의에 부합하면서 국내에서 활용가능한 공간자료를 사용하여 국내 정주지의 공간적 범위를 제시하였다.

지목형의 경우, 필지별 공간 정합성이 떨어지는 한계를 지니고 있어 타 부문과 경계부 불일치가 발생하나(Choi et al, 2020), 행정관리 범위와 온실가스 산정범위의 일원화로 부처 간 협의시 갈등이 최소화 될 것으로 보여진다. 도시 지역형의 정의는 현재 국토·도시계획에서 사용하는 도시 지역 정의와 부합하기 때문에 도시지역 관리 타당성을 확보할 수 있고 LULUCF 타 부문 간 정합성을 유지하면서 매트릭스를 구축할 수 있는 개선 방안을 제시할 수 있다. Eo et al.(2010)은 용도지역도의 도시지역을 활용하여 도시 지역의 과거 40년간의 토지이용변화와 탄소배출량을 비교 분석하였다. 그러나, 현재 정주지 유형에 따라 계획·관리·온실가스 산정 등 관리 권한이 분산되어 부처 간 복잡한 행정절차가 필요할 것으로 생각된다. 도시 및 계획관리형은 보다 광범위한 정주지 범위로서 현재 도시지역과 향후 도시가 될 지역을 범위로 장기적인 관점에서 탄소흡수원 확보를 위한 거시적인 계획 수립에 용이하다. 그러나, 도시지역형과 마찬가지로 타 부문에서 산정하고 있는 면적 비율이 높아 부처간 협의가 필요할 것으로 생각된다.

앞서 제시한 대안 1~3의 한계점을 고려한 정주지 관리 방법으로는 IPCC GL에 따라 토지피복에 기반한 신규 구획을 통해 통합주제도를 작성하여 정주지를 관리하는 방법이다. 국내 토지이용체계의 경계의 부정합 등 지적의 문제, 이용 환경의 다양성을 반영하지 못하는 용도지역의 문제를 넘어 위성영상 기반의 신규 공간을 설정하여 종합적인 국토계획 관점의 토지이용 관리를 달성하는 것을 목표로 하는 이상적인 방안으로 Tier 3 수준의 국가 온실가스 인벤토리 작성이 가능하다. 그러나, 현행 체계에서 관련 법령이 전무하여 법적 근거 마련이 필요하고 국가 통계와의 정합성 확보에 많은 자원이 요구될 것으로 보여진다.

온실가스 통계 산정의 측면에서, 2006 IPCC GL에 따라 '정주지로 유지된 정주지'와 '타 토지에서 전용된 정주

지'로의 온실가스 통계 산정을 위해서는 Approach 2 이상 수준의 활동자료가 필요하다. 이를 위한 토지피복변화 매트릭스를 구축하기 위해서는 최소 2개 시기의 변화를 산출해야 한다. Sim et al.(2017)은 LULUCF 분야 통계를 인정받기 위해서는 과거 20년간의 토지전용정보를 파악하여 활동자료의 체계적인 구축이 필요하다고 언급하였고, Yu et al.(2019)은 LULUCF 분야 토지이용변화 매트릭스 작성을 위해 1987년부터 20년간의 위성영상과 국가공간자료를 활용한 방법을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 단일 시기의 항공영상만을 사용하여 활동자료를 구축하였기 때문에 '정주지로 유지된 정주지'의 온실가스 통계 산정을 수행하였고, 본래 Tier 1 적용 시 '정주지로 유지된 정주지'의 탄소저장량은 '0'으로 계산하지만 정주지의 온실가스 감축 기여도 확인을 위해 Tier 2a의 계수를 사용하였다. 또한, 온실가스 산정을 하는 세 가지 탄소저장고(바이오매스, 고사유기물, 토양) 중 바이오매스에 대한 통계만을 산정하였다.

본 연구 결과는 수목의 비율이 매우 높은 수준으로 나타났다는데, 이는 연구 대상지 특성에 따라 정주지로 구분된 지역이 대부분 구도심으로 구성되어 있고, 수목의 임령이 높아 수관면적이 매우 발달한 수형 패턴을 보이기 때문인 것으로 사료된다(Choi, 2011). 또한, 본 연구에서는 공간적 범위 설정을 위해 연속지적도와 용도지역도를 활용하였는데, 용도지역도의 도시지역을 활용한 대안2와 3의 경우, 서울시 전체가 정주지로 분류되는 것으로 나타났다. 이는, IPCC의 정주지 정의에 부합하는 범위이긴 하나, 하나의 행정구역이 하나의 토지이용으로 구분된다는 한계가 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위하여 미국에서는 NRI, FIA, NLCD 등 다양한 자료를 융합하여 토지이용구분을 수행하고 있으며, 일본의 경우에는 국가산림자원 데이터베이스(National Forest Resources Database), 경지면적통계(Statistics of Cultivated and Planted Area), 토지이용조사(Land Use Status Survey) 등의 자료를 활용하고 있다. 또한, 미국과 일본에서는 다양한 공간자료를 융합하고 활용함에 있어 토지이용구분 결정에 우선순위를 부여하여 중첩 및 이중계산을 방지하고 있다. 따라서 국내에서도 이러한 국제적 기준에 부합하도록 각 부처에서 협의된 기준에 따라 다양한 공간자료를 활용하여 정주지 및 타 부문의 토지이용구분에 대한 공간범위를 결정하여야 할 것이다.

향후 연구에서는 정주지 부문의 정확한 온실가스 통계 산정을 위해 부처간 협의를 통한 국내 정주지의 범위 정

립과 활동자료의 고도화를 위한 과거 수준의 원격탐사자료 및 국가공간자료를 확보하고 정주지 내 수목에 가능한 배출·흡수 계수의 개발이 이루어 진다면 Tier 2a, Approach 2 이상 수준의 온실가스 통계 산정이 가능할 것으로 사료된다. 이는 현재 LULUCF 타 부문 온실가스 통계 산정 수준이 산림의 바이오매스를 제외하고는 Tier 1 인 점을 고려하면 보다 신뢰성 있는 정주지 부문의 온실가스 통계 산정이 가능할 것으로 예상된다.

6. 결론

파리협정 이후로 각 국가는 온실가스 감축 의무를 지니게 되고 국가 온실가스 감축목표(NDC) 달성을 목표로 매년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)을 작성하여 공표하고 있다. 온실가스 인벤토리의 완전성 제고를 위해 정확한 통계 산정이 수행되어야 하나, LULUCF 분야는 현재 정주지 및 기타토지 부문은 활동자료 미비로 인해 산정되지 않고 있다. 이에, 본 연구는 LULUCF 정주지 부문의 온실가스 통계 산정을 위해 IPCC 및 Annex 1 국가들의 정주지 정의를 검토하여 국내 적용 가능한 정주지의 정의를 세 가지 대안으로 도출하였다.

그 중 타 부처와의 관리 범위의 중복이 비교적 적은 두 개의 대안에 대하여 서울시를 대상으로 온실가스 통계 산정을 수행하였다. 지목형은 연속지적도에 기반하여 필지별 공간 정합성이 떨어져 타 부문과의 경계부 불일치 문제가 발생하나 빠른 온실가스 통계 산정이 가능했다. 도시지역형은 타 부문과 공간적 정합성의 문제가 발생하지 않고 선진국의 온실가스 산정 방법과도 유사하였으나, 부문간 관리지역에 대한 권한이 분산되어 관련 행정적 절차가 필요할 것으로 사료된다.

향후 부처별 협의를 통해 정주지의 범위를 정립하고 여러 시기의 원격탐사자료 및 국가공간자료를 통해 토지이용변화 매트릭스 작성이 가능할 것으로 보여지며 정주지 내 수목에 적합한 배출·흡수계수의 개발을 통해 정주지 부문의 온실가스 통계 산정의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호: 21UMRG-B158194-02)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Choi SE, Ham BY, Song CH, Park EB, Kim JW, Lee WK. 2020. Pilot Study and Development of Activity Data for Greenhouse Gas Inventory of Settlement Categories in Korea: A Case of Incheon Seo-gu. *Journal of Climate Change Research*. 11(3): 187-196.
- Choi JK. 2011. Development of Allometry and Individual Basel Area Growth Model for Major Specied in Korea. *Journal of Forest Science*. 27(1): 47-54.
- Close O, Benjamin B, Petit S, Fripiat X, Hallot E. 2018. Use of Sentinel-2 and LUCAS database for the inventory of land use, land use change, and forestry in Wallonia, Belgium. *Land*. 7(4): 1-16.
- Environment Protection Agency (EPA). 2019. Inventory of U. S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2017.
- Eo JH, Kim KT, Jung GS, Yoo HH. 2010. Analysis of Carbon Emissions and Land Use Change for Low-Carbon Urban Management- Focused on Jinju. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*. 18(1): 129-134.
- Federal Environment Agency (FEA). 2019. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2017.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). 2015. A Study on the Construction of a Matrix of Land Use and Land Use Changes in the LULUCF Sector Using Spatial Image Information(공간영상정보를 활용한 LULUCF 분야 토지이용 및 토지이용변화 매트릭스 구축 방안 연구).
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). 2020. 2020 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jeong WS. 2013. A Study on Linking Land Use Category to Zoning System toward Efficient Urban Land Management. *Journal of the Korean Cadastre Information Association*. 15(2): 3-18.

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2020. A study on the direction of settlement management policy to cope with climate change(기후변화 대응을 위한 정주지 관리정책 방향 연구).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2019. Cadastral Statistica Annual Report.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2019. Korea Land & Housing Corporation.
- Ministry of the Environment (ME). 2019. National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN.
- 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. *Journal of Climate Change Research*. 9(4): 385-398.
- Park JM, Sim WD, Lee JS. 2019. Automatic Classification by Land Use Category of National Level LULUCF Sector using Deep Learning Model. *Korean Journal of Remote Sensing*. 35(6): 1053-1065.
- Park JM, Yim JS, Lee JS. 2017. Evaluation of a Land Use Change Matrix in the IPCC's Land Use, Land Use Change, and Forestry Area Sector Using National Spatial Information. *Journal of Forest and Environmental Science*. 33(4): 295-304.
- Park JW, Na HS, Lim JS. 2017. Comparison of Land-Use Change Assessment Methods for Greenhouse Gas Inventory in Land Sector. *Journal of Climate Change Research*. 8(4): 329-337.
- Park SJ, Lee CH, Kim MS, Yun SG, Kim YH, Ko BG. 2016. Calculation of GHGs Emission from LULUCF-Cropland Sector in South Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 49(6): 826-831.
- Park SJ, Lee CW, Kim SH, Oh TK. 2020. Analysis of land use change for advancing national greenhouse gas inventory using land cover map : focus on Sejong City. 47(December): 933-940.
- Ryu BC. 2019. A New Perspectives on the Research of Domestic and Overseas Land Category System. *Journal of Cadastre & Land Information*. 49(2): 151-167.
- Sim WD, Park JM, Lee JS. 2017. A Study on the Utilization Plan of National Geospatial Information for Land Use Change Matrix. *Korean Forest Economics Society*. 24(2): 41-50.
- Swedish Environmental Protection Agency (SEPA). 2019. National Inventory Report Sweden 2019.
- Yim JS, Moon GH, Park JM, Shin MY. 2020. Comparison of Uncertainty in the Land-Use Change Matrix by Sampling Intensity. *Journal of Climate Change Research*. 11(3), 203-213.
- 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.
- Yu SC, Shin DB, Ahn JW. 2019. Analysis of Land Use, Land-Use Change, and Forestry (LULUCF) and Construction of Statistics in Korea. *Sensors and Materials*. 31(10): 3215-3228.