

국내 정주지 온실가스 인벤토리 산정을 위한 활동자료 구축 방법 개발 및 시범 적용 연구: 인천 서구를 중심으로

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

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정생, **고려대학교 환경GIS/RS센터 연구원,
고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Pilot Study and Development of Activity Data for Greenhouse Gas Inventory of Settlement Categories in Korea: A Case of Incheon Seo-gu

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

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

**Researcher, Environmental GIS/RS Center, Korea University, Seoul, Korea

***Research Professor, OJEong Resilience Institute (OJERI), Korea University

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

ABSTRACT

Measurement of greenhouse gas mitigation is important to developing a National Inventory Report (NIR). However, greenhouse gas inventory has not been conducted for settlement categories, including Land Use, Land Use Change, and Forestry sector (LULUCF), due to the lack of an established methodology. Therefore, this study focused on applying the crown cover method from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)'s Guideline to improve greenhouse gas inventory levels of Tier 2 settlements. Activity data based on crown cover were collected from ortho-images in 2010 and 2017 through supervised classification; these data were classified as the settlement remaining settlement, forest converted to settlement, and the cropland converted to settlement. Estimated crown cover was 493.70, 93.45, and 190.34 ha in 2010, and 656.80, 34.40, and 139.10 ha in 2017 (23.31 ha yr⁻¹, -8.0 ha yr⁻¹, and 7.32 ha yr⁻¹), respectively. CO₂ absorption was calculated as total 247.92 tCO₂ yr⁻¹, -456.93 tCO₂ yr⁻¹, and -257.30 tCO₂ yr⁻¹, respectively. These results had 2.20 - 34.48% variation compared with other studies based on modeling and field surveys. Based on this study, clear spatial definition for settlement is required and activity data, such as national statistics for urban forests, emission factors, and allometric functions using crown cover, should be established.

Key words: Greenhouse gas inventory, Activity data, Settlement, LULUCF sector

1. 서 론

우리나라는 1993년 기후변화협약 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)에 가입하였으며, 2002년 교토의정서 (Kyoto Protocol, KP), 2016년 파리 협정서 비준을 통해 기후변화 방지를 위한 국제사회

의 노력에 동참하고 있다. 그리고 이러한 노력의 일환으로 국내에서 제정된 2010년 ‘저탄소 녹색성장 기본법’ 시행에 따라 부문별 관장 기관, 부문별 통계를 취합·검토·공표하는 총괄 기관인 온실가스 종합정보센터를 구성하여 매년 온실가스 인벤토리를 공표하고, 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (National Inventory Report, NIR)를 발간하고 있다. 국가 온

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

ORCID 최솔이 0000-0002-9465-8174 함보영 0000-0002-3303-0201
송철호 0000-0002-8491-9545 박은빈 0000-0002-0442-7621
김지원 0000-0003-1856-4114 이우균 0000-0002-2188-359X

실가스 인벤토리 보고서는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 기준에 따라 5개 부문 (에너지, 산업공정, 농업, 토지이용·토지이용 변화 및 임업, 폐기물)의 온실가스별 (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) 인벤토리를 산정하고 있으며, 기후변화 대응 관련 정책 수립 및 이행을 위한 기반 자료로 활용하고 있다 (GIR, 2019).

특히 토지이용·토지이용 변화 및 임업 (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF) 부문은 국가 육상 생태계 상의 토지의 이용 및 관리 활동이 수반되는 모든 관리된 토지에서의 배출·흡수원에 의한 온실가스 배출·흡수의 산정 보고를 포함한다 (IPCC, 2006). IPCC 가이드라인에 따라 LULUCF 부문 내에서의 바이오매스 등의 탄소 축적, 토양에서의 이산화질소 배출 등 전반적인 온실가스 배출 및 흡수에 대한 시계열 평가를 수행해야 하며, 과거의 토지이용 변화 정보를 구체적으로 구축해야 하는 부문이다. 또한 대표적인 온실가스 흡수원인 산림을 포함하고 있으므로 온실가스 감축 측면에서 정확한 평가가 이루어져야 하는 부문이기도 하다. 대부분의 부속서 I 국가에서는 LULUCF 부문의 온실가스 산정을 위하여 활동 자료 및 배출·흡수 계수를 개발하고 있으며 이에 따라 온실가스 인벤토리를 산정하고 있다. 국내에서는 LULUCF 부문 중 농경지, 산림지, 초지, 습지 부문은 농림축산식품부의 관장 아래 산정되어 매년 국가 온실가스 인벤토리 보고서 상에서 보고되고 있으며, 배출·흡수 계수 등이 개발되고 있다 (GIR, 2019). 하지만 정주지 (Settlements)는 온실가스 인벤토리 내 LULUCF 부문의 하나로 보고되어야 함에도 불구하고 활동 자료의 부재 및 토지이용 상의 국내 대상 범위 설정의 문제와 함께 산정 기관이 국토교통부 산하의 국토연구원에서 한국토지주택연구원으로 변경되는 등 부처간 역할 문제로 NIR 상에서 보고되지 않아왔다. 또한 정주지 내 온실가스 인벤토리 산정을 위해서는 공간 범위 내 녹지와 관련된 가로수, 공원, 녹지 등 이산화탄소 흡수원에 대한 정보의 축적이 필요한 상황이다 (Kim and Kim, 2010). 그러나 국내에서는 산림청 (도시림 현황 통계)만이 도시 내 가로수 및 공원 등에 대한 통계를 산정하여 정주지 흡수원 산정에 일부 기여할 수 있으나, 구체적인 위치 자료가 부재하여 토지이용 변화 등에 대한 공간적인 통계로는 이어지지 못하고 있다. 정주지 내에는 다양한 토지이용 형태가 존재하고, 파편화 된 온실가스 흡수원이 존재하기 때문에 통계 외에 공간적인 접근이 필요하다. 따라서 IPCC가 제시하는 접근방법 (Approach) 중 전체 면적 변화를 파악하는 Wall-to-wall과 표본조사를 통한 Sampling 방식을 활용한 정주지 내 토지이용 면적 산정이 필요하다 (Hwang *et al.*, 2018; GIR, 2017).

부속서 I 국가는 NIR 내에 정주지 부문을 다양하게 정의하고 있다. 각 국가별로 정의되는 범주는 상이하지만, 주로 현장 조사 자료, QuickBird, Airborn LiDAR 등 원격탐사 자료를 활용한 활동 자료를 구축해오고 있다 (Nowak and Crane, 2002; Nowak *et al.*, 2013; McPherson *et al.*, 2013; Schreyer *et al.*, 2014). 그리고 각 국가별 접근 방식과 가용 자료에 따라서 온실가스 인벤토리 산정 수준은 Tier 1부터 Tier 3까지 다양하다 (MOLIT, 2019). 각 국가별 차이점에도 불구하고 대부분의 국가에서 2006 IPCC GL (IPCC GuideLines)의 산정 방법을 다루고 있다. 이에 따르면 Tier 1 방법은 정주지로 유지된 정주지의 경우에 탄소 축적 변화가 없다고 가정하여 0으로 산정한다. 또한 타 토지에서 전환된 정주지의 경우에는 전환 후의 탄소 축적량 모두 손실된다고 가정하고 있다. Tier 2 수준의 산정에서 바이오매스의 경우에는 수관면적법 (Tier 2a)와 단일 개체 성장법 (Tier 2b)를 이용하여 산출하는 방법을 제시하고 있으며, 고사 유기물의 경우에는 획득 손실법과 축적 차이법, 토양은 국가 고유의 인자 등을 활용하는 것으로 제시하고 있다. Tier 3 방법은 국가의 관련 인자 및 기후 환경 등을 고려한 모형 등을 활용하는 것으로 제시하고 있다.

국내 정주지 수목 바이오매스의 경우 Tier 2 수준의 온실가스 인벤토리 산정 방법으로 주로 지자체 단위에서 개체 단위 또는 면적에 수종 별 이산화탄소 흡수 계수를 적용하여 탄소 흡수량을 추정하는 연구가 주를 이루고 있다 (Park, 2009; Ahn *et al.*, 2011; Jo *et al.*, 2003; Jo, 2002; Jo and Ahn, 2001; Jo, 1999). 하지만 국가 단위의 정주지 온실가스 배출량과 흡수량 산정을 위한 전국 통계가 미흡한 실정이며, 배출·흡수 계수의 미개발 등으로 온실가스 흡수량 및 배출량을 산정하지 못하고 있는 실정이다 (Wang, 2008). 또한 LULUCF 내의 토지이용 구분이 명확하지 않고, 분석에 활용하는 공간 자료 및 원격탐사자료에 따른 다양한 접근법이 혼재하는 한계가 있다 (Jeon *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2018; Hwang *et al.*, 2018).

따라서 본 연구에서는 시범지역을 대상으로 국가 공간 자료와 원격탐사자료를 활용하여 토지이용 변화의 면적 확인이 가능한 활동 자료를 구축하고, 2006 IPCC GL의 산정 방법을 활용하여 정주지 온실가스 흡수량 산출을 위한 방법론을 제시하고자 한다. 이를 기반으로 하여 향후 국내 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정 및 보고에 기여하고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

본 연구에서는 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위해 2006 IPCC GL에서 제시하는 배출·흡수 계수와 산정식을 검토하고, 활동 자료 구축을 위해 인천 서구를 중심으로 국가 통계자료, 원격탐사자료, 국가 공간 자료를 활용하였다. 또한 시범 산정 시에 정주지로 유지된 정주지와 산림지에서 전환된 정주지, 농경지에서 전환된 정주지로 구분하여 토지 이용 변화 관계를 파악하고, 파악된 관계 내에서 교목의 수관 면적을 추출하여 이용하는 수관면적법 (CRoWn cover method, CRW)으로 정주지 부문의 온실가스 인벤토리 산정 방안을 모색하고자 하였다 (Fig. 1).

2.1 연구 대상지

본 연구에서 정주지는 2006 IPCC GL에 따라 다른 토지이용 분류에 포함되지 않은 교통시설과 인간 거주지 등을 포함하는 개발된 토지로 정의하고, 개발된 지역 내의 토양, 잔디

나 정원수와 같은 초본류 및 다년생 식물, 전원 지역에서 볼 수 있는 교목, 주택정원, 도시지역을 모두 포함하여 정주지로 정의하였다 (IPCC, 2003; IPCC, 2006). 이러한 기준에 따라 본 연구에서는 정주지를 국가 지적 통계상의 광천지, 염전, 대, 공장용지, 학교용지, 주차장, 주유소 용지, 창고용지, 도로, 철도용지, 제방, 수도용지, 공원, 체육용지, 유원지, 종교용지, 사적지, 묘지로 정의하였으며 (KFRI, 2012), 이를 기반으로 2010년과 2017년 기준의 연속 지적도 내에 정주지 범주를 적용하여 공간적 범위를 설정하였다. 시범 지역의 선정은 지적통계연보 상에서 최근 10년간 (2008년-2017년) 시군구 단위의 정주지 면적 변화가 크며, 국토 면적대비 정주지 비율이 42.9%로 비교적 높은 인천 서구를 시범대상지역으로 선정하였다 (Fig. 2).

2.2 산정식 선정

본 연구에서는 국외 사례 및 국내 실정을 검토하여 적용 가능한 산정식을 선정하였다. 부속서 I 국가에서 정주지는

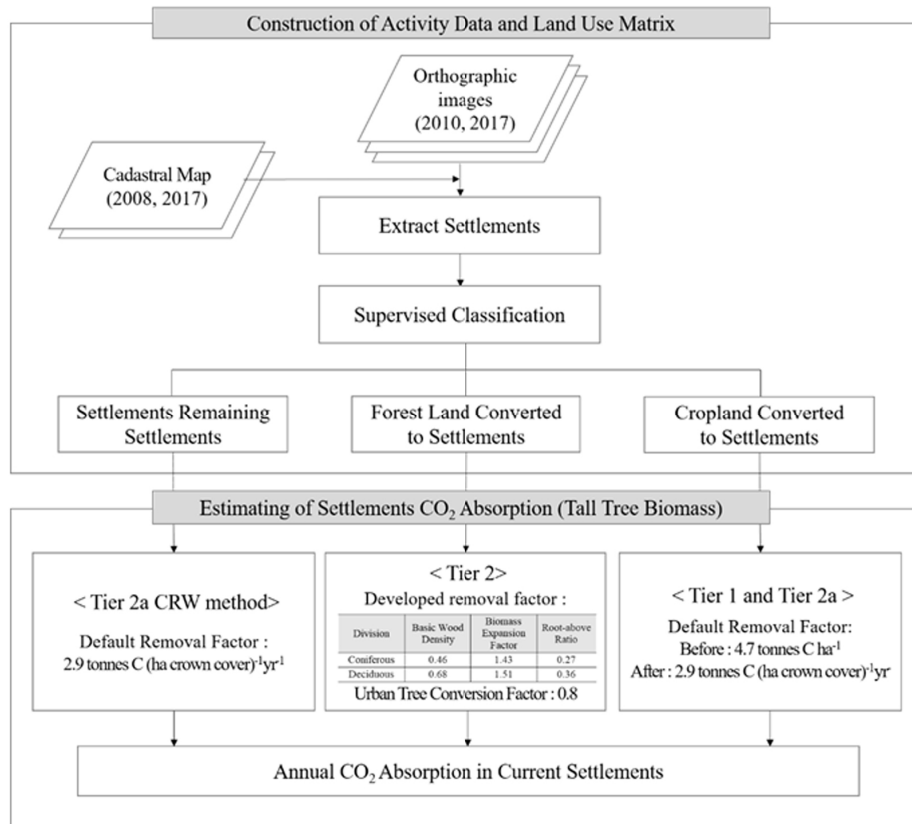


Fig. 1. Research Flow for Construction of Activity Data and Estimation of Carbon Dioxide Absorption in Settlement.



Fig. 2. Study Area and Settlements in Cadastral Map.

Table 1. Tier Level of Greenhouse Gas Inventory in Settlement of Annex Countries (MOLIT, 2019)

Nation	Settlements Remaining Settlements			Land Converted to Settlements		
	Biomass	Dead Organic Matter	Soil	Biomass	Dead Organic Matter	Soil
Australia	Tier 2	Tier 1	-	Tier 3	Tier 3	Tier 3
New Zealand	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 2
Canada	Tier 2a	Tier 1	-	Tier 1	-	-
United States	Tier 2a	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 2	Tier 2
Japan	Tier 2a&2b	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2
Austria	Tier 1	Tier 1	-	Tier 2	-	Tier 2
Switzerland	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 2	Tier 2	Tier 2
United Kingdom	-	-	-	Tier 3	-	Tier 3
Germany	-	-	-	Tier 2	-	Tier 2
Belgium	-	Tier 1	-	-	-	Tier 2
Italy	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 2
Portugal	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	-
Finland	-	-	-	Tier 3	Tier 2	Tier 2
Netherlands	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1
Norway	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 3	Tier 2	Tier 2
Poland	Tier 2a	-	-	Tier 1	Tier 1	Tier 1
Bulgaria	Tier 2	Tier 1	-	Tier 2	-	Tier 2
Czech Republic	Tier 1	Tier 1	-	Tier 1	Tier 1	-
Greece	-	Tier 1	-	Tier 1	Tier 2	Tier 1

다양한 수준으로 산정되고 있다. 유지된 정주지는 Tier 1-2 수준으로 산정되고 있으며, 전환된 정주지에서는 타 부분의 고도화로 인하여 호주, 미국, 영국, 핀란드, 노르웨이에서 Tier

3 수준으로 산정되는 경우도 있었다. 또한 산정 항목에 있어서는 주로 바이오메스 산정이 고도화되어 있었다 (Table 1). 우리나라의 경우에는 현재 LULUCF 산림 부문 온실가스

인벤토리가 Tier 2 수준에서 산정되는 것으로 알려져 있다 (Park et al., 2018). 따라서 현재 정주지 내 바이오매스 등에 관한 연구가 부족한 실정 및 타 부문의 산정 현황을 고려하면 최대 Tier 2 수준의 산정을 목표로 하는 것이 타당하다고 할 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 IPCC GL에서 제시하는 정주지 내 최소 산정 항목이 교목의 탄소 축적 및 흡수량 변화 임을 고려하여 바이오매스 이산화탄소 흡수량을 Tier 2 수준으로 산정하였다. 고사 유기물 및 토양은 활동 자료 및 국내 배출·흡수 계수의 부재로 산정하지 않았다. 또한 개체목의 정보 및 성장 특성 규명 등에 대한 자료가 부족한 점을 고려하고 현재 구득 가능한 정사 영상을 활용하여 활동 자료를 구축하기 위하여 수관면적법 (Tier 2a)을 산정식으로 선정하였다 (Equation.1).

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} AT_{i,j} \cdot CRW_{i,j} \quad (\text{Equation.1})$$

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

AT_{ij} = Total crown cover area of class *i* in woody perennial type *j*, ha

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

전환된 정주지는 산림지에서 전환된 정주지, 농경지에서 전환된 정주지로 나누어 산출하였으며, 전환 전의 탄소 축적량과 전환 후의 탄소 축적량의 차이에 변환된 면적을 곱하는 방법으로 타 토지에서 전환된 정주지의 바이오매스의 탄소 축적 변화량을 산정하였다 (Equation.2).

$$\Delta C_{CONVERSION} = \sum_i (B_{AFTERi} - B_{BEFOREi}) \times \Delta A_{TO OTHERS} \times CF \quad (\text{Equation.2})$$

$\Delta C_{CONVERSION}$ = Initial change in biomass carbon stocks on land converted to another land category, tonnes C yr⁻¹

B_{AFTERi} = Biomass stocks on land type *i* immediately after the conversion, tonnes d.m. ha⁻¹

$B_{BEFOREi}$ = Biomass stocks on land type *i* before the conversion, tonnes d.m. ha⁻¹

$A_{TO_OTHERSi}$ = Area of land use *i* converted to another land-use category in a certain year, ha yr⁻¹

CF = Carbon fraction of dry matter, tonne C (tonnes d.m.)⁻¹

i = Type of land use converted to another land-use category

CF = Carbon fraction of dry matter, tonne C (tonnes d.m.)⁻¹

i = Type of land use converted to another land-use category

2.3 활동 자료

2006 IPCC GL에서 Tier 2a 방법을 적용할 경우 바이오매스에 관한 배출·흡수 계수는 기본 값이 주어지나 수관 면적에 대한 활동 자료가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 시범 연구 대상으로 선정된 인천 서구의 활동 자료 구축을 위하여 국토지리정보원에서 제공하는 고해상도 (51 cm×51 cm) 정사 영상의 확보가 가능한 2010년 및 2017년 두 개 시점에 대하여 구득하였으며, 국가 공간 자료인 연속지적도를 중첩하여 정주지 활동 자료 구축의 공간적 범위를 결정하였다. 구축 방법으로는 감독 분류 (최대우도법, Maximum likelihood supervised classification)를 통하여 침엽수와 활엽수의 수관 면적을 추출하였다. 또한 토지 전용 관계에 따른 온실가스 흡수량 변화를 산출하기 위하여 2010년과 2017년 연속지적도 상 지목의 공간적인 변화를 확인하여 유지된 정주지와 타 토지에서 전환된 정주지로 구분하여 구축하였다. 전환된 정주지는 산림지에서 전환된 정주지와 농경지에서 전환된 정주지로 구분하였으며, 산림지는 연속지적도 상의 임야 지목을 활용하였다. 농경지는 논, 밭, 과수원 지목을 활용하였다 (Park et al., 2016). 또한 두 시기의 토지이용 변화에 따른 면적을 활용하여 연간 변화 면적을 추정하였다.

2.4 배출·흡수 계수 선정

정주지의 탄소 축적 및 흡수량 변화 산정은 2006 IPCC GL에서 제시하는 유지된 정주지의 바이오매스에 관한 배출·흡수 계수의 기본값을 활용하여 산출할 수 있으며, 전환된 토지의 경우에는 타 부문에서 활용하는 배출·흡수 계수를 함께 활용하여 전환 관계에 따른 이산화탄소 흡수량 변화를 산정할 수 있다. 본 연구에서 유지된 정주지의 경우 수관면적법 (Tier 2a)의 배출·흡수 계수인 2.9 tC ha⁻¹yr⁻¹을 활용하였다. 유지된 정주지에서 토양, 고사 유기물의 산정은 Tier 1에

서는 탄소 축적 변화가 없다고 가정하여 0으로 산정되며, Tier 2에서는 IPCC가 제시하는 배출·흡수 계수 기본값이 주어지지 않으므로 국가 배출·흡수 계수가 필요하기 때문에 본 연구의 산정 대상에서는 제외하였다. 산림지에서 전환된 정주지의 경우에는 국립산림과학원에서 개발한 침엽수, 활엽수의 배출·흡수 계수와 산림청에서 매년 발간하는 산림기본통계연보 상 인천 서구의 침엽수 및 활엽수의 ha당 축적량(침엽수: 129.19 m³ ha⁻¹ (2010), 160.75 m³ ha⁻¹ (2017), 활엽수: 110.29 m³ ha⁻¹ (2010), 134.97 m³ ha⁻¹ (2017))을 활용하여 전환 전의 탄소 축적량을 산출하였다 (KFS, 2010; KFS, 2017). 2006 IPCC GL에서는 전환 후의 경우에는 정주지 수목 및 관목에 관한 상대 성장식 자료가 부족할 경우 산림 수목에 대해 개발된 결과 값에 도심 수목 전환 계수 0.8을 곱하여 산림 수목보다 생장이 저해된 정주지 수목의 특성을 보정할 수 있다고 제시하고 있다 (IPCC, 2006). 따라서 산림지에서 전환된 정주지의 온실가스 흡수량 산출에는 산림 부문의 계수에 추가적으로 도심 수목 전환 계수를 곱하여 탄소 축적량을 산출하였다. 농경지에서 전환된 정주지의 경우에는 농경지에 대한 배출·흡수 계수가 개발되어 있지 않아 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 Tier 1의 난온대습윤 (Warm temperate, moist) 지역의 농경지 바이오매스 배출·흡수 계수 기본값인 4.7 tC ha⁻¹를 이용하여 전환 전의 탄소 축적량을 산출하였으며, 전환 후 탄소 축적량은 정주지로 유지된 정주지의 Tier 2a의 배출·흡수 계수인 2.9 tC ha⁻¹yr⁻¹를 활용하여 계산하였다. 농경지에서 전환된 정주지의 고사 유기물과 토양의 온실가스 인벤토리 산정에서 Tier 1은 정주지로 전환 후 모두 손실된다고 가정하여 0으로 설정하고 있으며, Tier 2에서 고사 유기물의 경우에는 획득 손실법 및 축적 차이법으로 토양은 국가 배출·흡수 계수를 활용하여야 하므로 산정에서 제외하였다.

3. 결 과

3.1 활동 자료 변화

정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위한 활동 자료 구축을 위해 감독 분류로 교목의 수관 면적을 수출한 결과는 Table 2와 같으며, 분류의 전체 정확도는 87.2, Kappa 계수는 0.85로 확인되었다. 유지된 정주지에서는 교목의 총 수관 면적이 493.70 ha, 2017년에는 656.80 ha로 나타나 수관의 면적 비율이 10.80%에서 14.40%로 증가하는 것으로 나타났으며, 연간 수관 면적 변화량은 23.31 ha·yr⁻¹인 것으로 나타났다. 산림지에서 전환된 정주지의 경우에는 교목의 총 수관 면적이 2010년 93.45 ha에서 2017년 34.40 ha로 59.05 ha가 감소하는 것으로 나타났으며, 연간 수관 면적 변화량은 -8.00 ha·yr⁻¹인 것으로 나타났다. 농경지에서 전환된 정주지의 경우에는 교목 수관 면적이 190.34 ha에서 139.10 ha로 51.24 ha가 감소한 것으로 분석되었으며, 연간 수관 면적 변화량은 -7.32 ha·yr⁻¹인 것으로 나타났다 (Table 2).

3.2 이산화탄소 흡수량 변화

수관면적법에 따라 인천 서구의 정주지 내 바이오매스 이산화탄소 흡수량을 산정한 결과, 유지된 정주지의 2010년 이산화탄소 흡수량은 5,249.79 tCO₂이며, 2017년에는 6,985.25 tCO₂로 연간 이산화탄소 흡수량은 247.92 tCO₂ yr⁻¹인 것으로 나타났다. 산림지에서 전환된 정주지의 전환 전 이산화탄소 흡수량은 5,469.37 tCO₂로 나타났으며, 전환 후 2017년에는 2,270.84 tCO₂로 나타났다. 이에 따라 산림지에서 전환된 정주지의 연간 이산화탄소 흡수량은 -456.93 tCO₂ yr⁻¹인 것으로 나타났다. 또한 농경지에서 전환된 정주지의 전환 전 이산화탄소 흡수량은 3,280.19 tCO₂로 나타났으며, 전환 후 2017년에는 1,479.1 tCO₂인 것으로 나타났다. 이에 따라 농경지에서 전환된 정주지의

Table 2. The Activity Data Change Result of Settlements in Incheon Seo-gu

Site	Land Categories	Forest Type	Area (ha)		Changed Area (ha)	Annual Changed Area (ha·yr ⁻¹)
			2010	2017		
Incheon Seo-gu	Settlements Remaining Settlements (4,552.3 ha)	Coniferous	287.56	303.53	15.97	2.28
		Deciduous	206.15	353.39	147.24	21.03
	Forest Converted to Settlements (234.7 ha)	Coniferous	52.92	18.61	-34.31	-4.90
		Deciduous	40.53	18.82	-21.71	-3.10
	Cropland Converted to Settlements (1,162.6 ha)	Coniferous	72.36	54.46	-17.9	-2.56
		Deciduous	117.98	84.64	-33.34	-4.76

연간 이산화탄소 흡수량은 -257.30 tCO₂ yr⁻¹인 것으로 나타났다 (Table 3). 이러한 결과를 종합하여 인천 서구의 2010년과 2017년 사이의 토지 전용 관계를 고려한 정주지의 연간 이산화탄소 흡수량은 -466.31 tCO₂ yr⁻¹인 것으로 나타났다.

본 연구의 결과와 국내 선행연구의 결과를 종합하여 이산화탄소 흡수량 추정 오차를 파악하기 위하여 Jo *et al.* (2003), Jo (2002), Jo and Ahn (2001), Jo (1999)의 국내 현장조사를 통하여 구축한 도심지 수목의 단위 면적당 연간 탄소 흡수량을 이용하여 비교하였다 (Table 4). 비교는 선행연구에서의 대상지는 지역별로 상이하고 면적도 다르기 때문에 배출·흡수 계수만을 활용하여 본 연구에서 구축한 활동자료 면적에 대입하였다. 이를 통해 배출·흡수 계수에 따른 값의 차이로 발생하는 오차범위를 파악하였다. 또한 산림지에서 전환된 정주지의 경우에는 산림지 부문에서 개발된 국가 고유 계수와 도심 수목 전환 계수를 활용하여 산정하였기 때문에 선행 연구와의 비교에서 제외하였다. 국내 지자체 단위로 조사된 선행 연구에서 정주지 수목의 연간 단위 면적당 탄소 흡수량의 범위는 지역에 따라 1.9~2.9 tC ha⁻¹ yr⁻¹로 2006 IPCC GL

기본 값과 비교하여 적거나 같은 것으로 나타났다. 이에 따라 시범 연구 대상지의 유지된 정주지에서의 이산화탄소 흡수량은 IPCC GL의 기본 값 적용 결과와 비교하여 25.64~85.49 tCO₂ yr⁻¹가 적은 흡수량을 나타내었으며, 농경지에서 전환된 정주지에서는 이산화탄소 흡수량이 21.86~72.86 tCO₂ yr⁻¹ 차이가 나는 것으로 나타났다. 이와 같이 배출·흡수 계수의 적용에 따라 2.20~34.48%의 오차가 발생하는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서는 국내 온실가스 인벤토리 내 LULUCF 부문에서 현재 산정이 되지 않고 있는 정주지부문에 대하여 인천 서구 지역을 대상으로 2010년과 2017년 두 시기 사이의 온실가스 인벤토리를 시범적으로 산정하였다. 정주지로 유지된 정주지에서는 교목 수관면적 증가에 따라 이산화탄소 흡수량이 증가하는 것으로 나타났지만, 산림지에서 전환된 정주지의 경우에는 이산화탄소 흡수량이 감소하여 배출되는 것으로 나타났다. 이는 실제로 인천 서구에서 유지된 정주지는 2011

Table 3. The Estimation Result of GHG Inventory according to Land Use and Land Change of Settlements in Incheon Seo-gu

Division	Biomass	2010 (tCO ₂)	2017 (tCO ₂)	Annual CO ₂ Absorption (tCO ₂ yr ⁻¹)
Settlements Remaining Settlements	Coniferous	3,057.72	3,227.54	24.26
	Deciduous	2,192.07	3,757.71	223.66
Forest Converted to Settlements	Coniferous	2,061.85	721.76	-191.44
	Deciduous	3,407.52	1,549.08	-256.49
Cropland Converted to Settlements	Coniferous	1,247.00	579.09	-95.42
	Deciduous	2,033.19	900.01	-161.88

Table 4. Comparison of Annual Carbon Removal Factors of Urban Tree in Korea and IPCC Guidelines and Estimation Result of CO₂ Absorption

	IPCC GL Default	Jo <i>et al.</i> , (2003)	Jo (2002)	Jo and Ahn (2001)	Jo (2002)	Jo (1999)
Site	All urban area in USA	Jung-gu, Seoul	Gangnam-gu, Seoul Jungnang-gu, Seoul	Yongin-si, Gyeonggi-do	Chuncheon-si, Gangwon-do	Gangneung-si, Gangwon-do
Annual Carbon Removal Factor (tC ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.9	2.2	1.9 2.9	2.0	2.1	2.6
Settlements Remaining Settlements (tCO ₂ yr ⁻¹)	247.92	188.08	162.43	170.98	179.53	222.28
Cropland Converted to Settlements (tCO ₂ yr ⁻¹)	-257.30	-308.30	-330.16	-322.88	-315.59	-297.16

년 256.97 ha에서 2017년 324.70 ha로 수목 면적이 증가한 결과와 유사하였다 (Kim *et al.*, 2011). 이를 활용하여 이산화탄소 흡수량을 추정된 결과, 2011년에는 2,732.44 tCO₂를 흡수했으며, 2017년에는 3,445.93 tCO₂으로 연간 이산화탄소 흡수량은 101.93 tCO₂ yr⁻¹가 증가하는 것으로 분석되어 본 연구의 결과가 지역단위 현장조사 결과에 비하여 약 2.43배 과추정되는 것으로 나타났다. 이는 활동 자료 구축 시 분류 결과의 정확도와 현장조사의 수목 면적이 본 연구에서 정의한 18개 지목 내 일부 면적만이 포함되어 있어 선행연구와의 공간적 범위가 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 정주지 부문의 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해서는 첫째, 국내에서는 IPCC GL이 제시하는 정주지 정의에 부합하도록 LULUCF 내 부문 간의 협의된 공간적 범위를 정의하는 것이 우선적으로 필요하며, 이에 따라 토지이용 변화 매트릭스를 작성하여야 한다. 현재 우리나라의 경우 LULUCF 부문에 대한 면적과 이용 형태 구분이 어려워 정확한 인벤토리 산정이 어려운 상황이다 (Kim *et al.*, 2014; GIR, 2017; Yu *et al.*, 2015). 타 토지에 전환된 정주지의 경우 본 연구 결과와 산림청의 임업통계연보 및 인천광역시의 통계 연보를 비교한 결과, 2010년 인천 서구의 산림 면적은 3,213 ha 였으나 2017년에는 3,151 ha로 산림 면적이 감소한 것으로 나타났으며, 농경지 면적의 경우에도 2010년 20,406 ha에서 2017년 19,004 ha로 감소한 것으로 나타났다. 반면에 지적 통계상에서 18개 지목을 포함하는 정주지 면적은 3,369 ha에서 5,010 ha로 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 국가 통계자료를 활용하여 산림지 및 농경지에서 토지이용 변화로 인하여 이산화탄소 흡수량이 감소할 것이라는 경향성을 예측할 수 있지만, 부문 별 국가 통계 면적 자료는 타 토지에서 전환되는 면적을 공간적으로 산정하지 못하고 있다. 이에 따라 전용 관계에 대한 자료 부재로 온실가스 인벤토리 산정에는 한계가 있다 (Yu *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2018). 현재 산림청 및 농촌진흥청에서는 임상도와 스마트팜 맵 등 전국 단위의 공간 자료를 구축하고 있지만, 공간 해상도의 불일치 및 단일 시기 구축 등으로 토지 전용 관계를 파악하기는 어렵다 (GIR, 2015). 또한 현재 정주지와 기타 토지의 경우에는 전체 면적이 산정되지 않기 때문에 인벤토리 산정의 일관성과 신뢰성에 문제를 드러내고 있다 (Yu *et al.*, 2015; GIR, 2017). 따라서 현재 각 부문에서 자체적으로 파악하고 있는 면적 통계를 타 부문 간의 토지이용 변화 흐름을 파악할 수 있도록 하는 국가 통계자료 및 공간 자료를 구축하여 활동 자료로서 각 부문별 경계를 파악할 수 있는 공간 자료의 통합이 필요하다 (Park *et al.*, 2018).

둘째, 본 연구에서 제시한 활동 자료의 전체 분류 정확도

는 85%로 확인되었다. 이러한 영상 분류의 정확도는 숙련도 등에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 이는 수관면적 분석 결과 및 연간 이산화탄소 흡수량의 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 각 부문별 자료를 세부적으로 분석하기 위해서는 고해상도 영상과 기타 토지정보체계를 연계하여 자료를 구축하는 다양한 방법론에 대한 연구가 필요하며 (Yu *et al.*, 2015), 정주지 내 녹지 등에 대한 현장 자료의 시계열적 구축을 통해 정확도 검증 등으로 정확성을 향상시킬 수 있을 것이다. 원격탐사 자료를 이용하여 활동 자료를 구축하는 방법은 실제로 많은 부속서 국가 및 LULUCF 내 타 부문 연구에서 널리 활용되어 왔으며 (IPCC, 2003), 원격탐사 자료 내 구획된 토지 이용 정보를 활용하여 LULUCF를 공간적으로 정확하게 구분하는 Approach의 개념 또한 향상시킬 수 있을 것이라고 판단된다. 따라서 본 연구의 정사 영상 등의 원격탐사 자료 및 공간 자료를 활용하는 방법과 현장조사 결과를 토대로 토지 이용 형태 간 면적 흐름의 설명이 가능한 Approach 2 이상의 토지피복 이용 정확성을 가진 활동 자료를 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구를 기반으로 Sampling 및 Wall-to-Wall 방법으로 일컬어지는 Approach 3 산정으로 나아갈 수 있으므로, 향후 정확성 향상과 공간적 가용한 자료의 세분화가 이루어져야 할 것이다 (Park *et al.*, 2018).

셋째, 국내 지자체 단위에서 가로수 등을 대상으로 개발된 배출·흡수 계수를 활용한 이산화탄소 흡수량과 본 연구의 2006 IPCC GL 배출·흡수 계수를 적용한 이산화탄소 흡수량의 차이는 IPCC GL의 배출·흡수 계수가 미국 전역의 수목을 대상으로 개발된 개수로, 국내 정주지 내 수목의 수종과 생육 환경과 차이가 있기 때문이다. 따라서 국내 정주지 부문의 정확한 온실가스 인벤토리 산정을 위하여 국내 실정에 맞는 배출·흡수 계수를 확보하는 것이 필요하다 (IPCC, 2003; Jeong *et al.*, 2011). 또한 현재 개발된 도시 숲 및 가로수 바이오매스 탄소 흡수량은 IPCC에서 제시하는 정주지 공간적 범위의 일부만 해당되며, 소수의 지자체를 대상으로 개발되었기 때문에 전국 단위로 적용하기에는 한계점이 존재한다. 따라서 국가 단위에서 표본점 추출 등으로 적용 가능한 배출·흡수 계수를 개발하여 인벤토리 산정이 선행되어야 할 것이고, 이후에 광역 지자체 별로 산정 보고할 수 있도록 체계를 구축해나가야 할 것이다 (Kim *et al.*, 2014). 현재 인벤토리 구축에 있어서 공간적으로 가장 중요한 기초 단위인 지자체 별 정주지 부문 인벤토리 구축은 미비한 실정이며 (Wang, 2008), 일부에 해당하는 도시 수목 및 가로수 등 특정 녹지 유형에 한정되어 있었다 (Kim *et al.*, 2018). 하지만 기후변화 완화 및 적응 대응책의 주체는 지방자치단체가 되기

때문에 (Koh, 2007), 한국환경공단은 지자체 온실가스 배출량 산정 지침 발간 등 광역 및 기초 지자체 온실가스 인벤토리 산정에 대한 기술 지원을 통해 전국 및 기초지자체의 온실가스 인벤토리를 산정할 계획을 추진하고 있다 (Kim *et al.*, 2014). 따라서 국내 정주지 부문의 체계적인 온실가스 인벤토리 산정 체계를 구축하기 위하여 국가 단위의 배출·흡수 계수 개발 및 활동 자료 구축을 위한 체계적인 방법론 설정과 향후 온실가스 통계 고도화를 위하여 기초지자체로의 산정 기술 이양이 필요하며, 이를 기반으로 지자체 별 탄소 저장고 (바이오매스, 고사 유기물, 토양)에 따른 활동 자료 구축 및 배출·흡수 계수 개발이 필요하다.

이러한 방법론적 한계점에도 본 연구는 국내 정주지의 공간적 범위를 검토하고 제시하였으며, 국가 공간 자료와 원격탐사자료를 활용하여 2006 IPCC GL의 인벤토리 보고 원칙에 따른 토지이용 변화 파악과 활동 자료를 구축하였다. 또한 2006 IPCC GL에서 제시하고 있는 산정식을 활용하여 국내 정주지 부문의 인벤토리를 시범대상 지역을 대상으로 선정하여 제시하였으며, 이를 기반으로 정주지 부문의 전국단위 온실가스 인벤토리 산정을 위한 방법론을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

5. 결론

본 연구는 현재 산정·보고되고 있지 않은 정주지 부문 온실가스 인벤토리 산정 방법론을 구축하고자 국내에서 현재 구득 가능한 자료를 활용하여 수행한 시범적 연구이다. 향후 NIR 보고를 위해 정주지 부문의 온실가스 인벤토리를 전국적으로 평가하기 위한 기반 연구로 IPCC GL에서 제시하는 수관면적법과 전용 관계를 파악하여 인천 서구 2010년과 2017년 사이 정주지의 연간 이산화탄소 흡수량을 파악하였다. 시범 산출 결과를 통해 LULUCF 내 타 부문 연구와 마찬가지로 정주지 내의 온실가스 인벤토리 산정이 가능함을 파악하였다. 다만, 국가에서 정의하는 정주지의 공간적 정의와 영상 분류 통계의 정확도, 적용하는 배출·흡수 계수에 따라 NIR로 보고 될 수 있는 온실가스 흡수 잠재량은 달라질 수 있는 시사점을 도출하였다. 따라서 IPCC의 국내 정주지를 포함한 LULUCF 통계를 인정받기 위해서 국내 LULUCF 내 타 부문과 협의하여 정주지의 공간적 정의를 명확하게 설정해야 하며, 이를 기반으로 활용할 수 있는 영상 등의 자료로 활동 자료를 구축하여 과거 20년간 전용 정보를 체계적으로 구축할 필요가 있음을 확인하였다. 또한 국내 정주지 수목 바이오매스 등에 대한 연구가 부족함을 감안하여 2006 IPCC GL에서 제시하는 산정식 및 배출·흡수 계수를 전국에 적용하는

것을 우선 검토하고, 향후 온실가스 통계 고도화를 위한 탄소 저장고 별 (바이오매스, 고사 유기물, 토양) 활동 자료 및 배출·흡수 계수의 개발의 단계적 접근이 필요함을 확인하였으며, 이를 위하여 기초 지자체 단위로의 산정 기술 이양 및 활동 자료 구축이 수반되어야 함을 확인하였다.

사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호: 20UMRG-B158194-01)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- An KH, Kim HK, Choi YS. 2011. A Study on the City Park Plan of Carbon-neutral or CO Absorber. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 27 (9): 47-54.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). 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.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). 2019. 2019 National Greenhouse Gas Inventory Report 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. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry Chapter 3.6 Settlements. Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies.
- Jeon SW, Kim J, Jung H. 2013. A Study on the Forest Classification for Ecosystem Services Valuation. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 16 (3): 31-39.
- Jeong HC, Kim GY, Lee DB, Shim KM, Kang KK. 2011. Assessment of Greenhouse Gases Emission of Agronomic Sector Between 1996 and 2006 IPCC Guidelines. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 44 (6): 1214-1219.

- Jo HK. 1999. Carbon Uptake and Emissions in Urban Landscape, and the Role of Urban Greenspace for Several Cities in Kangwon Province. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 27 (1): 39-53.
- Jo HK, Ahn TW. 2001. Annual CO₂ Uptake and Atmospheric Purification by Urban Coniferous Trees-For *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*. *Korea Journal of Environment and Ecology* 15 (2): 118-124.
- Jo HK, Ahn TW. 2001. Role of Atmospheric Purification by Trees in Urban Ecosystem -in the Case of Yongin-. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 29 (3): 38-45.
- Jo HK. 2002. Impacts of Urban Greenspace on Offsetting Carbon Emissions for Middle Korea. *Journal of Environmental Management* 64 (2): 115-126.
- Jo HK, Cho YH, Ahn TW. 2003. Effects of Urban Greenspace on Improving Atmospheric Environment - Focusing on Jung-gu in Seoul -. *Journal of Environmental Research* 20: 114-121.
- Korea Forest Service (KFS). 2010. *Statistical Yearbook of Forest*. Daejeon: Korea Forest Service.
- Korea Forest Service (KFS). 2017. *Statistical Yearbook of Forest*. Daejeon: Korea Forest Service.
- Korea Forest Research Institute (KFRI). 2012. *Carbon Protector, Urban Forest*.
- Kim KN, Son YM, Lee KH, Yang SJ, Woo SY. 2011. Trial Accounting of National Greenhouse Gas Inventories for Settlements Category of Republic of Korea. *Proceeding of Forest Science* 2011: 1094-1098.
- Kim KN, Lee SJ, Kim RH, Son YM. 2014. Estimation of the Greenhouse Gas Inventory on Forest Land at Provincial Level. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 16 (4): 336-342.
- Kim SH, Park EJ, Kim IK. 2018. Estimation of Carbon Sequestration in Urban Green Spaces Using Environmental Spatial Information - A case study of Ansan City -. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 21 (3): 13-26.
- Kim HB, Kim JK. 2010. Calculating Carbon Dioxide Emissions in the City and Key Sectors for Low-Carbon City. *Journal of Korea Planning Association* 45 (1): 35-48.
- Koh JG. 2007. A Study on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Local Governments in Gyeonggi-Do. Gyeonggi Research Institute, Gyeonggi.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2018. *Research on Calculation of Settlement Greenhouse Gas Inventory Based on Land Use*.
- McPherson EG, Xiao Q, Bartens J, Wu C, Simpson J, O'Neil-Dunne J. 2013. *Urban Forest Inventory and Assessment Pilot Project: Phase Two Report*. Davis, CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. Submitted to CalFire Fire and Resource Assessment Program.
- Nowak DJ, Crane DE. 2002. Carbon Storage and Sequestration by Urban Trees in the USA. *Environmental Pollution* 116 (3): 381-389.
- Nowak DJ, Greenfield EJ, Hoehn RE, Lapoint E. 2013. Carbon Storage and Sequestration by Trees In Urban and Community Areas Of The United States. *Environmental Pollution* 178: 229-236.
- 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 EJ. 2009. *Quantification of CO Uptake by Urban Trees and Greenspace Management for C Sequestration*. Gyeonggi Research Institute 2009-09.
- 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: 826-831.
- Schreyer J, Tigges J, Lakes T, Churkina G. 2014. Using Airborne Lidar and Quickbird Data for Modelling Urban Tree Carbon Storage and Its Distribution - A Case Study of Berlin. *Remote Sensing* 6 (11): 10636-10655.
- UNFCCC. 2015. *Adoption of the Paris Agreement*. United Nations Office at Geneva, Geneva.
- Wang KI. 2008. *Planning Research for the Application of the New National Guidelines for the IPCC of the National Greenhouse Gas Response to the Climate Change Convention -Other Land Use-*. Korea Energy Economics Institute: 1-124.
- Yu SC, Ahn TW, 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.