

InVEST Carbon 모형을 활용한 수도권정비계획법 상 권역 별 토지이용변화와 탄소저장량 변화 분석

황진후* · 최유영** · 유영재* · Sun Zhemin* · 조효진*** · 전성우****†

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, **고려대학교 4단계 BK21 환경생태공학교육연구단 연구교수,

고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Analysis of Land Use Changes and Carbon Storage by Region under the Seoul Metropolitan Area Readjustment Planning Act Using the InVEST Carbon Model

Hwang, Jinhoo* · Choi, Yuyoung** · Yoo, Youngjae* · Sun, Zhemin* · Cho, Hyo Jin*** · Jeon, Seongwoo****†

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

**Research Professor, BK21 FOUR R&E Center for Environmental Science and Ecological Engineering,
Korea University, Seoul, Korea

***Master Student, Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

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

ABSTRACT

Carbon storage is a critical ecosystem service function and has recently been affected by land use change and urbanization. In this study, the change in carbon storage was estimated by analyzing changes in land use by region under the Seoul Metropolitan Area Readjustment Planning Act and utilizing the InVEST Carbon model. Based on this analysis of land use change, the Overconcentration Control Region (OCR) showed low urban growth rates and low deforestation rates; the Growth Management Region (GMR) showed high urban growth rates and high deforestation rates; and the Nature Preservation Region (NPR) showed high urban growth rates and low deforestation rates. The smallest loss in carbon storage occurred in the NPR, while significant losses were observed in OCR and GMR. According to our analysis considering carbon sink, the amounts of above and below biomass increased slightly, but the amounts of soil carbon and dead organic matter significantly decreased. This study highlighted land use and carbon management in two ways. First, the region's need for land use and carbon management policies was emphasized by analyzing changes in land use and carbon storage by region. Especially, cities in the GMR with the most significant development pressure currently have fewer means of suppressing development, including establishing protected areas. There is a need to establish regional policies that can manage these issues and minimize the reduction of carbon storage. The second is the importance of soil carbon. Soil carbon accounts for the most significant portions of carbon sink. Thus, it is confirmed that the reduction of soil carbon due to urbanization of land other than forest areas has a significant impact on the total carbon volume, which is necessary for the integrated management of soil carbon.

Key words : Land Use Change, Carbon Storage, Land Management, InVEST Model, Climate Change

1. 서론

탄소저장량은 생태계서비스의 주요한 지표이며 생산력·

기후조절과 관련된 중요한 인자이다(He et al., 2016). 전 세계 육상생태계가 포함하고 있는 탄소의 양은 2,000 Pg ~ 2.500 Pg로 추정되고 있으며, 식생에 500 ~ 600 Pg, 토양

†Corresponding author : cepps_korea@korea.ac.kr ((Room No. 415, College of Life Science, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02855, Republic of Korea. Tel. +82-2-3290-3543)

ORCID 황진후 0000-0002-5372-5377
최유영 0000-0001-5196-9223
유영재 0000-0003-0595-3911

Sun Zhenmin 0000-0002-4136-368X
조효진 0000-0003-4444-0588
전성우 0000-0001-5928-8510

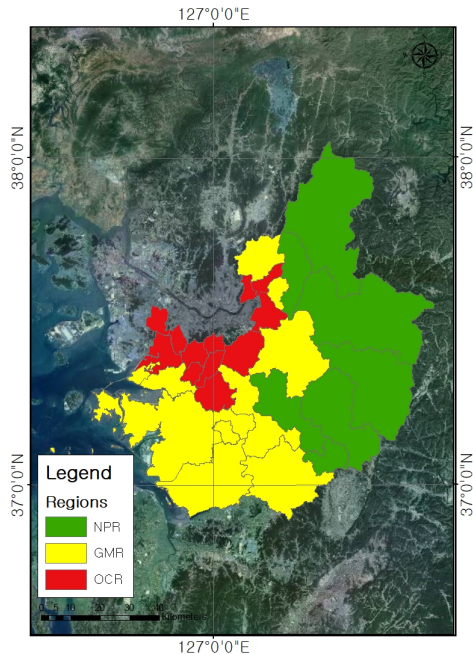


Fig. 1. Study area

에 1,500 ~ 2,300 Pg 가량의 탄소가 축적되어 있을 것으로 추정되고 있다(Liang et al. 2021, Batjes, 1996, Li et al., 2004, Pan et al., 2011, Groshans et al., 2018). 육상생태계는 이산화탄소의 주요 흡수원으로서 대기과 토양 사이의 탄소 순환에 중요한 역할을 하고 있고 지구 온난화에 잠재적으로 영향을 미치기 때문에 이를 모니터링하고 체계적으로 관리하고자 하는 많은 연구가 시도되어 왔다(Goetz et al., 2009, Fehrmann et al., 2008, Lyu et al., 2019, Zhao et al., 2019). 이러한 탄소저장량에 영향을 미치는 주요한 인자로는 토지이용의 유형, 식생, 토양 등이 있다(Li et al., 2020). 하지만 최근의 기후변화, 산림파괴, 사막화, 도시확장 등의 요인은 토지이용을 변화시키며, 이는 탄소저장 기능에 부정적인 영향을 미치고 있다(Lyu et al., 2019). 토지 이용변화는 식생 및 토양이 저장하고 있는 이산화탄소를 대기 중으로 배출시켜 대기 중 온실가스를 증가시키는 중요한 요인으로 인식되며 생물종다양성, 수문 인자 등을 변화시켜 생태계에 심각한 영향을 주고 있다(Foley et al., 2005). 특히 도시화는 전세계 탄소저장량 변화의 1/3을 차지하는 중요한 요인으로 고려되고 있다(Lyu et al., 2019).

이산화탄소 방출량을 줄이고 관리하기 위해서는 생태계에서의 탄소순환 기작을 이해하고, 생태계 파괴로 인한 탄소 흡수량 변화를 정량화하는 것이 필요하다(Ito et al., 2008,

Ohtsuka et al., 2005). 모델과 시나리오를 활용하여 탄소순환을 추정하는 연구는 탄소흡수를 위한 정책 효과를 판단하기 위한 탁월한 수단이다(Lyu et al., 2019). 따라서, 산림, 농경지 등 탄소 흡수량이 많은 토지유형을 대상으로 탄소 흡수 및 배출에 대한 신뢰성 있는 정량적 분석은 탄소배출량 및 저장량 관리에 활용될 수 있다(Ceschia et al., 2010).

탄소 저장량 분석을 위한 모형으로는 InVEST 모형이 대표적이다. 해당 모형은 Natural Capital Project에서 개발된 것으로 생태계서비스를 정량화하고 지도화하는 모형이다(Lyu et al., 2019, He et al., 2016, Li et al., 2018, Jiang et al., 2017). 과잉개발과 환경보존의 균형을 찾는 것을 목적으로 하며, 정책이나 지역 계획 수립 시 활용되고 있다(Zhao et al., 2019). 하위 모형 중 하나인 Carbon 모형은 탄소 저장소를 직접적이고 효과적으로 분석 가능하며, 정책·계획의 영향을 직접적으로 평가할 수 있다는 장점으로 인해 탄소 저장량 분석 및 추정 관련 연구에 사용되고 있다(Li et al., 2020).

본 연구에서는 InVEST Carbon 모형을 활용하여 경기도 지역을 대상으로 관리권역 별 과거 토지이용 변화 분석을 통해 탄소흡수량의 변화를 추정하고자 한다. 해당 연구 대상지는 토지이용과 개발 측면에서 다양한 특징이 혼재되어 있는 지역이다. 이에 따라 수도권정비계획법의 분류에 따라 도시를 유형화하고 유형별 토지이용변화 및 탄소저장량 변화 특성 분석을 바탕으로 탄소 저장량 관리를 위한 탄소저장고별 · 지역별 차별화된 토지이용정책의 필요성을 제시하고자 한다.

Table 1. Categorization of areas under the Seoul Metropolitan Area Maintenance Act

Type	Overconcentration control region	Growth management region	Nature preservation region
City	Suwon, Seongnam, Gwacheon, Anyang, Gunpo, Uiwang, Bucheon, Gwangmyeong, Siheung*, Namyangju*, Guri, Hanam	Yongin*, Anseong*, Ansan, Siheung*, Hwaseong, Osan, Pyeongtaek, Namyangju*	Yongin*, Anseong*, Namyangju*, Gwangju, Icheon, Yangpyeong, Yeosu, Gyeongju

(*Indicates the case where one local government corresponds to two or more regions.)

2. 연구자료 및 방법

2.1. 연구 대상지

경기도 지역은 대한민국의 광역자치체 중 가장 많은 인구가 거주하고 있는 지역이며, 가장 많은 온실가스를 배출하는 지역이다(Ko et al., 2018). 경기도에 소속된 도시들은 개발 및 토지이용 측면에 있어 차별화된 특성이 있다. 「수도권정비계획법」에서는 지역을 과밀억제권역(Overconcentration Control Region, OCR), 성장관리권역(Growth Management Region, GMR), 자연보전권역(Nature Preservation Region, NPR) 3개의 권역으로 나누어 관리하고 있다(Table 1, Fig. 1). 과밀억제권역은 인구·산업의 집중에 따른 이전·정비가 이루어지는 권역이며, 권역 내 과밀이 지속되고 과밀화 현상이 주변으로 확산되는 지역이다. 성장관리권역은 인구·산업 유치 및 도시개발 적정 관리되는 지역이며, 자연보전권역은 한강 수계 수질·녹지 등 자연환경 보전이 필요한 지역이다.

본 연구에서는 「수도권정비계획법」 상 권역을 기준으로 하여 도시별 토지이용 변화 분석과 탄소저장량 분석을 실시하였다. 하나의 지자체가 여러 개의 권역을 포함하고 있는 경우에는 권역별로 분리하여 분석하였다. 토지피복 지도 획득의 한계로 경기도 지역에서 접경지역을 제외한 지역만을 대상으로 설정하였다.

2.2. 자료 및 방법

본 연구는 두 단계로 수행되었다. 먼저 환경부 중분류 토지피복지도를 활용하여 과거의 토지이용변화 추세를 분석하였다. 두 번째 단계에서는 InVEST Carbon 모형을 사용하여 토지이용을 탄소저장량으로 환산 후, 각 시기별 탄소저장량

추세를 지역유형별, 탄소 저장고별로 살펴보았다(Fig. 2).

2.2.1. 토지이용 변화 분석

환경부의 2000, 2007, 2009, 2013 네 시기의 환경부 중분류 토지피복지도를 활용하여 경기도지역의 토지이용변화를 분석하였다. 특히 개발의 척도를 보여주는 도시지역의 변화를 중점적으로 파악하였다. 권역별 시기 간 도시의 증가율과 함께, 지역 내 도시지역이 차지하고 있는 비율을 종합적으로 분석하였다. 또한, 개발로 인해 야기되는 주요 탄소흡수원의 기능을 하는 산림지역의 감소량을 추정하였다.

2.2.2. 탄소저장량 변화 분석

탄소저장량 변화 분석을 위하여 InVEST Carbon 모형을 사용하였다. 탄소저장량은 토지이용지도와 탄소밀도를 활용하여 추정하였으며, 탄소밀도의 경우 지상·지하·토양·고사유기물을 통합하여 계산하였다(Lyu et al., 2019, Zhao et al., 2019, He et al., 2016, Li et al 2018, Jiang et al., 2017). 해당 지역의 총 탄소저장량은 토지이용 유형별 탄소 저장량과 면적을 곱하여 산출한다. 이 때, 탄소 저장량은 지상부, 지하부, 토양탄소, 고사유기물의 탄소 밀도의 합으로 계산된다. 구체적인 공식은 다음과 같다 (1a, 1b) (He et al., 2016).

$$C_i = C_{i,A} + C_{i,B} + C_{i,S} + C_{i,D} \quad (\text{Eq. 1a})$$

$$C_{total} = \sum C_i \times A_i \quad (\text{Eq. 1b})$$

(i: 토지유형, C_i : 토지유형 단위면적 당 탄소 저장량, $C_{i,A}$: 지상부, $C_{i,B}$: 지하부, $C_{i,S}$: 토양탄소, $C_{i,D}$: 고사유기물, C_{Total} : 전체 탄소저장량, A_i : 토지유형 별 해당 면적)

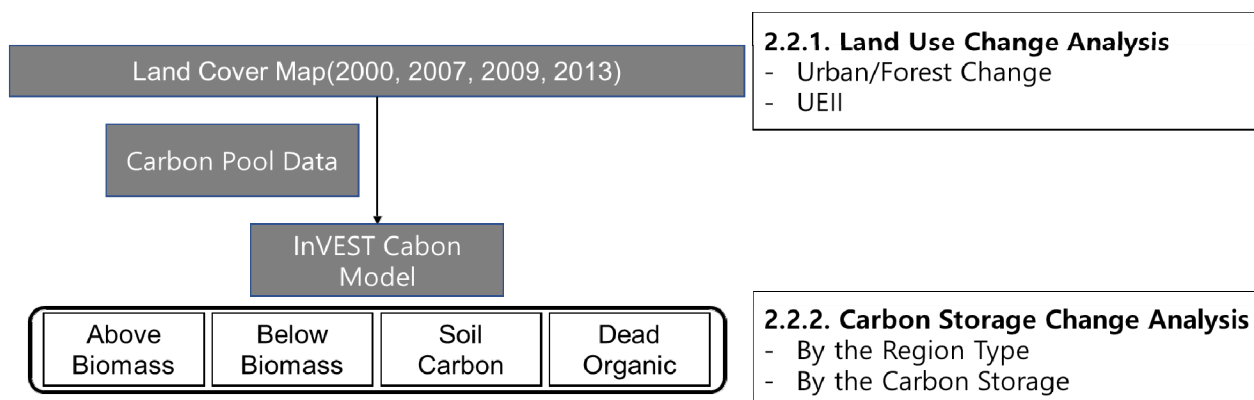


Fig. 2. Flow of analysis of land use change and carbon storage change

지상부 바이오매스는 식물의 살아있는 잎, 수피, 가지, 줄기 등의 바이오매스에 해당하며, 지하부 바이오매스는 살아있는 뿌리의 모든 바이오매스를 나타낸다. 토양탄소는 광물 토양 내(30cm 깊이까지의) 유기탄소를 의미하고, 고사유기물의 경우 고사목과 낙엽층에 해당하는 탄소를 의미한다(IPCC, 2006, Zhao et al., 2019).

탄소저장량 추정을 위한 InVEST의 구동을 위해서는 시기별 토지피복 데이터와 Carbon Pool 데이터가 필요하

다. 토지피복 데이터의 경우 환경부 제작 중분류 토지피복지도를 Table 2의 분류군에 맞게 재분류하여 사용하였다. InVEST 모형은 지역 범위의 탄소 저장량을 추정하는 모형이므로, 대한민국 및 인근 지역의 선행연구를 참고하여 Carbon Pool 데이터를 구축하였다(Lee et al., 2016, Chung et al., 2015, Tomasso et al., 2014) (Table 2.).

Table 2. Carbon pool table for InVEST model

(Unit: Mg of C/ha)

Land-use		C _{above}	C _{below}	C _{soil}	C _{dead}	Land-use		C _{above}	C _{below}	C _{soil}	C _{dead}
10	Built-up	0	0	0	0	33	Mixed Forest	53.59	17.36	47.22	11.79
21	Rice Paddies	0	0	69.9	0	41	Natural Grassland	4.17	16.69	88.2	0
22	Field	0	0	62.2	0	42	Artificial Grassland	1.15	4.58	11.5	0
23	Facility Cultivation	0	0	45.9	0	51	Inland Wetland	35.24	9.18	88	0
24	Fruit Farm	0	0	51	13	52	Coastal Wetland	1.3	1.3	240	0.7
25	Other Cultivation	0	0	45.9	0	60	Bare Land	0	0.33	0.33	0
31	Broadleaf Forest	64.31	23.15	55.68	10.13	71	Inland Water	0	0	0	0
32	Coniferous Forest	42.87	11.57	38.75	13.45	72	Ocean Water	0	0	0	0

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 토지이용 변화 분석

대상 지역의 도시지역이 차지하는 비율(2013년 토지피복지도 기준)과 도시 성장비율(2000년 ~ 2013년)을 분석

한 결과, 권역 별 특성을 확인할 수 있었다. 과밀억제권역의 경우 대개 낮은 도시성장 비율(+36.13%)과 높은 도시의 비율(39.82%)을 보였다. 성장관리권역의 경우에는 높은 도시성장률(+79.46%)을 보였다. 자연보전권역의 경우 도시 자체의 비율이 가장 낮았으며(10.57%), 도시 성장률은 상대적으로 높은 값(+83.27%)을 보였다(Table 3).

Table 3. Trend of growing urban areas

(Unit: km²)

Zone	2000	2007	2009	2013	Urban proportion (2013)	Urban growth rate (2000 ~ 2013)
OCR	239.60	289.91	305.13	326.29	39.82%	+36.18%
GMR	303.17	432.71	490.86	544.07	22.94%	+79.46%
NPR	219.4	283.87	336.77	402.09	10.57%	+83.27%

도시별로 분석해 보면 과밀억제권역에 속하는 부천시(OCR, 116.89%), 안양시(OCR, 117.85%), 수원시(OCR, 120.36%)의 도시 성장이 가장 낮았으며, 자연보전권역의 가평군(NPR, 237.96%), 성장관리권역에 속한 남양주시(GMR, 236.02%) 지역의 도시 성장이 가장 높았다(Fig. 3). 남양주시(OCR, 228.90%)와 하남시(OCR, 225.28%)는 과밀억제권역에 속하는 지역이나 다른 과밀억제권역 도시들

에 비해 월등히 높은 도시 성장률을 나타냈다. 전형적인 과밀억제권역 도시의 경우에는 분석 시점에 이미 개발이 완료되어 성장이 완화된 추세를 보였다. 하지만 남양주시와 하남시의 경우에는 개발제한구역의 부분 해제 효과와, 해당 지역에서 개발되는 대규모 택지지구(남양주 별내·오남·진접, 하남 교산·감일)로 인해 다른 과밀억제권역과 달리 상대적으로 높은 도시 성장률을 기록하였다.

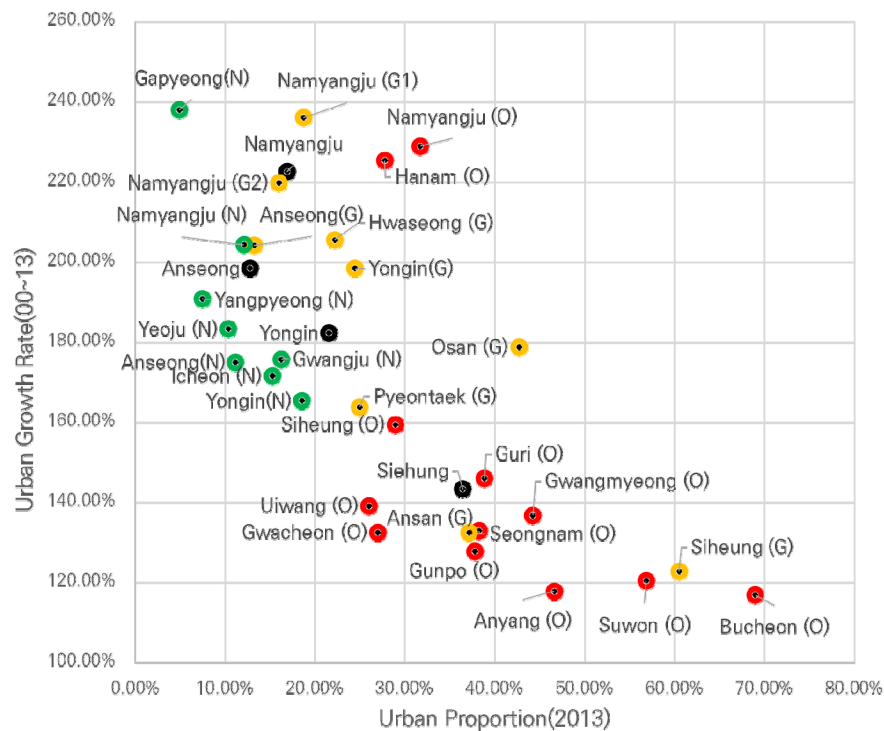


Fig. 3. Urban proportion (2013) and urban growth rate (2000 ~ 2013)

주요 탄소흡수원의 역할을 하는 산림지역의 면적 변화(2000 ~ 2013년)를 분석하였다(Table 4). 모든 지역에서 산림지역이 감소하였음을 확인할 수 있다. 그 중 가장 낮은 산림비율(31.49%)을 나타내는 성장관리 권역이 가장 높은 산림 감소율(-10.68%)을 나타냈다. 자연보전권역은

산림비율이 높게 나타났으며(60.83%), 산림의 감소율은 낮게 나타났다(-4.49%). 과밀억제권역은 상대적으로 낮은 산림비율(37.18%)을 가지고 있으나, 성장관리 권역에 비해서는 적은 산림 감소율(-7.25%)을 나타냈다.

Table 4. Trend of decreasing forest areas (OCR: Overconcentration Control Region, GMR: Growth Management Region, NPR: Nature Preservation Region) (Unit: km²)

Zone	2000	2007	2009	2013	Forest proportion (2013)	Forest decreasing rate (2000 ~ 2013)
OCR	328.5	322.89	318.17	304.7	37.18%	-7.25%
GMR	836.15	794.14	791.38	746.86	31.49%	-10.68%
NPR	2,424.04	2,376.77	2,378.80	2,315.22	60.83%	-4.49%

도시별로 분석해 보면 성장관리권역에 속하는 오산시(GMR, -26.44%), 평택시(GMR, -18.27%), 화성시(GMR, -16.90%)의 산림 감소량이 가장 두드러졌다. 특히 경기 남부 지역에 위치한 최근 개발이 활발한 지역을 위주로 산림 감소가 다량 진행되었다. 성장관리권역의 시흥시(GMR, -0.61%), 남양주시(GMR, -2.36%), 자연보전권역의 양평군(NPR, -1.71%) 지역의 산림 감소가 가장 적었는데, 주로 절대적인 산림의 비율이 높거나(양평군, 남양주시), 절대적인 토지이용 변화량 자체가 적은 지역(시흥시)의 경우 산림 감소가 적은 것으로 분석되었다.

도시의 성장률과 함께 산림의 감소율을 연계하여 함께

분석하였다(Fig. 4). 과밀억제권역의 경우 상대적으로 낮은 도시 성장비율(+36.18%)에 산림 감소율도 상대적으로 적은 값(-7.25%)을 나타내었다. 자연보전권역의 경우 도시 성장비율이 높지만(+83.27%) 그에 비해 산림의 감소율(-4.49%)은 가장 낮았다. 성장관리권역의 경우 높은 도시 성장률(+79.46%)과 함께 산림의 면적 감소가 다른 지역에 비해 크게 나타났으며(-10.68%), 개별 도시 중에서도 산림 감소가 크게 나타난 지역이 다수 존재하였다. 이는 특히 성장관리권역 내의 도시에서 많은 양의 산림이 도시지역으로 전환되었음을 의미한다.

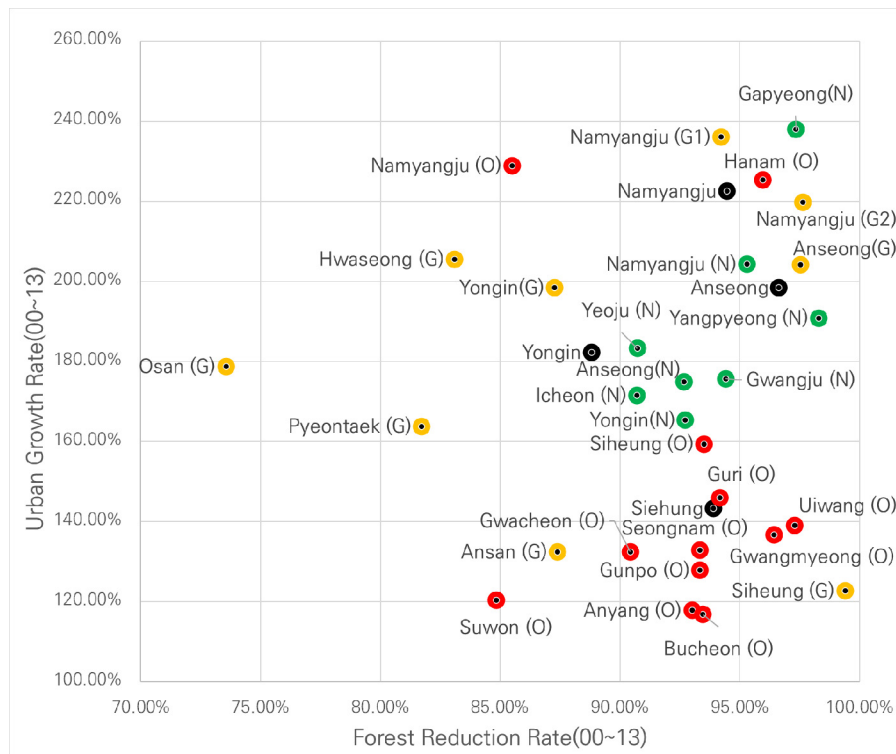


Fig. 4. Urban growth rate and deforestation rate

세 가지 유형의 지역에 대해 토지이용을 분석한 결과 세 유형의 도시에서 토지이용 변화 추세가 다르게 나타났다. 먼저, 과밀억제권역의 경우 이미 대부분의 개발이 완료되어 토지이용 변화 자체가 미미한 지역이다. 도시비율이 높아, 가용 개발지의 면적이 상대적으로 적고 이에 따라 도시의 성장이 둔화되는 지역이라 해석할 수 있다.

성장관리지역의 경우 높은 도시의 성장률을 보인다. 과밀억제권역보다 상대적으로 도시의 비율이 낮기 때문에

가용 개발지의 면적이 넓다. 개발이 가장 활발하며, 이에 따른 산림의 훼손 또한 가장 빈번한 지역이다. 따라서, 해당 지역은 개발 압력에 가장 취약한 지역이라 할 수 있다.

마지막으로, 자연보전지역의 경우 도시성장률은 상대적으로 높게 나타나나, 도시의 비율 자체가 적다. 도시 내 산림이 높은 비율을 차지하여, 도시지역이 확장하더라도 산림 감소율은 낮게 나타난다. 현재 산림 등의 자연지역이 많은 비율을 차지하고 있어 개발로 인한 영향이 크지

는 않으나 향후 도시개발이 증가할 경우 이에 따른 대비가 필요한 지역이다.

3.2. 탄소 저장량 변화

InVEST Carbon 모형을 활용한 탄소 저장량의 변화를 수도권정비계획법에 따른 지역 유형과, 탄소 저장고의 유형별로 분석하였다. 변화량 분석 대상 시기는 2000년 대비 2013년의 탄소 저장량 변화를 기준으로 하였다.

3.2.1. 지역 유형별 분석

권역별로 살펴보면, 자연보전권역에서의 저장량 변화가 가장 적었으며(-0.47%), 과밀억제지역(-10.49%), 성장관리지역(-10.68%)에서 큰 감소량을 보였다(Table 5). 도시별로 분석 시 양평군(NPR, +3.79%), 가평군(NPR, +1.88%), 안성시(NPR, +0.79%)에서는 탄소 저장량이 소량 증가하는 추세를 보였으나 타지역에서는 탄소저장량이 감소하는 경향을 보였다. 특히 오산시(GMR, -25.48%), 시흥시(GMR, -24.90%), 안산시(GMR, -23.96%)에서 가장 큰 감소폭을 나타냈다.

Table 5. Changes in carbon storage in the past (○: The region where carbon loss occurred the most. ●: The region where carbon storage increased the most.) (Unit: Mg of C)

Zone	2000	2007	2009	2013	Rate of change (2000 ~ 2013)
OCR	5,940,286	5,592,461	5,398,492	5,316,963	-10.49%
Suwon	551,778	522,807	452,092	448,068	-18.80%
Seongnam	1,167,482	1,160,514	1,103,858	1,070,017	-8.35%
Gwacheon	338,555	332,279	330,333	298,221	-11.91%
Gunpo	273,065	250,694	240,524	247,885	-9.22%
Uiwang	507,960	494,310	476,368	476,007	-6.29%
Bucheon	188,011	161,554	165,116	166,657	-11.36%
Gwangmyeong	269,813	248,428	219,082	232,807	-13.72%
Siheung	834,915	779,803	757,946	760,773	-8.88%
Namyangju	400,092	340,430	339,419	331,834	-17.06%
Guri	189,748	172,989	191,919	172,634	-9.02%
Hanam	814,708	742,653	739,302	737,027	-9.53%
GMR	38,059,150	37,367,677	37,201,797	37,881,829	-10.68%
Yongin	2,493,073	2,328,120	2,286,801	2,284,467	-8.37%
Anseong	3,747,751	3,637,989	3,609,882	3,721,829	-0.69%
Ansan ○	1,352,735	1,340,323	1,297,053	1,028,645	-23.96%
Siheung ○	85,850	96,530	68,319	64,477	-24.90%
Hwaseong	5,794,173	5,151,688	5,011,457	4,789,951	-17.33%
Osan ○	269,386	256,555	204,734	200,759	-25.48%
Pyeongtaek	2,642,648	2,539,459	2,451,273	2,411,199	-8.76%
Namyangju	2,193,364	2,121,688	2,124,373	2,093,635	-4.55%
NPR	18,578,980	17,472,351	17,053,892	16,594,962	-0.47%
Yongin	2,699,444	2,544,753	2,627,595	2,622,020	-2.87%
Anseong ●	899,191	890,953	897,245	906,319	0.79%
Namyangju	2,079,841	2,062,024	2,057,358	2,051,152	-1.38%
Gwangju	4,487,694	4,330,659	4,292,859	4,324,048	-3.65%
Icheon	3,593,374	3,484,420	3,420,829	3,425,880	-4.66%
Yangpyeong ●	9,177,904	9,104,600	9,036,342	9,525,306	3.79%
Yeoju	5,303,464	5,199,296	5,152,924	5,024,690	-5.26%
Gapyeong ●	9,818,240	9,750,974	9,716,645	10,002,415	1.88%

세 가지 유형 별 탄소 저장량 추세 또한 다르게 나타났으며, 이에 따라 토지이용변화와 연계하여 차별적인 탄소 흡수원 정책이 필요하다.

먼저, 과밀개발지역의 경우 상대적으로 다른 두 지역에 비해 도시의 성장률이 낮으나 산림의 감소율은 상대적으로 높은 값을 보인다. 이는 곧 높은 탄소 저장량의 감소로 나타난다. 이미 토지이용변화가 둔화되는 단계에 들어섰기 때문에 토지이용에 직접적인 영향을 주는 토지이용변화 정책을 실시하기는 어렵다. 따라서 탄소흡수원 추가 확보 측면에서는 유휴지나 자투리땅을 활용한 탄소흡수원 확충이 가장 현실적인 방안이다. 또한, 대부분의 과밀개발지역의 경우 개발제한구역의 산림이 다량 분포하는 지역이며, 이러한 도시 내 잔여 자연지역에 대한 보전과 관리를 통해 탄소흡수원으로서의 기능을 수행할 수 있다.

성장관리지역의 경우 가장 개발의 압력을 많이 받는 지역이다. 도시의 성장률도 높은 축에 속하며, 산림의 감소 또한 가장 활발히 일어나는 지역이다. 따라서 가장 높은 탄소 저장량의 손실을 보여주는 지역이다. 동시에 계획관리지역은 법적인 규제가 다른 두 지역에 비해 약한 지역이다. 과밀개발지역의 경우 대도시 주변의 개발제한구역에 의해, 자연보전지역의 경우 상수원 보호구역 등 자연환경 보전을 위한 다양한 보호지역으로 법적으로 개발이 제한되고 있다. 하지만 성장관리지역의 경우 법적 규제 수단이 상대적으로 적다. 따라서, 해당 지역 개발 시 산림 지역 등의 훼손 및 난개발을 억제할 수 있는 수단이 필요

하다. 또한, 도시지역의 신규 개발 시 탄소흡수원을 고려한 계획 및 설계가 필요할 것으로 사료된다.

자연보전지역의 경우 도시지역의 절대량이 가장 적은 지역일뿐더러 다른 두 지역에 비해 탄소저장량의 감소도 적은 지역이다. 도시 성장률은 높으나 절대량이 적기 때문에 탄소 저장량에 큰 영향을 주지는 못한다. 현재로서는 개발에 따른 탄소저장량에 미치는 영향이 가장 적은 지역이나 추후 개발 수요가 증가할 경우 대비할 필요성이 있다. 또한, 지역 내 분포하고 있는 여러 보호지역 또한 탄소 저장고로서의 역할을 효과적으로 수행할 수 있는 바, 보호지역에 대한 체계적인 관리 및 보전이 필요할 것으로 보인다.

3.2.2. 탄소저장고별 분석

탄소저장량 변화를 지상부, 지하부, 토양탄소, 고사유기물 4개의 요소로 나누어 분석하였다(Table 6). 2000년 대비 2013년의 탄소저장량의 변화를 분석하였을 때 지상부의 경우 +1.32%, 지하부의 경우 +8.10%로 토지이용 변화 결과 소폭 증가함을 확인하였다. 반면에 토양탄소와 고사유기물의 경우 -9.40%, -10.73%로 토지이용 변화 결과 감소함을 확인할 수 있었다. 각 탄소저장고별 변화량이 동일 경향성을 보이지 않는 이유는 각 토지이용 별 포함하고 있는 저장고별 단위 면적당 탄소 저장량에 차이가 있고, 토지이용이 지역마다 다르게 변하기 때문이다.

Table 6. Changes in carbon storage by carbon pool

(Unit: Mg of C)

Part	2000	2007	2009	2013	Rate of change (2000 ~ 2013)
Above biomass	24,059,575	23,579,742	23,967,163	24,376,216	101.32%
Below biomass	7,928,883	7,796,571	7,973,510	8,571,241	108.10%
Soil carbon	40,578,519	38,590,092	37,289,963	36,762,384	90.60%
Dead organic	5,442,265	5,266,074	5,189,744	4,858,325	89.27%
Total	78,009,241	75,232,480	74,420,380	74,568,165	95.59%

도시별로 살펴보면, 지상부의 경우 시흥(GMR, +20.16%), 안성(GMR, +8.37%), 양평(NPR, +7.24%) 등에서 탄소저장량이 증가하는 것으로 나타났으며, 오산(GMR, -18.54%), 수원(OCR, -11.99%), 남양주(OCR, -10.42%) 등에서 감소량이 크게 나타났다.

지하부의 경우에는 시흥(GMR, +35.11%), 시흥(OCR, +20.32%), 평택(GMR, +17.73%) 등에서 탄소저장량이 증가하는 것으로 나타났으며, 과천(OCR, -6.75%), 남양주(OCR, -4.96%), 오산(GMR, -4.93%) 등에서 지하부 바이오매스의 감소량이 크게 나타났다.

토양탄소의 경우에는 가평(NPR, +0.43%), 양평(NPR, +0.13%) 외 전 지역에서 탄소저장량이 감소됨을 확인할 수 있었다. 안산(GMR, -36.99%), 시흥(GMR, -35.29%), 오산(GMR, -29.86%) 등에서 특히 토양탄소의 감소량이 크게 나타났다.

고사 유기물의 경우에는 전지역에서 모두 감소 추세가 나타났다. 시흥(GMR, -2.96%), 구리(OCR, -4.05%), 의왕(OCR, -4.20%)에서 감소량이 적게 나타났으며, 오산(GMR, -29.45%), 평택(GMR, -24.01%), 화성(GMR, -22.43%) 등에서 특히 고사 유기물의 감소량이 크게 나타났다.

InVEST 모형의 활용을 통해 토지이용 변화에 따른 도시별, 탄소 저장고별 탄소량의 변화 추세를 확인할 수 있었다. 기존 토지이용 변화 분석 결과, 각 도시별 탄소량은 대부분 감소하는 추세를 보였다. 각 지역의 탄소량 감소를 지상부, 지하부, 토양탄소, 고사유기물 4개의 탄소 저장고로 나누어 분석 시, 토양탄소가 전체 탄소 감소량에 비해 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났으며, 이는 토양탄소의 감소가 전체 탄소의 감소에 큰 영향을 끼쳤다고 해석할 수 있다. 또한, 연구 대상지 내 탄소 저장고 중 토양탄소가 차지하는 비중은 49.30%(2013년 토지피복지도 기준)으로 절대량의 측면에서도 탄소저장고에서 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

탄소 저장고별 Carbon Pool 데이터의 계수 분석 시 산

림 지역 위주로 계수가 설정된 지상부·지하부 바이오매스와 달리 농지, 산지, 초지, 습지 등지에 고르게 분포한 것으로 보아, 다양한 토지이용에 토양탄소가 비교적 균등하게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 산림 외 농지, 습지 등 타 토지가 도시로 변화하는 경우 상대적으로 토양 탄소의 손실 비중이 높음을 확인할 수 있다.

특히 경기도 내 서해안에 위치한 일부 지자체의 경우 우수한 토양탄소 저장 능력을 가지고 있는 연안습지(갯벌) 지역의 도시개발에 따른 탄소 저장량의 감소가 두드러지게 나타난다. 안산시의 경우에도 전체 탄소 감소량이 -23.96%인데 비하여, 토양탄소의 감소량은 -36.99%로 더 크게 나타났다(Fig. 5(a)). 안산시의 토지피복 변화를 살펴보면 시가화 지역이 1,567.75 ha 증가한데 비해, 산림 면적의 경우 649.60 ha 감소하였고, 습지 지역이 781.27 ha 감소하였다.

또한, 농경지 또한 우수한 토양탄소의 저장고로서의 역할을 하는데, 광명시의 경우 2000년 대비 2013년의 전체 탄소 감소량이 -13.72%인데 비하여, 토양탄소의 감소량은 -24.70%로 더 크게 나타났다(Fig. 5(b)). 광명시의 토지피복 변화를 살펴보면 시가화 지역이 458.44 ha 증가한데 비해, 산림 면적의 경우 46.59 ha 감소하였으며 농경 지역의 경우 530.99 ha 감소하였다.

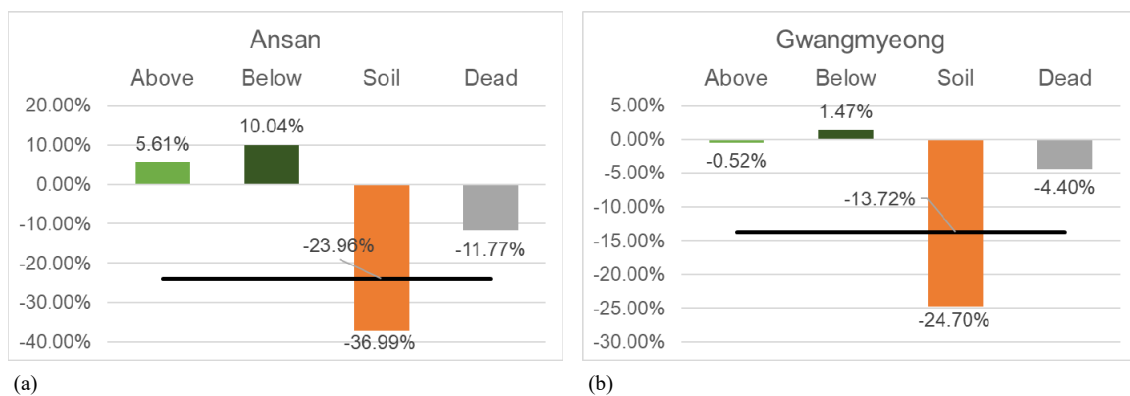


Fig. 5. Carbon Storage change rate by carbon pool (a): Ansan, (b): Gwangmyeong

(Black Line: Total Carbon Storage Change Rate)

이와 같이 산림 외 농경지나 습지와 같은 토지이용을 가지고 있는 지역이 도시지역으로 전환되는 경우 토양탄소의 저장량 손실에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

선행 연구에서도, 전 세계의 토양 내 존재하는 탄소는 약 1,500 Pg이며, 대기 중 존재하는 탄소의 약 2배, 육상 식물에 저장된 탄소의 약 3배로 추정되고 있다(Pravalie et al.,

2021, Jansson et al., 2010, Stockmann et al., 2013, Scharlemann et al., 2014; Plaza et al., 2018, Lal, 2010; Putz et al., 2014). 따라서 토양 탄소는 가장 중요한 육상 탄소 흡수원으로 고려되고 있다(Nguemezi et al., 2021, Jobbagy and Jackson, 2000, Lal, 2004 ; Munoz-Rojas et al., 2015 ; Mirzaee et al., 2015 , Wang et al., 2016; Chu et al., 2018, Stockmann, et al., 2013). 따라서, 산림 위주로 진행되고 있는 토지이용 관련 탄소흡수원 관리 정책과 더불어 농경지와 습지 등 다양한 토지유형의 토양 탄소를 통합적으로 관리하는 정책 및 계획의 수립이 필요하다고 판단된다.

다만, InVEST 모형 사용을 통한 탄소저장량 추정은 해당 지역의 토지피복에만 연관되어 개략적인 탄소저장량 변화의 추세를 확인할 수 있다는 장점이 있지만 소규모 지역의 정밀도 높은 탄소저장량 변화 추정에는 한계가 있다. 따라서 좀 더 정밀한 탄소저장량 추정을 위해서는 현장 조사, 실험 등을 통한 계수의 추정과 함께 탄소저장량에 미치는 타 요인의 고려가 필요될 것으로 사료된다.

4. 결론

최근 정부에서는 탄소중립 전략 중 하나로 탄소흡수원의 확충을 제시하고 있다. 본 연구에서는 각 도시 지역별 도시 내 토지이용변화로 인해 탄소흡수원의 기능을 할 수 있는 지역의 감소와 함께 탄소량의 감소 추세를 제공하였다는 데 의의가 있다. 전반적으로 수도권 지역의 경우 도시화로 인해 산림지, 농경지, 습지 등 자연적인 토지이용이 변화하여 탄소저장량의 감소의 결과를 가져왔다. 이를 방지하기 위해 도시화로 인한 토지이용변화를 방지하기 위한 정책이 필요한 것으로 보인다. 특히 최근 제정된 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법과 연계하여 국토개발계획 등 상위계획에서 탄소흡수원 등의 확충 정책과 함께 탄소저장량을 유지 및 증진할 수 있는 방안이 고려되어야 할 것으로 보인다.

하지만 이러한 정책 수립 시 지역별, 탄소 저장고별로 차별적으로 고려할 필요가 있다. 첫째는 지역 별 특성을 고려한 탄소정책 수립의 필요성을 제시하였다. 각 지역에서는 지역별 도시성장 추세와 탄소저장량 변화를 고려하여 탄소흡수원 확충 위주의 토지이용관련 탄소 정책 뿐만 아니라 각 지역에 맞는 수단을 효율적으로 적용해야 할 것으로 보인다. 또한, 수도권정비계획법에서 구분한 권역별 특성을 고려하여 각 권역별 토지이용 관련 탄소 정책

의 가이드라인 제작 등 표준화 방안도 수립할 수 있을 것이다.

둘째는 토양 탄소의 중요성이다. 탄소저장량의 변화를 부분별로 나누어 분석해본 결과, 전체 탄소량 중 토양탄소가 차지하는 비중이 다른 부분보다 높았으며, 타 부분보다 토양탄소의 감소량이 두드러지게 나타남을 확인하였다. 이는 토양탄소가 산림 외 습지 및 농지 등에서 중요한 흡수원의 역할을 하기 때문으로 나타났다. 특히 보호지역의 설정, 행위제한 등으로 인해 개발이 어려운 산림 지역에 비해 상대적으로 개발이 취약한 지역에 대한 고려가 필요할 것이다. 이에 따라 현재 산림 흡수원 관리 정책과 함께 토양탄소 측면의 통합적인 탄소흡수원 관리 정책의 수립도 필요하다고 사료된다. 이에 앞서 도시화 뿐만 아니라 다양한 유형의 토지이용변화에 따른 토양 내 탄소저장량의 변화에 대한 종합적인 연구가 추가적으로 시행되어야 할 것으로 보인다. 또한, 대한민국의 현행 LULUCF 통계 산정 시에는 토양탄소와 관련된 공식적인 통계 산출이 되지 않고 있으며, 이에 따른 체계화된 통계 구축과 함께 토양탄소의 종합적인 관리 방법과 정책 도입 등이 필요하다고 판단된다.

향후 연구에서는 InVEST Carbon 모형에 대한 추가적인 고찰과 한계를 보완할 수 있는 방법이 제시되어야 할 것이다. 해당 모형은 탄소 순환을 비교적 단순화한 모형이라 토지이용 변화에 따른 탄소저장량의 변화를 제외한 내부 요소는 고려하지 못하였다. 이 점의 경우 추후 연구를 통해 임상도 등 타 환경공간정보를 결합하여 영급별 탄소저장량을 도출하는 등의 분석이 추가적으로 필요하다. 그리고 사용되는 Carbon Pool 데이터의 경우 참고하는 선행 사례에 따라 토지이용에 따른 해당 수치가 달라질 수 있다. 더욱 정밀한 탄소저장량의 도출을 위하여는 더욱 세밀하고 유형화된 토지이용 분류와 함께 이에 따른 단위면적 당 탄소저장량의 산출이 우선되어야 할 것이다. 또한, 탄소저장량에 대한 검증을 위해 NFI 자료(Park et al., 2012), 현장 조사 등을 활용한 검증 방법론의 수립이 필요할 것으로 보인다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020002990009).

References

- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2):151-163.
- Ceschia E, Béziat P, Dejoux JF, Aubinet M, Bernhofer C, Bodson B, Buchmann N, Carrara A, Cellier P, Di Tommasi P, Elbers JA, Eugster W, Grünwald T, Jacobs CMJ, Jans WWP, Jones M, Kutsch W, Lanigan G, Magliulo E, Marloie O, Moors EJ, Moureaux C, Olioso A, Osborne B, Sanz MJ, Saunders M, Smith P, Soegaard H, & Wattenbach M. 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(3), 363-383.
- Chu S, Jacobs DF, Sloan JL, Xue L, Wu D, & Zeng S. 2018. Changes in soil properties under Eucalyptus relative to Pinus massoniana and natural broadleaved forests in South China. *Journal of Forestry Research*, 29(5), 1299-1306.
- Chung MG, Kang H, & Choi SU. 2015. Assessment of Coastal Ecosystem Services for Conservation Strategies in South Korea. *PLOS ONE*, 10(7), e0133856.
- Fehrmann L, Lehtonen A, Kleinn C, & Tomppo E. 2008. Comparison of linear and mixed-effect regression models and a k-nearest neighbour approach for estimation of single-tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(1), 1-9.
- Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, & Snyder PK. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570-574.
- Fu C, Chen Z, Wang G, Yu X, & Yu G. 2021. A comprehensive framework for evaluating the impact of land use change and management on soil organic carbon stocks in global drylands. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 48, 103-109.
- Goetz SJ, Baccini A, Laporte NT, Johns T, Walker W, Kellndorfer J, Houghton RA, & Sun M. 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management*, 4(1), 2.
- Groshans GR, Mikhailova EA, Post CJ, Schlautman MA. 2018. Accounting for soil inorganic carbon in the ecosystem services framework for united nations sustainable development goals. *Geoderma*. 324:37-46.
- He CY, Zhang D, Huang QX, & Zhao YY. 2016. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [Article]. *Environmental Modelling & Software*, 75, 44-58.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- Ito, A. 2008. The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(5), 738-747.
- Jansson C, Wullschlegel SD, Kalluri UC, & Tuskan GA. 2010. Phytosequestration: Carbon Biosequestration by Plants and the Prospects of Genetic Engineering. *BioScience*, 60(9), 685-696.
- Jiang WG, Deng Y, Tang ZH, Lei X, & Chen Z. 2017. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [Article]. *Ecological Modelling*, 345, 30-40.
- Jobbágy EG, & Jackson RB. 2000. THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND ITS RELATION TO CLIMATE AND VEGETATION. *Ecological Applications*, 10(2), 423-436.
- Ko J, KC, Nam J., Bong I., Lee J., Kim D., Ye M., Jeong H., Han A., Im Y. 2018. 2030 Roadmap for Reducing Greenhouse Gas in Gyeonggi Province. Gyeonggi Research Institute.

- Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- Lal R. 2010. Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. *BioScience*, 60(9), 708-721. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>
- Lee CH. 2016. An Integrated Approach to Environmental Valuation. Sejong, Korea: Korea Environmental Institute. Policy Report 2016-10.
- Li C, Zhao J, Thanh NX, & Xi YT. 2018. Assessment of the Effects of Urban Expansion on Terrestrial Carbon Storage: A Case Study in Xuzhou City, China [Article]. *Sustainability*, 10(3), 17, Article 647.
- Li K, Wang S, Cao M. 2004. Vegetation and soil carbon storage in china. *Science in China, Series D: Earth Sciences*. 47(1):49-57.
- Li L, Song Y, Wei XH, & Dong J. 2020. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China [Article]. *Ecological Indicators*, 111, 9, Article 106064.
- Lyu RF, Mi LN, Zhang JM, Xu MQ, & Li JJ. 2019. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model [Article]. *Ecological Research*, 34(3), 380-393.
- Mirzaee S, Ghorbani-Dashtaki S, Mohammadi J, Asadi H, & Asadzadeh F. 2016. Spatial variability of soil organic matter using remote sensing data. *CATENA*, 145, 118-127.
- Muñoz-Rojas M, Jordán A, Zavala LM, De la Rosa D, Abd-Elmabod SK, & Anaya-Romero M. 2015. Impact of Land Use and Land Cover Changes on Organic Carbon Stocks in Mediterranean Soils (1956-2007). *Land Degradation & Development*, 26(2), 168-179.
- Nguemezi, C. Tematio, P. Silatsa FBT. & Yemefack M. 2021. Spatial variation and temporal decline (1985-2017) of soil organic carbon stocks (SOCS) in relation to land use types in Tombel area, South-West Cameroon. *Soil and Tillage Research*, 213, 105114.
- Ohtsuka T, Akiyama T, Hashimoto Y, Inatomi M, Sakai T, Jia S, Mo W, Tsuda S, & Koizumi H. 2005. Biometric based estimates of net primary production (NPP) in a cool-temperate deciduous forest stand beneath a flux tower. *Agricultural and Forest Meteorology*, 134(1), 27-38.
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 333(6045):988-993.
- Park HJ, Shin HS, Roh YH, Kim KM and Park KH. 2012. Estimating forest carbon stocks in Danyang using kriging methods for aboveground biomass. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1): 16-33
- Plaza C, Zaccone C, Sawicka K, Méndez AM, Tarquis A, Gascó G, Heuvelink GB. M, Schuur EAG, & Maestre FT. 2018. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. *Scientific Reports*, 8(1), 13788.
- Prăvălie R, Nita IA, Patriche C, Niculiță M, Birsan M.-V, Roșca B, & Bandoc G. 2021. Global changes in soil organic carbon and implications for land degradation neutrality and climate stability. *Environmental Research*, 201, 111580.
- Pütz S, Groeneveld J, Henle K, Knogge C, Martensen AC, Metz M, Metzger JP, Ribeiro MC, de Paula MD, & Huth A. 2014. Long-term carbon loss in fragmented Neotropical forests. *Nature Communications*, 5(1), 5037.
- Scharlemann JPW, Tanner EVJ, Hiederer R, & Kapos V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), 81-91.
- Stockmann U, Adams MA, Crawford JW, Field DJ, Henakaarchchi N, Jenkins M, Minasny B, McBratney AB, Courcelles VdRd, Singh K, Wheeler I, Abbott L, Angers DA, Baldock J, Bird M, Brookes PC, Chenu C, Jastrow JD, Lal R, Lehmann J, O'Donnell AG,

- Parton WJ, Whitehead D, & Zimmermann M. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Tomasso L, & Leighton M. 2014. The Impact of Land Use Change for Greenhouse Gas Inventories and State-Level Climate Mediation Policy: A GIS Methodology Applied to Connecticut. *Journal of Environmental Protection*, 05, 1572-1587.
- Wang S, Wang Q, Adhikari K, Jia S, Jin X, & Liu H. 2016. Spatial-Temporal Changes of Soil Organic Carbon Content in Wafangdian, China. *Sustainability*, 8(11), 1154.
- Zhao MM, He ZB, Du J, Chen LF, Lin PF, & Fang S. 2019. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models [Article]. *Ecological Indicators*, 98, 29-38.