

**환경공간정보와 InVEST Carbon 모형을 활용한
탄소저장량 추정 방법에 관한 연구: 세종시를 중심으로***
- 생태·자연도, 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도를 대상으로 -

황진후¹⁾ · 장래익¹⁾ · 전성우²⁾

¹⁾ 고려대학교 오정리질리언스센터 교수 · ²⁾ 고려대학교 환경생태공학부 교수

**A Study on the Estimation Method of Carbon Storage Using
Environmental Spatial Information and InVEST Carbon Model:
Focusing on Sejong Special Self-Governing City***

- Using Ecological and Natural Map, Environmental Conservation Value
Assessment Map, and Urban Ecological Map -

¹⁾ Hwang, Jin-Hoo · ²⁾ Jang, Rae-ik · ³⁾ Jeon, Seong-Woo

¹⁾ Ojeong Resilience Institute, Korea University, Professor,

²⁾ Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Professor.

ABSTRACT

Climate change is considered a severe global problem closely related to carbon storage. However, recent urbanization and land-use changes reduce carbon stocks in terrestrial ecosystems. Recently, the role of protected areas has been emphasized as a countermeasure to the climate change, and protected areas allow the area to continue to serve as a carbon sink due to legal restrictions. This study attempted to expand the scope of these protected areas to an evaluation-based environmental spatial information theme map. In this study, the area of each grade was compared, and the distribution of

* 본 연구는 환경부에서 발주하여 2020년 고려대학교에서 수행한 “국토환경성평가지도 구축 및 시스템 개선(2020) - 환경공간정보 연계·활용 방안 연구”의 일부분을 발전시켰으며, 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2020002990009) 또한, 본 연구는 주저자 황진후의 박사학위 논문 “Analyzing Effects of Environmental Protection Areas on Land-use and Carbon Storage in Mega-city”의 일부를 발췌 후 재가공하였습니다.

First author : Hwang, Jinhoo, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Professor,
Tel : +82-2-3290-3543, Email : i0255278@korea.ac.kr

Corresponding author : Jeon, Seongwoo, Division of Environmental Science & Ecological Engineering,
Korea University, Professor.
Tel : +82-2-3290-3043, Email : eepps_korea@korea.ac.kr

Received : 24 August, 2022. **Revised** : 25 October, 2022. **Accepted** : 25 October, 2022.

land cover for each grade was analyzed using the Ecological and Nature Map, Environmental Conservation Value Assessment Map and Urban Ecological Map of Sejong Special Self-Governing City. Based on this, the average carbon storage for each grade was derived using the InVEST Carbon model. As a result of the analysis, the high-grade area of the environmental spatial information generally showed a wide area of the natural area represented by the forest area, and accordingly, the carbon storage amount was evaluated to be high. However, there are differences in the purpose of production, evaluation items, and evaluation methods between each environmental spatial information, there are differences in area, land cover, and carbon storage. Through this study, environmental spatial information based on the evaluation map can be used for land use management in the carbon aspect, and it is expected that a management plan for each grade suitable for the characteristics of each environmental spatial information is required.

Key Words : *Climate Change Mitigation, Land Management, Land Cover, InVEST Carbon Model, Carbon Storage*

I. 서 론

기후변화는 현재 국제적으로 심각한 문제로 고려되고 있으며, 지구의 탄소 순환과 직접적 연관을 가지고 있다(Lee, 2008, Hwang et al., 2019). 하지만, 최근의 산림파괴, 도시확장 등은 토지이용을 변화시키며, 육상생태계의 탄소저장 기능에 부정적인 영향을 미치고 있다(Lyu et al., 2019, Hwang et al., 2021b). 토지이용변화는 식생 및 토양이 저장하고 있는 이산화탄소를 대기 중으로 배출시키고 대기 중 온실가스를 증가시켜 기후변화를 가속화하고 있다(Foley et al., 2005, Hwang et al., 2021b, Jung and Kwon, 2014, Hwang et al., 2019).

이에 대응하기 위한 방안으로, 국내외적으로 다양한 정책을 수립하고 있다. 특히 토지이용분야에서는 탄소흡수원을 주요 수단으로 고려하고 있으며, 산림을 흡수원으로 적극적으로 활용하고 있다(Yun, 2005, Hwang et al., 2019). 또한 흡수원 관리의 수단 중 하나로 보호지역의 역할이 강조되고 있다. 보호지역은 생물다양성의 보전 등 본래의 기능을 가지고 있지만 이와 함께 주요 탄소흡수원의 기능을 보유하고 있다(Hwang et al., 2019, Nigel and Adrian, 2006). 보호지역의 관리를 토지

이용 측면에서 검토한다면, 보호지역 그 자체가 육상탄소의 저장 기능을 가지고 있을뿐더러, 법적 행위제한을 통해 토지이용의 변화를 방지할 수 있고 토지이용변화로 인한 탄소 배출 저감을 유도하여 궁극적으로 기후변화 완화에 역할을 할 수 있다(Campbell et al., 2009, Hwang et al., 2019). 국내 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」에서도 보호지역의 산림관리 실적을 작성하도록 되어 있으며 산림보호구역을 해당 법령 상 보호지역으로 규정하고 있다. Hwang et al.(2019)의 연구에서 보호지역의 범위를 기존 산림보호구역에서 확장하는 연구가 시도된 바 있다.

본 연구는 이러한 보호지역의 탄소흡수원으로써의 기능을 개별 보호지역의 관리에서 벗어나 평가 기반의 환경공간정보 주제도로의 확장을 시도하려 한다. 대한민국의 다양한 환경공간정보는 환경의 보전과 국토의 개발을 고려할 수 있는 국토 및 환경계획 수립을 위해 구축되고 있다(Kim et al., 2019). 특히 국토의 관리를 위한 우수한 지역의 모니터링과 국토의 현황 및 자연성의 평가를 위해 공간정보를 기반으로 한 다양한 평가도들이 구축되고 있다(Kim et al., 2018a). 본 연구에서는 환경적 가치를 등급으로 나누어 평가한 평가도 중 검토 대상 환경공간정

보로 환경부에서 제작한 생태·자연도, 국토환경성평가지도와 각 지자체에서 구축한 도시생태현황지도를 선정하였다.

이러한 국가 구축 환경공간정보의 활용은 신뢰도 측면에서의 장점이 있을 것으로 전망된다. 탄소저장량 추정과 관련한 다양한 범위를 대상으로 한 선행 연구가 존재한다. 대표적인 방법론으로 현장조사, 원격탐사, 통계 기법의 활용 등이 존재한다. Schlund et al., 2017, Meng et al., 2009 등의 연구에서는 LiDAR(Light Detection and Ranging) 등 원격탐사 기법을 활용하여 새로운 탄소저장량 추정 방법론을 제시한 바 있다. Rapideye, Landsat 등 다양한 영상 등을 활용하거나, 원격탐사 과정 중 샘플 크기를 다양화하는 등 탄소저장량 추정에 있어서의 여러 방법론 간 비교를 수행한 연구도 있다(Rana et al., 2016, Gonzalez et al., 2010). 또한, kNN(k-Nearest Neighbors) 등 통계 기법을 활용하여 표본점 단위 조사의 공간 단위 확장을 수행하기도 하였다(Lumbres et al., 2014).

다만 현장 조사를 통해 진행된 연구의 경우 연구의 대상지가 넓어질 경우 적용이 어려워진다는 한계가 존재하며, 위성영상이나 통계적 기법을 활용한 추정 방법론의 경우 불확실성이나 신뢰성 측면에서의 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서 활용되는 국가환경공간정보의 경우에는 제작 단계에서 검증 과정을 거쳤으며, 국가 차원에서의 일률적인 방법론을 활용하였기 때문에 신뢰성에 장점이 있다.

본 연구에서는 환경적 가치를 평가하는 환경주제도를 활용하여 탄소 측면에서의 토지이용에의 활용에 대해 논할 것이다. 환경 주제도의 활용을 통해, 높은 환경적 가치를 보유한 지역을 보호할 경우 기후변화 완화에 역할을 할 수 있을 것인지에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 각 환경주제도의 등급별 지역에 대한 토지피복을 분석하였다. 이를 기반으로 하여 InVEST(Integrated valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) Carbon 모

형을 활용하여 개략적인 탄소저장량에 대한 분석을 실시하였다. 결론적으로 다양한 환경공간정보의 분석을 통해 환경공간정보 간 차이를 고찰하고, 탄소 측면 토지이용 관리 시 적용 방안을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

1) 연구 대상지

본 연구의 대상지는 세종특별자치시로 선정하였다. 해당 도시는 토지이용 측면에서 최근 개발된 지역인 행정복합중심도시와, 조치원읍을 중심으로 한 기성 시가지 및 촌락을 보유하고 있으며, 산지, 하천 등 다양한 경관을 보유하고 있는 지역이다. 또한, 세종시는 2050 탄소중립을 위한 탄소중립도시 전환과 같은 다양한 정책을 시행하는 등 탄소중립의 관심도가 높은 지방자치단체이다.

2) 재료 및 방법

① 연구재료

본 연구의 재료로는 생태·자연도, 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도를 활용하였다. 생태·자연도는 「자연환경보전법」 제3조에 의해 전 국토의 산·하천·내륙습지·호소·농지·도시 등에 대하여 자연환경을 생태적 가치, 자연성, 경관적 가치 등에 따라 등급화하여 작성된 지도를 의미한다(Choi et al., 2019). 국토환경성평가지도는 국토의 환경적 가치를 정량적으로 분석하여 전국을 5개 등급으로 구분한 평가지도이다(Kim et al., 2018b, Song et al., 2012). 도시생태현황지도는 「도시생태현황지도의 작성방법에 관한 지침」 제3조에 따라 비오름유형도 및 각 비오름의 생태적 특성을 나타내는 기본주제도 작성과 비오름 평가 과정을 거쳐 각 비오름의 생태적 특성과 등급화된 평가가치를 표현한 비오름평가도를 의미한다(Kwon et al., 2021).

해당 환경공간정보들의 경우 환경적 가치에 따라 등급의 형태로 분류되어 있는 평가도라는 공통

Table 1. Carbon Pool Table for InVEST Model (Unit: Mg of C/ha)

LULC		Cabove	Cbelow	Csoil	Cdead	LULC		Cabove	Cbelow	Csoil	Cdead
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

점이 있으나 평가항목, 입력자료, 평가방법, 평가 절차, 등급 수, 해상도 등에 있어서는 차이가 있다.

② 연구방법

본 연구는 세 가지 단계로 구성된다(Figure 1.). 첫째, 환경공간정보 간 등급별 면적 비교를 실시하였다. 생태·자연도 및 도시생태현황지도는 벡터 형태로 제작되었기 때문에, 국토환경성평가지도와의 면적 비교를 위해 10m 단위의 래스터로 변환하여 분석·비교하였다.

둘째, 해당 환경공간정보의 등급별 토지피복 비율을 분석하였다. 등급별 토지피복 비율 분석에는 환경부 제작 세분류 토지피복지도가 활용되었다.

셋째, 각 등급별 토지피복을 토대로 하여 탄소저장량을 추정하였다. 탄소저장량 추정에는 InVEST Carbon 모형을 사용하였다. InVEST 모형은 Natural Capital Project에서 개발하였으며, 생태계서비스의 정량화 및 지도화를 수행하는 모형이다(Lyu et al., 2019, He et al., 2016, Li et al., 2018, Jiang et al., 2017, Hwang et al., 2021). 해당 모형은 여러 하위 모형으로 구성되어 있으며, InVEST Carbon 모형은 대상 지역의 탄소저장량을 추정하는 모형이다. 대상 지역의

탄소저장량은 해당 지역의 토지피복과 토지피복 별 탄소밀도를 이용하여 산출된다(Hwang et al., 2021a). 토지피복 별 탄소밀도는 각 토지피복 별 탄소가 저장되어 있는 위치에 따라 지상부(C_{Above}), 지하부(C_{Below}), 토양탄소(C_{Soil}), 고사유기물(C_{Dead})로 구성되며 이는 Carbon Pool Table 형태로 정리된다. 구체적인 탄소저장량 도출 수식은 다음과 같다 (Equation 1a, 1b) (He et al., 2016, Hwang et al., 2021a).

$$C_i = C_{i,Above} + C_{i,Below} + C_{i,Soil} + C_{i,Dead} \quad (\text{Equation 1a})$$

$$C_{Total} = \sum C_i \times A_i \quad (\text{Equation 1b})$$

(i: 토지유형, C_i : 토지유형 단위 면적 당 탄소저장량, $C_{i,Above}$: 지상부, $C_{i,Below}$: 지하부, $C_{i,soil}$: 토양탄소, $C_{i,Dead}$: 고사유기물, C_{Total} : 전체 탄소저장량, A_i : 토지유형 별 면적)

해당 모형의 입력 자료 구축을 위해 환경부 제작 토지피복지도를 분류군에 맞게 재분류하였다. Carbon Pool Data의 경우 대한민국을 대상으로 한 유사 연구에서 활용한 Carbon Pool Data를 차용하여 활용하였다(Hwang et al., 2021b) (Table 1.). 해당 Carbon Pool Data의 경우 대한민국 및

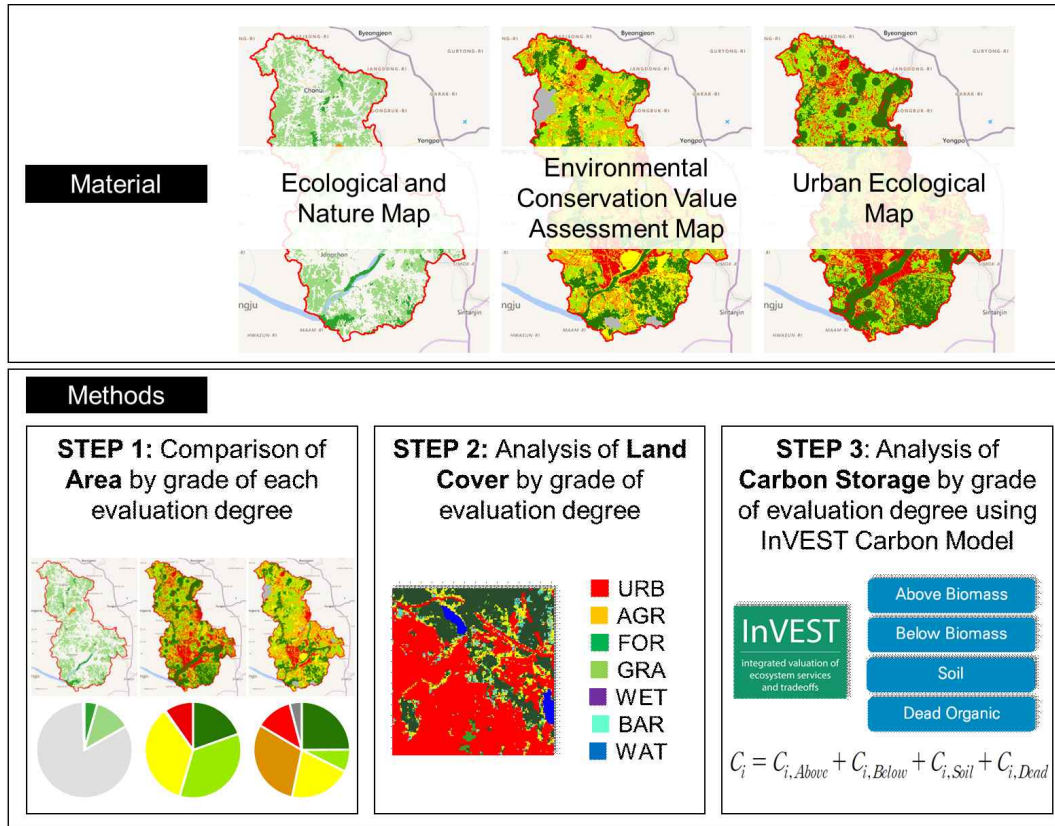


Figure 1. Flow Charts

인접 지역에서 수행된 InVEST를 활용한 연구의 Carbon Pool Data를 종합화한 자료이다(Lee et al., 2016, Chung et al., 2015, Hwang et al., 2021a).

3. 결과 및 고찰

1) 연구결과

① 등급별 면적 분석

세종특별자치시 생태·자연도의 경우 3등급 지역이 57.91%로 가장 넓은 면적을 차지했으며, 2등급 지역이 38.64%, 1등급 지역의 경우 3.05%, 별도관리지역이 0.40%로 나타났다. 보전 가치가 높은 1등급, 2등급, 별도관리지역이 약 40% 가량의 비율을 차지하였다.

국토환경성평가지도의 경우 3등급 면적이 35.51%, 2등급 면적이 35.00%로 넓은 면적을

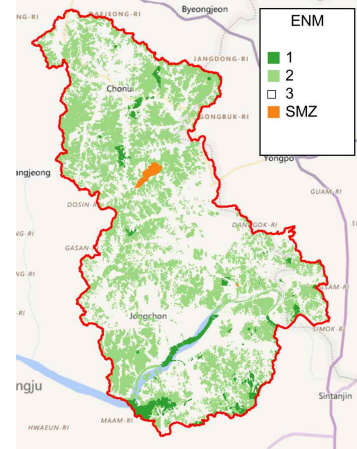
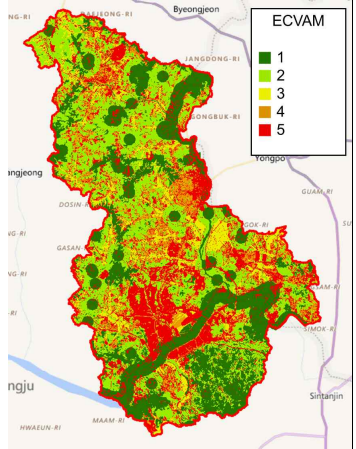
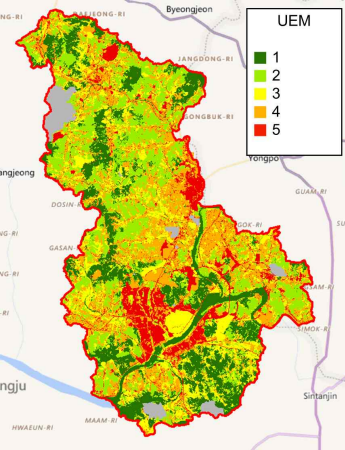
차지했다. 1등급 지역이 19.52%, 5등급 지역이 9.73%로 나타났고 4등급 지역이 0.25%로 나타났다. 국토환경성평가지도의 경우에도 1~3등급의 보전 가치가 높은 지역이 넓은 면적을 차지하였다.

도시생태현황지도의 경우 3.23%의 면적이 평가 대상지에서 제외되었다. 해당 지역은 군사시설 등으로 인해 평가 대상에서 제외된 지역이다. 2등급이 26.00%, 4등급이 24.25%로 나타났으며 1등급이 19.88%, 3등급 16.71%, 5등급의 경우 9.93%의 면적을 차지한다. 5등급을 제외하고 나머지 등급의 면적이 비교적 고르게 나타남을 확인하였다 (Table 1).

② 토지피복 비율 분석

세종특별자치시의 경우 생태·자연도의 1등급,

Table 2. Comparison of area by grade of each evaluation degree - Sejong City (SMZ: Separately Management Zone)

Ecological and Nature Map		Environmental Conservation Value Assessment Map		Urban Ecological Map	
					
1st	1,419.63ha (3.05%)	1st	9,079.46ha (19.52%)	1st	9,248.39ha (19.88%)
2nd	17,978.06ha (38.64%)	2nd	16,283.41ha (35.00%)	2nd	12,097.12ha (26.00%)
		3rd	16,518.55ha (35.51%)	3rd	7,774.28ha (16.71%)
3rd	26938.8ha (57.91%)	4th	114.89ha (0.25%)	4th	11,281.12ha (24.25%)
		5th	4,524.96ha (9.73%)	5th	4,618.04 (9.93%)
SMZ	184.78ha (0.40%)			N/A	1,502.32ha (3.23%)
Total	46,521.27ha (100.00%)	Total	46,521.27ha (100.00%)	Total	46,521.27ha (100.00%)

2등급 지역에서 산림 지역이 74.15%, 93.77%로 높은 비율을 나타냈다. 1등급 지역과 별도관리지역에서 수역이 유의할 만한 비율을 차지했다. 산림과 수역을 제외한 나머지 토지피복의 경우 대부분 3등급 지역에서 나타났다. 국토환경성평가지도의 경우 1등급, 2등급 지역에서 산림이 63.17%, 69.75%로 높은 비율을 차지했다. 농지와 초지의 경우 3등급 지역에서의 비율이 54.12%, 39.13%로 높게 나타났으며, 시가화건조지역은 대부분 5등급(37.14%)과 4등급(8.85%)에서 나타났다. 특히

세종특별자치시의 경우 현재 개발이 다량 진행되고 있는 지역으로, 나지의 면적이 4등급(75.64%), 5등급(62.53%) 지역에서 다량 나타나는 것이 특징이다. 도시생태현황지도의 경우에도 1등급과 2등급에서 각각 80.10%, 78.95%로 산림이 높은 비율을 차지했으며, 3등급 및 4등급에서는 농지 및 초지가 높은 비율을 차지하였고, 5등급 지역에서는 시가화건조지역과 나지가 높은 비율을 차지한다 (Table 3).

Table 3. Analysis of land cover by grade of evaluation degree - Sejong City (URB: Urban, AGR: Agricultural Area, FOR: Forest, GRA: Grassland, WET: Wetland, BAR: Barren Land, WAT: Water)

Ecological and Nature Map			Environmental Conservation Value Assessment Map				Urban Ecological Map			
1st		URB	0.06%		URB	0.00%		URB	0.19%	
		AGR	0.05%		AGR	0.14%		AGR	0.28%	
		FOR	74.15%		FOR	63.17%		FOR	80.10%	
		GRA	1.29%		GRA	0.51%		GRA	6.68%	
		WET	4.47%		WET	3.36%		WET	3.66%	
		BAR	3.59%		BAR	7.30%		BAR	1.99%	
		WAT	16.40%		WAT	25.53%		WAT	7.11%	
2nd		URB	0.01%		URB	0.00%		URB	0.43%	
		AGR	0.41%		AGR	7.79%		AGR	1.66%	
		FOR	93.77%		FOR	69.75%		FOR	78.95%	
		GRA	0.72%		GRA	10.16%		GRA	11.84%	
		WET	1.37%		WET	2.11%		WET	3.65%	
		BAR	1.30%		BAR	7.15%		BAR	1.87%	
		WAT	2.41%		WAT	3.03%		WAT	1.60%	
3rd		URB	17.11%		URB	0.00%		URB	3.25%	
		AGR	34.58%		AGR	54.12%		AGR	41.91%	
		FOR	8.53%		FOR	2.95%		FOR	21.40%	
		GRA	27.75%		GRA	39.13%		GRA	23.65%	
		WET	1.86%		WET	0.25%		WET	0.26%	
		BAR	9.29%		BAR	3.32%		BAR	8.55%	
		WAT	0.87%		WAT	0.23%		WAT	0.98%	
4th		URB	6.17%		URB	8.85%		URB	12.22%	
		AGR	7.75%		AGR	0.02%		AGR	51.63%	
		FOR	33.74%		FOR	0.07%		FOR	1.64%	
		GRA	12.39%		GRA	0.26%		GRA	26.19%	
		WET	0.86%		WET	0.02%		WET	0.05%	
		BAR	1.40%		BAR	75.64%		BAR	7.99%	
		WAT	37.69%		WAT	15.14%		WAT	0.27%	
SMZ		URB	6.17%		URB	37.14%		URB	63.23%	
		AGR	7.75%		AGR	0.03%		AGR	1.79%	
		FOR	33.74%		FOR	0.00%		FOR	0.65%	
		GRA	12.39%		GRA	0.05%		GRA	16.73%	
		WET	0.86%		WET	0.00%		WET	0.06%	
		BAR	1.40%		BAR	62.53%		BAR	17.48%	
		WAT	37.69%		WAT	0.25%		WAT	0.05%	

Legend: ■ URB ■ AGR ■ FOR ■ GRA ■ WET ■ BAR ■ WAT

③ 탄소저장량 추정

InVEST Carbon 모형을 활용하여 각 지역 별 등급별 단위 면적당 탄소의 양을 추정하였다. 세종특별자치시의 생태·자연도의 경우 1등급이 113.66Mg of C/ha, 2등급이 129.94Mg of C/ha로 높은 값을 나타냈으며 그 외 3등급 지역의

경우 41.55Mg of C/ha로 낮은 값을 나타냈다. 별도관리지역의 경우에는 49.44Mg of C/ha로 나타났다. 국토환경성평가지도의 경우 2등급 지역의 탄소저장량이 104.96Mg of C/ha로 가장 높은 값을 나타냈으며 1등급 지역의 탄소저장량이 91.36Mg of C/ha로 그 다음을 차지했다. 3등

Table 4. Analysis of carbon storage by grade of evaluation degree - Sejong City (SMZ: Separately Managed Area, AVG: Average) (Unit: Mg of C/ha)

Ecological and Nature Map		Environmental Conservation Value Assessment Map		Urban Ecological Map	
1 st	113.66	1 st	91.36	1st	117.38
2 nd	129.94	2 nd	104.96	2 nd	115.69
3 rd	41.55	3 rd	46.23	3 rd	59.19
SMZ	49.44	4 th	0.68	4 th	40.09
AVG	77.94	5 th	0.44	5 th	5.05
		AVG	77.94	AVG	77.94

급(46.23Mg of C/ha)이 평균보다 아래를 차지했으며, 4등급(0.68Mg of C/ha), 5등급(0.44Mg of C/ha)로 현저히 낮은 값을 나타냈다. 도시생태 현황지도의 경우 1등급 지역이 117.38Mg of C/ha로 가장 높은 값이었으며, 2등급(115.69Mg of C/ha)로 높은 값을 차지하였다. 3등급(59.19Mg of C/ha), 4등급(40.09Mg of C/ha)가 그 다음을 차지하였으며 5등급(5.05Mg of C/ha)의 경우 가장 낮은 값을 나타냈다 (Table 7).

2) 고찰

① 환경공간정보의 등급과 탄소저장량

생태·자연도의 경우 1등급과 2등급 지역이 높은 탄소저장량을 나타냈다. 1등급, 2등급 지역 대다수가 산림 지역에 해당되기 때문이다. 세종특별자치시의 1등급 지역의 경우 수역이 차지하는 부분이 일부 존재하여 전체적인 평균 탄소저장량이 감소하였지만 그럼에도 불구하고 높은 탄소저장량을 차지하였다. 3등급 지역의 경우 1, 2등급과 별도관리지역을 제외한 나머지 부분에

해당하며, 면적 상 차지하는 비율도 가장 높다. 따라서 다른 환경공간정보의 저등급 지역과 비교하여 탄소저장량이 상대적으로 높다.

국토환경성평가지도의 경우 1, 2등급이 평균보다 높은 값을 나타내며, 4, 5등급의 경우 0에 가까운 낮은 값을 나타내는 추세를 보였다. 1, 2등급의 경우 높은 비율의 토지피복이 산림으로 구성된 것을 볼 수 있다. 3등급의 경우 산림의 비율이 줄고 농지와 초지가 주로 분포했으며, 4~5등급의 경우 시가화지역이 대부분을 차지하는 것을 확인 할 수 있다. 특히 세종특별자치시에는 최근의 개발을 반영하듯 많은 양의 나지가 4등급 및 5등급 지역에서 확인되고 있다. 이러한 분포는 대다수의 법적 환경보호지역이 산림을 위주로 분포하고 있기 때문이라 할 수 있다. 개발제한구역, 공익용산지, 임업용산지, 상수원보호구역과 같이 1, 2등급에 해당하는 보호지역의 대부분이 산림의 분포 비율이 높다.

도시생태현황지도의 경우 1, 2등급이 높은 값을 나타냈으며, 3, 4등급의 경우 평균보다 낮은

값, 5등급의 경우 매우 낮은 값을 나타냈다. 다만, 도시생태현황지도는 앞선 두 공간정보와 달리 평가 방법이 각 도시마다 차이가 있어 일괄적으로 해석하는 데는 한계가 있다. 세종특별자치시의 경우 구조적 측면, 자연적 측면, 환경적 측면을 대상으로 하여 의사결정나무 및 가치합산 매트릭스 방법을 종합적으로 활용하여 평가하지만, 타 도시의 경우 평가 항목 및 기준에서 차이가 존재한다. 대표적으로 수원시의 경우 의사결정나무 및 가치합산 매트릭스 방법을 사용하는 것은 동일하지만 평가항목이 안정성, 허약·취약성, 다양성, 자연성, 회귀성으로 세종시와 차이가 있다 (Suwon City, 2019, Sejong Special Self-Governing City, 2019). 따라서, 도시생태현황지도의 경우 지역 간 비교 및 해석에 있어 발생하는 차이에 대한 고려가 필요할 것이다.

② 환경공간정보 간 탄소저장량 측면의 유사점

세 환경공간정보 모두 공통된 사항으로 등급이 높을수록(1등급에 가까울수록) 평균 탄소저장량이 높음을 확인할 수 있었다. 이는 등급별 구성하고 있는 지역의 토지피복의 비율과 관련되어 있다.

생태·자연도, 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도의 각 1, 2등급에서 산림 지역이 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 산림 지역 이외의 다른 토지피복의 경우 주로 수역이나 습지, 초지 등으로 구성된 것을 확인할 수 있다. 생태·자연도의 3등급이나 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도의 4, 5등급으로 갈수록 시가지지역이나 나지의 비율이 높은 것과 대조적이다. 이는 대개 자연적인 토지피복으로 구성된 지역(산림 등)이 인공적인 토지피복을 보유한 지역(시가지 건조지역)에 비해 평가에서 높은 등급을 부여받는 가능성이 높기 때문이라 할 수 있다. 생태·자연도는 4개의 평가항목(식생, 멸종위기 야생생물, 습지, 지형)을 통해 최종 등급을 산출하는데, 모두 인공적인 토

지피복을 보유한 지역보다 산림을 비롯한 자연적인 토지피복을 보유한 지역에서의 평가가 유리하다. 국토환경성평가의 경우에는 법제적 평가항목에 해당하는 개발제한구역이나 공익용산지 등은 대개 산림 지역 위주로 구성되어 있으며, 환경생태적 평가항목 또한 생태·자연도 및 임상도 등의 입력자료를 활용하기 때문에 자연 지역이 높은 등급을 받을 가능성이 크다. 도시생태현황지도의 경우에도 세종특별자치시의 도시생태현황지도의 평가 기준인 구조적 측면, 자연적 측면, 환경적 측면을 고려하면 자연 지역이 인공 지역에 비해 평가가 유리하다.

따라서, 세 환경공간정보에서 높은 등급의 지역들이 산림을 비롯한 자연지역을 다량 포함하고 있으며, 자연지역의 경우 일반적으로 인공지역에 비해 평균적인 탄소저장량이 높게 나타나기 때문에 결과적으로 탄소저장량이 높게 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 다만, 생태·자연도나 국토환경성평가지도에서 2등급 지역이 1등급 지역보다 탄소저장량이 높게 나타나는 현상은 1등급 지역에 상대적으로 탄소저장량이 낮다고 판단되는 수역이 다량 포함되어 있기 때문이라 할 수 있다.

③ 환경공간정보 간 탄소저장량 측면의 차별점

기본적으로 고등급 지역일수록 평균적인 탄소저장량이 높게 나타난다는 공통점이 나타나지만, 세부적인 수치나 분포 간에는 차이가 있다. 이는 지역 내에 차지하고 있는 평가도의 등급 비율과 등급 별 토지이용의 비율의 차이가 있기 때문이다. 이는 환경공간정보 자체의 제작 목적과 평가 항목, 평가 방법 등의 차이에 기인한다.

먼저, 생태·자연도의 경우 자연환경조사를 통해 식생, 멸종위기 야생생물, 습지, 지형을 평가하고 이를 3개의 등급으로 평가한다. 이러한 평가 항목이 우수할 경우 1등급 권역으로 평가되고, 1등급 지역의 주변 지역이거나 1등급 지역보다는 중요도가 떨어지지만 보전 가치가 있는

지역에 대해 2등급으로 평가한다. 3등급 지역의 경우 1등급, 2등급 및 법적 보호지역인 별도관리지역을 제외한 나머지 지역에 해당된다. 따라서, 3등급 지역의 경우 별도의 평가를 통해 도출된 지역이라기보다는 전체 지역에서 환경적으로 우수한 지역을 제외한 나머지 지역이라는 성격이 강하며, 그 면적 비율도 가장 높다. 따라서, 생태·자연도의 3등급 지역은 평균적인 탄소저장량 또한 1, 2등급보다는 낮지만 국토환경성평가나 도시생태현황지도의 하위등급인 4, 5등급보다는 상회하는 탄소저장량을 나타낸다.

국토환경성평가지도와 도시생태현황지도는 동일하게 5등급으로 구성되어 있고, 고등급 지역의 탄소저장량이 저등급 지역보다 높다는 공통점이 있지만, 세부적인 차이가 존재한다. 특히, 국토환경성평가지도 4, 5등급의 경우 평균적인 탄소저장량이 0에 수렴하지만, 도시생태현황지도의 4, 5등급 지역의 경우 저등급 지역임에도 불구하고, 국토환경성평가지도의 저등급 지역보다 훨씬 높은 탄소저장량을 나타낸다. 이는 각 공간정보의 평가 항목과 방법의 차이 때문이다. 국토환경성평가지도는 법적인 평가항목과 환경생태적 평가항목으로 구성되며, 법적인 보호지역이 산림을 비롯한 자연적 토지피복을 다수 포함하고 있고, 환경생태적 평가항목에 활용되는 입력자료들로 인해 자연지역이 높은 등급을 보유한다. 또한, 국토환경성평가지도의 경우 시가화지역을 5등급 지역을 제척하는 과정이 포함된다. 따라서, 국토환경성평가지도의 4, 5등급 지역에는 자연 지역이 거의 포함되지 않으며 이로 인해 낮은 탄소저장량을 나타낸다.

반면, 도시생태현황지도는 격자 단위로 평가되었던 국토환경성평가지도와는 다르게 하나의 비오톱 단위로 평가된다. 또한, 도시생태현황지도의 경우 법적 보호지역을 비롯한 절대적인 기준에 의해 평가되는 국토환경성평가지도와 달리, 하나의 비오톱 단위의 가치를 종합적으로 합산되어 평가하는 방법을 취하기 때문에 등급

별 토지이용의 분포가 다소 극단적으로 나타났던 국토환경성평가지도에 비해 상대적으로 등급 간 토지피복의 비율이 비교적 균등하게 나타난다. 따라서 탄소저장량 또한 양극단의 차이가 뚜렷한 국토환경성평가지도와는 달리 비교적 균등한 분포를 보여준다. 이에 따라 저등급 지역의 탄소저장량 또한 극단적으로 낮은 값을 나타내지 않는다.

④ 탄소저장량 측면에서의 환경공간정보의 의의 및 활용방안

이러한 평가 기반의 환경공간정보를 활용한 탄소저장량 측면의 분석은 단순한 등급별 탄소저장량 도출에 한정되지 않는다. 물론 고등급 지역의 경우 현재 시점에서 대체적으로 높은 탄소저장량을 보유한 우수한 지역이다. 하지만, 이러한 고등급 지역은 현재 뿐만 아니라 미래에 지속적으로 탄소저장 기능을 수행할 수 있는 지역이라는 데에 의의가 있다. 특히 고등급의 지역은 환경적 가치가 높다고 판단되는 곳으로 해석될 수 있어 도시 내 보전을 필요로 하는 지역이다. 따라서, 해당 지역의 법적 행위제한 및 도시 및 지역 계획에 따라 해당 지역의 토지이용 변화가 억제될 가능성이 높은 지역이다. 이는 해당 지역이 도시화 및 토지이용변화의 영향에 대응하여 탄소저장고의 역할을 지속할 수 있음을 의미한다.

또한, 탄소저장량의 극대화를 위한 산림경영, 숲가꾸기 등의 활동에도 이러한 평가도를 활용할 수 있다. 상대적으로 환경공간정보에서 고등급을 나타내는 지역의 경우 탄소저장의 기능보다는 생물다양성의 보전이나 각 보호지역 고유의 목적에 맞는 기능들을 보유하고 있을 개연성이 높다. 수종 갱신이나 벌기령의 단축과 같은 산림경영 활동을 통한 탄소흡수량의 극대화를 할 때, 비교적 평가도의 등급이 낮은 곳의 지역을 우선적으로 활용하는 방안을 검토할 수 있다.

다만, 본 연구를 통해 분석하였듯 각 환경공

간정보 간 차이가 존재한다. 따라서, 일괄적으로 이러한 환경공간정보를 활용하기 보다는 각 환경공간정보 주제도에 맞는 활용 방안을 모색해야 할 것이다. 생태·자연도의 경우 환경영향평가나 환경계획 등에 직접적으로 활용되고, 법적인 구속력을 보유한 지도로 고등급에 포함된 지역의 타 지역으로의 용도 전환을 방지할 수 있다. 국토환경성평가지도는 법제적 평가항목이 포함되어 있다. 따라서, 이러한 법정보호구역의 행위제한과 연계하여 도시 내 탄소저장고의 지속적인 관리에 활용될 수 있다. 도시생태현황지도의 경우에는 도시 경계 내 범위에서의 탄소 관리에 활용될 수 있으며 다른 공간정보에 비해 대척적이고 지역의 특성을 잘 반영한 관리를 할 수 있다는 장점이 있다. 특히, 도시생태현황지도의 경우 커다란 가이드라인만 있을 뿐, 각 지역마다 평가 방법이나 평가 항목 등이 상이하므로, 각 지역 특성에 맞는 관리를 할 수 있다는 장점이 있다. 이처럼 각 환경공간정보의 장점 및 활용도를 고려하여 도시 내 토지이용에 따른 탄소 관리에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 세종특별자치시의 생태·자연도, 국토환경성평가지도, 도시생태현황지도를 활용하여 평가도 기반의 환경공간정보를 활용한 탄소 측면의 등급별 관리방향을 검토하였다. 대체적으로 평가도에서 고등급 지역일수록 산림지역으로 대표되는 자연지역의 분포가 넓게 나타났으며, 이는 평균 탄소저장량의 증가를 유도하였다. 환경공간정보의 고등급 지역은 그 자체적으로 탄소저장량이 높게 나타났으며 이러한 지역은 높은 환경적 가치로 인한 법적 행위 제한 및 보전 필요성에 의해 향후 탄소저장고로서의 역할을 지속할 수 있을 것이다. 이는 현재와 미래를 모두 고려한 탄소 분포 현황과 향후 관리 방향을 제시한다. 이러한 환경공간정보의

활용을 통한 연구는 통계모형이나 원격탐사와 같은 방법론에 비해 신뢰도 있는 자료의 활성화 측면에서의 역할을 수행할 수 있을 것으로 보인다. 하지만, 각 환경공간정보 간의 제작 목적, 평가 항목, 평가 방법 등 특성에 차이가 있기 때문에 등급별 면적, 토지이용 분포, 이로 인한 탄소저장량에도 차이가 있다. 따라서 각 환경공간정보의 특성에 맞는 등급별 관리방안이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구의 한계로는 평가도의 등급 설정 및 관리가 환경적 가치 및 법적인 행위제한에만 머물렀다는 점이다. 즉, 각 평가도에서 평가하는 것은 해당 지역이 환경적 우수성 및 법적인 규제로 인한 미래의 토지이용 변화 가능성을 의미하는 것이지, 해당 지역의 탄소저장량 측면의 우수성을 평가하는 것이 아니라는 점이다. 이는 본질적으로 본 연구에서 사용된 평가도들의 제작 목적이 탄소저장량의 평가가 아니라는 점에서 기인한다. 이를 위해서는 임상도와 같이 탄소흡수 능력을 평가할 수 있는 다른 요소들과의 융합이 필요할 것이다. 또한, 탄소저장량의 평가를 위해 사용한 InVEST Carbon 모형의 입력자료로 토지피복 외 다른 자료를 사용하지 못한 점도 한계라 할 수 있다.

향후 도시 전체의 탄소저장량 향상을 위한 토지이용 관리를 위해 양적인 탄소저장고의 확보뿐만 아니라 절대적인 탄소저장량 향상 또한 고려해야 할 것이다. 즉, 단위 면적 당 탄소저장량의 극대화 방안 또한 꾀해야 할 것이다. 또한, 비교적 단순했던 탄소저장량 추정을 보완하기 위해 수종, 임상 등을 고려한 정밀한 탄소저장량의 추정이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

References

- Campbell A · Dickson B · Gibbs H · Hansen M · Kapos V · Lysenko I · Miles L and Scharlemann J. 2009. The role of protected

- areas in storing carbon and reducing emissions. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science* 6(25): 1-2.
- Choi CH · Lim CH · Lee SJ and Seo HJ. 2019. The Impact of Anthropogenic Land Cover Change on Degradation of Grade in Ecology and Nature Map: *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 22(6): 77-87. (in Korean with English Summary)
- Chung MG · Kang H and Choi SU. 2015. Assessment of Coastal Ecosystem Services for Conservation Strategies in South Korea. *PLOS ONE* 10(7): e0133856.
- Dudley N and Philips A. 2006. Forests and protected areas : guidance on the use of the IUCN protected area management categories. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- 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 and Snyder PK. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science* 309 (5734): 570-574.
- Gonzalez P · Asner G · Battles J · Lefsky M · Waring K and Palace M. Forest carbon densities and uncertainties from Lidar, QuickBird, and field measurements in California. *Remote Sensing of Environment* 114: 1561-1575.
- He CY · Zhang D · Huang QX and Zhao YY. 2016. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software* 75: 44-58.
- Hwang JH · Choi YY · Kim YJ · Lim NO · Yoo YJ · Cho HJ · Sun ZM and Jeon SW. 2021a. Analysis of the effect of environmental protected areas on land-use and carbon storage in a megalopolis. *Ecological Indicators* 133: 108352.
- Hwang JH · Choi YY · Yoo YJ · Sun ZM · Cho HJ · Jeon SW. 2021b. Analysis of Land Use Changes and Carbon Storage by Region under the Seoul Metropolitan Area Readjustment Planning Act Using the InVEST Carbon Model. *Journal of Climate Change Research* 12(5-1): 523-535 (in Korean with English summary)
- Hwang JH · Jang RI and Jeon SW. 2019. Redefine Scope of Protected Zone in Act on the Management and Improvement of Carbon Sink Article 10. *Journal of Climate Change Research* 10(4): 291-297. (in Korean with English Summary)
- Jiang WG · Deng Y · Tang ZH · Lei X and 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. *Ecological Modelling* 345: 30-40.
- Jung JH and Kwon OY. 2014. GHG-AP Integrated Sink/Emission Inventories and Environmental Value Analysis in Vegetation Sector of Seoul. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 31(1): 72-82 (in Korean with English Summary)
- Kim GH · Kim OS and Yoon JH. 2019. Urban Expansion Prediction Using Spatial DBMS Based Environmental Conservation Value Assessment Map. *Journal of the Korean Cartographic Association* 19(3): 35-42. (in Korean with English Summary)
- Kim GH · Lee EJ · Yoon JH · Lee JH and Hwang SY. 2018a. Evaluation of Land Use Management

- Grade Using Environmental Conservation Value Assessment Map (ECVAM) and Restriction on Acts of Use District. *Journal of the association of Korean geographers*, 7(3): 479-488. (in Korean with English Summary)
- Kim YH · Choi JY · Yoon JH · Kim OS and Kim GH. 2018b. Applicability Study on 1:5,000 Environmental Conservation Value Assessment Map (ECVAM) Using Precise Forest Type Map. *Journal of the association of Korean geographers* 7(1): 115-128. (in Korean with English Summary)
- Kwon JO · Park SC and Baek SA. 2021. A study on the utilization of biotope map in urban planning. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 24(4): 31-46. (in Korean with English Summary)
- Lee CH. 2016. *An Integrated Approach to Environmental Valuation*. Sejong, Korea: Korea Environmental Institute. Policy Report 2016-10.
- Lee GH. 2008. Expansion of Carbon Absorption Sources in preparation for Post-2012 System. *Planning and Policy* 318: 18-25. (in Korean with English Summary)
- Li L · Song Y · Wei XH and Dong J. 2020. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China. *Ecological Indicators* 111: 9.
- Lumbres RIC and Lee YJ. 2014. Aboveground biomass mapping of La Trinidad forests in Benguet, Philippines, using Landsat Thematic Mapper data and k-nearest neighbor method. *Forest Science and Technology* 10(2): 104- 111.
- Lyu RF · Mi LN · Zhang JM · Xu MQ and Li JJ. 2019. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model. *Ecological Research* 34(3): 380-393.
- Meng Q · Cieszewski and Madden M. 2009. Large area forest inventory using Landsat ETM+: A geostatistical approach. *ISPRS Journal of Phgotogrammetry and Remote Sensing* 64(1): 27-36.
- Rana P · Gautam B and Tokola T. 2016. Optimizing the number of training areas for modeling above-ground biomass with ALS and multispectral remote sensing in subtropical Nepal. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 49: 52-62.
- Schlund M · Scipal K and Davidson MWJ. 2017. Forest classification and impact of BIOMASS resolution on forest area and aboveground biomass estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 56: 65-76.
- Sejong Special Self-Governing City. 2019. *Sejong Special Self-Governing City Urban Ecological Map Construction Research Service*. Research report to Sejong Special Self-Governing City. (in Korean)
- Song WK · Kim EY · Jeon SW · Park SH and Lee J. 2012. Improvement of the Criteria on Naturalness of the Environmental Conservation Value Assessment Map (ECVAM). *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 15(2): 31-40. (in Korean with English Summary)
- Suwon City. 2019. *Suwon City Natural Environment Survey and Urban Ecological Map Update*. Research report to Suwon City. (in Korean)
- Yun HY. 2005. A Study on the Legal and Institutional Improvement Strategies by Kyoto-Protocol in Forest Sector. *Environmental Law Review*, 27(4): 185-204 (in Korean with English Summary)