

최종보고서

과제번호 : 23-01-02-05-27

자연환경

서울시 산림생태계 보전지역의 생태계  
서비스 기여도 평가

2024. 1. 17.

이상돈



환경부지정  
서울녹색환경지원센터  
Seoul Green Environment Center

# 제 출 문

서울녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “서울시 산림생태계 보전지역의 생태계 서비스 기여도 평가”에 관한 연구보고서로 제출합니다.

연구기관명 : 이화여자대학교

연구책임자 : 이상돈 교수

(이화여자대학교 환경공학과)

연구 원 : 박영남

공동연구기관명 : (주)에코닉스

# 요 약 문

## I. 연구개요

서울시 산림생태계 보전지역의 생태계 서비스 기여도 평가

## II. 연구의 목적 및 필요성

산업의 발전으로 인해 변화하는 생태계를 관리하기 위해서는 인간에 의해 발생하는 활동을 고려하여 누적되는 위험 영향을 파악하고, 공존하는 여러 생태계를 함께 관리하는 방안 제시를 목적으로 하며, 이를 실천하기 위해서는 우선 생태계 상태를 파악해야 한다(Ansong et al. 2017; Harvey et al. 2018; NOAA 2021). 이에 생물들의 서식지를 중심으로 대상 지역의 생태계 현황을 파악하고 서식지의 가치를 평가하기 위한 연구가 필요하다.

탄소저장량은 생태계서비스의 주요한 지표이며 생산력 및 기후조절과 관련된 중요한 인자이다. 그러므로 탄소 추정 모델 및 토지피복 변화를 활용하여 탄소 저장능력을 추정하는 연구는 탄소 흡수를 위한 정책 효과를 판단하기 위해 필요하다. 그러므로 탄소 흡수량이 많은 토지 유형을 대상으로 탄소 흡수 및 배출에 대한 정량적 분석은 탄소 배출량 및 저장량 관리에 활용될 수 있다. 한편 변화하는 생태계를 관리하기 위해서는 인간으로부터 발생하는 활동을 고려하여 누적되는 위험 영향을 파악하고, 공존하는 여러 생태계를 함께 관리하는 방안 제시를 목적으로 하며, 이를 실천하기 위해서는 우선 생태계 상태를 파악해야 한다. 이에 생물들의 서식지를 중심으로 대상 지역의 생태계 현황을 파악하고 서식지의 가치를 평가하기 위한 연구가 필요하다.

본 연구는 서울시 생태경관보전지역 중 산림생태계를 대상으로 InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델 및 Habitat Quality 이용하여 토지 이용 변화 분석을 통해 탄소 흡수량의 변화 및 서식지 질을 정량적으로 도출하고, Carbon 모델의 탄소 저장량 평가 결과와 Habitat Quality 모델의 결과를 이용하여 생태계 보전 활용 가치평가 기준을 마련하고, 연구 대상 지역의 생태계 서비스 변화를 시계열적으로 분석하여 이에 대한 대책을 수립하고자 한다.

## Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

본 연구는 서울시 생태경관보전지역 중 면적이 50,000㎡ 이상인 산림생태계 지역인 청계산 원터골, 현인릉, 불암산 삼육대, 봉산, 인왕산, 관악산, 백사실 계곡 등 7개소의 산림생태계 지역을 선정한 뒤, InVEST nVEST Carbon Storage and Sequestration 모형 및 Habitat Quality 이용하여 토지 이용 변화 분석을 통해 탄소 흡수량의 변화 및 탄소 저장에 따른 경제적 가치 환산, 연구지역의 서식지 질을 정량적으로 도출하고자 한다.

## Ⅳ. 연구결과

서울시 생태경관보전지역 내 산림 생태계 지역의 서식지 질은 서울 전체에 대비하여 높은 서식지 질을 나타내고 있지만, 관악산과 현인릉을 제외한 나머지 지역은 시간의 흐름에 따른 토지피복의 변화에 따라 보호지역 내 서식지 질 역시 저하되고 있었다. 또한 연구지역의 탄소 저장능력, 탄소저장에 따른 경제적 가치 환산의 변화 원인 역시 토지피복의 변화의 결과임을 확인할 수 있었으며, 농업지역(논, 밭, 시설재배지, 과수원, 기타재배지), 산림지역(활엽수림, 침엽수림, 혼효림), 초지(자연초지, 인공초지), 습지(내륙습지, 연안습지), 나지(자연나지, 인공나지)의 증감이 탄소 저장 능력의 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 산림지역의 탄소 저장 능력은 다른 토지피복 유형에 비해 높으며, 산림지역의 확장은 탄소저장 능력의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 탄소 저장능력이 증가한 봉산과 불암의 경우 다른 4개소 지역(백사실, 관악, 현인릉, 인왕, 원터골)과 비교하여 산림의 면적이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한 다른 지역에 비해 순산림의 면적이 감소한 관악산과 인왕산의 경우 탄소 저장능력이 2007년에 비해 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다.

## Ⅴ. 연구결과의 활용계획

본 연구를 통해 서울시 생태경관보전지역에서 산림 생태계 지역의 생태계 서비스의 정량적인 평가 및 생태계 서비스 가치를 추정하고, 추후 생태경관보전지역이 확

대에 의한 토지이용변화에 따른 서식지 질의 변화 및 탄소 고정량의 변화를 도출할 수 있을 것이다.

생태계의 가치를 정량적으로 평가하고, 가치가 높은 지역은 생물 다양성을 보호하는 보호지역으로 활용하는 것이 필요하므로, 본 연구 결과는 추후 서울시의 생물다양성 보전지역 설정에 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 이를 바탕으로 서울시 산림 생태계의 보호 및 관리 방안을 위한 생태계 서비스 값의 제시를 통해 산림생태계 보호를 위한 기초자료를 수립할 수 있을 것이다.

한편 다양한 토지유형의 탄소 고정량 구축은 추후 서울시의 토지이용 계획 및 기후환경영향평가 단계에서 활용될 수 있으며, 생태계서비스 모델링 방법을 이용하여 추후 환경관련 분야 중 개발사업, 개발정책 수립 단계인 전략환경영향평가와 환경영향평가 단계에서 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

또한 환경정책에 대한 시나리오 분석이 가능하며, 정량적인 결과를 도출 할 수 있는 모델이므로 추후 환경영향의 미래 예측 및 평가, 그리고 국토개발 정책 과정에서 의사 결정 지원을 판단할 수 있는 객관적인 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

# 목 차

## <본문목차>

제 1장 서론 -----	1
1.1 연구의 필요성 -----	2
1.2 연구 목적 -----	4
제 2장 연구의 내용 및 범위-----	5
2.1 연구 대상지역 -----	6
2.2 연구 방법 -----	8
제 3장 연구 결과 -----	17
3.1 연구지역의 토지 피복 변화-----	18
3.2 연구지역의 서식지 질 변화-----	23
3.3 연구지역의 탄소저장량 변화-----	31
3.4 연구지역의 탄소저장량에 따른 경제적 가치 환산 -----	36
제 4장 연구 결과의 활용 계획-----	40
4.1 연구결과의 활용방안-----	41

## <표목차>

Table 1. 서울시 생태경관보전지역 지정 현황(2013년 7월 기준) -----	5
Table 2. InVEST Habitat Quality 모델에 분석에 이용되는 서식지의 위협 요소 및 입력자료 -----	10
Table 3. InVEST Habitat Quality 모델 분석에 이용되는 서식지 민감도의 입력자료 -----	11
Table 4. InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델에 이용되는 Carbon pool의 입력자료 -----	14
Table 5. InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델의 입력자료 -----	16
Table 6. 서울시의 과거 및 현재의 토지피복 별 면적의 변화 (단위: ha)-----	19
Table 7. 연구대상지역의 과거 및 현재의 토지피복 별 면적의 변화(단위: ha)--	21
Table 8. 연구대상지역의 과거 및 현재의 서식지 질의 변화-----	29
Table 9. 연구대상지역의 과거 및 현재의 탄소 저장량 및 탄소 저장량의 변화와 이 를 바탕으로 ECR과 SCC의 방법으로 도출한 연구 대상 지역의 탄소 경제 적 가치 도출 결과 -----	39

## <그림목차>

Figure 1. 연구지역 7개소 : 백사실 계곡, 봉산, 불암산 삼육대, 관악산, 현인릉, 청계산 원터골 -----	7
Figure 2. InVEST Carbon model Process (Natural Capital Project 2012) ---	13
Figure 3. 2007년 서울시 전체의 서식지 질과 2022년 서울시 전체 서식지의 질 -----	24
Figure 4. 2007년 연구 지역의 서식지 질과 2022년 연구 지역 서식지의 질의 변화 -----	26
Figure 4-1. 2007년 연구 지역의 서식지 질과 2022년 연구 지역 서식지의 질의 변화 -----	27
Figure 4-2. 2007년 연구 지역의 서식지 질과 2022년 연구 지역 서식지의 질의 변화 -----	28
Figure 5. 2007년 서울시 전체 탄소 저장량과 2022년 서울시 전체 탄소 저장량 -----	32
Figure 6. 2007년과 2022년 연구 지역의 탄소 저장량 변화 -----	34
Figure 6-1. 2007년과 2022년 연구 지역의 탄소 저장량 변화 -----	35



# 제 1 장 서 론

---

1.1 연구필요성

1.2 연구목적

---

## 1.1 연구의 필요성

도시화가 진행됨에 따라 도시 내 생태계 서비스와 생물다양성이 점차 줄어들고 있으며(Han et al., 2019; Terrado et al., 2016), 기존의 생물다양성이 풍부했던 지역이 이제는 도시화로부터 위협받고 있다(Kim, 2020). 이러한 움직임 속에서 생태계 서비스는 UN의 2005년 새천년 생태계 가치평가가 발간되면서 과거와 비교하여 중요도가 지속적으로 증가하고 있다(Costranza et al., 2014). 1994년 생물다양성협약 체결 이후 2010년 나고야 의정서가 채택되면서 생태계 서비스를 통해 생산되는 자연 자원이 국가 차원에서 중요한 문제로 대두되고 있다(Park, 2011; Choi and Lee, 2018). 생태계 서비스에 대한 중요성이 높아지고 있지만 이에 대한 정량적 평가는 아직 미흡하다(Kim, 2020).

산업의 발전으로 인해 변화하는 생태계를 관리하기 위해서는 인간에 의해 발생하는 활동을 고려하여 누적되는 위험 영향을 파악하고, 공존하는 여러 생태계를 함께 관리하는 방안 제시를 목적으로 하며, 이를 실천하기 위해서는 우선 생태계 상태를 파악해야 한다(Ansong et al. 2017; Harvey et al. 2018; NOAA 2021). 이에 생물들의 서식지를 중심으로 대상 지역의 생태계 현황을 파악하고 서식지의 가치를 평가하기 위한 연구가 필요하다.

한편 탄소 저장량은 생태계 서비스의 주요한 지표이며 생산력 및 기후조절과 관련된 중요한 인자이다(He et al., 2016). 전세계 육상생태계가 포함하고 있는 탄소의 양은 2,000 Pg-2,500 Pg로 추정되고 있으며, 식생에 500-600 Pg, 토양에 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). 탄소 저장량에 영향을 미치는 주요 인자는 토지피복, 식생, 토양 등이 있지만(Li et al., 2020), 최근의 기후변화, 산림파괴, 도시확장 등의 요인은 토지 이용을 변화시키며, 이는 탄소 저장 기능에 부정적인 영향을 미치고 있다(Lyu et al., 2019). 이 중 토지 피복의 변화는 식생 및 토양이 저장하고 있는 이산화탄소를 대기 중으로 배출시켜 대기 중 온실가스를 증가시키는 중요 요인으로 인식되며 생물다양성, 수문 인자 등을 변화시켜 생태계에 심각한 영향을 주고 있다(Foley et al., 2005).

도시화는 전세계 탄소 저장량 변화의 1/3을 차지하는 중요한 요인이며(Lyu et

al., 2019), 이산화탄소 방출량을 줄이고 관리하기 위해서는 생태계에서의 탄소 순환 기작을 이해하고, 생태계 파괴로 인한 탄소 흡수량 변화를 정량화하는 것이 필요하다(Ito et al., 2008, Ohtsuka et al., 2005). 그러므로 탄소 추정 모델 및 토지 피복 변화를 활용하여 탄소 저장능력을 추정하는 연구는 탄소 흡수를 위한 정책 효과를 판단하기 위해 필요하다. 그러므로 산림, 농경지 등 탄소 흡수량이 많은 토지 유형을 대상으로 탄소 흡수 및 배출에 대한 신뢰성 있는 정량적 분석은 탄소 배출량 및 저장량 관리에 활용될 수 있다(Ceschia et al., 2010).

## 1.2 연구 목적

본 연구는 서울시 생태경관보전지역 중 산림생태계를 대상으로 생태계 서비스의 변화를 정량적으로 도출하고자 한다. 이를 위해 생태계 서비스를 정량적으로 측정할 수 있는 InVEST 모델을 이용하였으며, Habitat Quality 모델을 이용하여 토지 이용 변화에 따른 생태계의 서식지 질을 정량적으로 평가하여, 생물다양성 보전을 위한 토지이용 계획 수립의 기초자료를 제공하고자 한다. 또한 Carbon Storage and Sequestration 모형을 이용하여 토지 이용 변화 분석을 통해 탄소 흡수량의 변화를 도출하고, 산림생태계의 탄소저장량 변화 특성 분석을 바탕으로 탄소 저장량 관리를 위한 탄소 저장고별 · 지역별 차별화된 토지이용정책의 필요성을 제시하고자 한다.

그리고 서울의 도심지역과 생태·경관 보전지역의 Habitat Quality 모델 결과와 Carbon 모델의 탄소고정량 평가 결과를 이용하여 기존의 선행 연구 결과 및 서울 전체 대비 생태·경관 보전지역의 차이를 분석하고, 탄소 고정량과 서식지 질의 상관관계를 도출하여 생태계 보전 활용 가치평가 기준을 마련하고, 연구 대상 지역의 생태계 서비스 변화를 시계열적으로 분석하여 이에 대한 대책을 수립하고자 한다.

## 제 2 장 연구의 내용 및 범위

---

2.1 연구 대상지역

2.2 연구 방법

---

## 2.1 연구 대상지역

본 연구는 서울시 생태경관보전지역 중 산림지역이 가지고 있는 생태계서비스를 평가하고자 서울시 생태경관보전지역 중 면적이 50,000㎡ 이상인 산림생태계 지역인 청계산 원터골, 헌인릉, 불암산 삼육대, 봉산, 인왕산, 관악산, 백사실 계곡 등 7개소의 산림생태계 지역을 선정하였다(Table 1).

Table 1. 서울시 생태경관보전지역 지정 현황(2013년 7월 기준)

구 분	위 치	면적(㎡)	지 정 일	특성(지정사유)
청계산 원터골	원지동 산4-38일대	146,281	'04.10.20	낙엽수림대 발달 (산림생태계)
헌인릉	내곡동 산13-1	56,639	'05.11.24	오리나무군집 발달 (습지생태계)
불암산 삼육대	공릉동 산223-1일대	204,271	'06.07.27	서어나무군집 발달 (산림생태계)
봉산	은평 신사동 산93-16	73,478	'07.12.27	대규모 팔배나무군집 (산림생태계)
인왕산	홍제동 산1-1일대	258,098	'07.12.27	수려한 자연경관 (기암과 소나무 등)
관악산	신림동 산56-2일대	748,174	'09.11.26	회양목군락 자생지 (산림생태계)
백사실계곡	부암동 산115-1일대	132,578	'09.11.26	자연생태 및 경관 우수 (산림생태계)

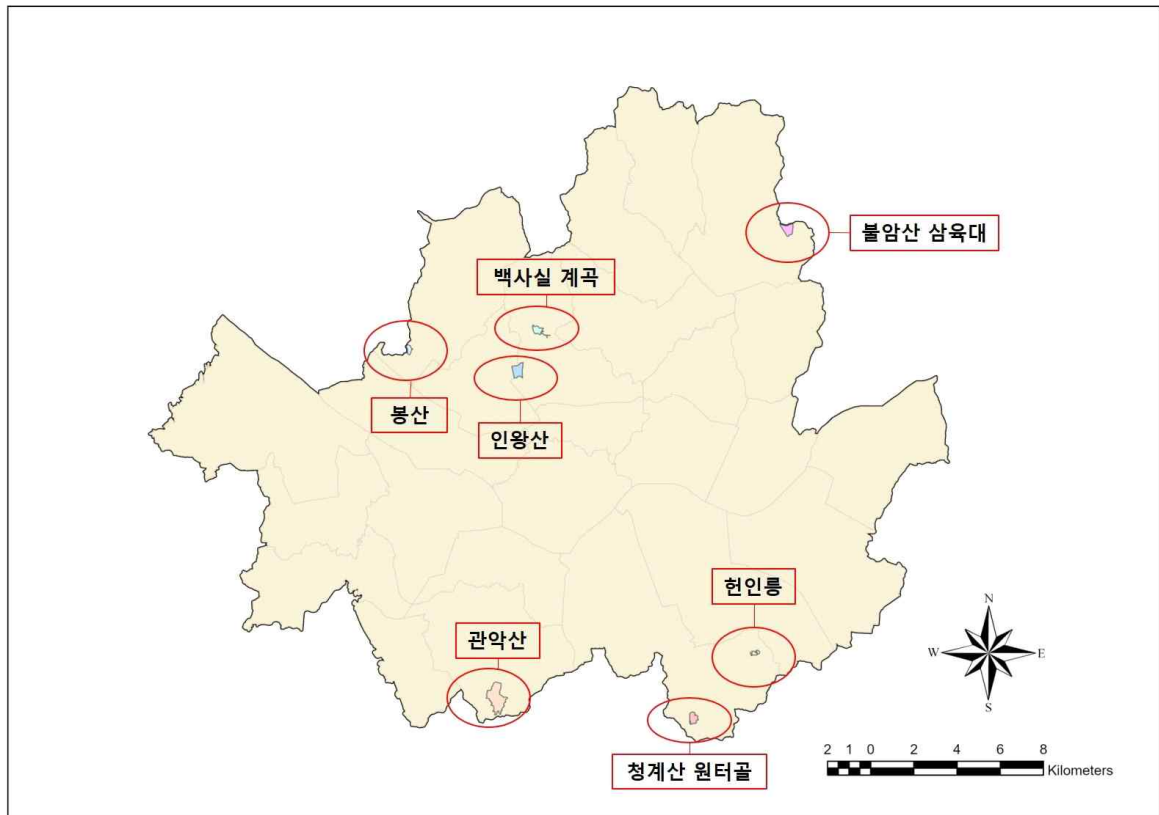


Figure 1. 연구지역 7개소 : 백사실 계곡, 봉산, 불암산 삼육대, 관악산, 현인릉, 청계산 원터굴

## 2.2 연구 방법

본 연구는 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Service and Tradeoff) 모델을 이용하여 서울지역 산림보호구역의 생태계서비스를 평가하였다. InVEST 모델은 National Capital Project로 Stanford Univ., Natural Conservancy와 WWF (World Wildlife Funds)가 공동으로 개발한 모델로 자연자산과 경제적 상관관계를 파악하는데 적용되어 측정한 생태계서비스 평가를 통해 정책 의사결정을 지원하는 목적으로 개발되었다 (Vigerstol and Aukema 2011, Sharp et al. 2014). InVEST 모델은 시·공간적으로 유연한 구조를 가지고 있으며, 지역 단위부터 전 지구적 단위의 분석이 가능하고 특정 시간부터 과거 시간까지 적용이 가능하다. InVEST는 토지피복도를 기반으로 분석을 진행하므로 자료 확보의 용이성이 높으며, 토지 이용 계획과 토지이용도로 도출된 생태계서비스 결과 값으로 개발정책 과정에서 자연과 환경적 가치를 고려할 수 있도록 개발되었다 (Lee et al. 2015, Gao et al. 2017, Yi et al. 2018). 국내에서도 생태계서비스 평가 모델 중 하나로 평가되고 있으며 (Kim et al. 2015, Lee et al. 2015, Kim et al. 2017, Choi and Lee 2020), 국내에 적합한 입력자료를 통해 지속적으로 적용되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 InVEST 모델 중 Habitat Quality model과 Carbon Storage and Sequestration model을 이용하여 토지이용변화에 따른 생태계 서비스의 정량화를 분석하고자 한다.



### 2.2.1 InVEST Habitat Quality model

InVEST 모델 중 Habitat Quality 모델은 생태계서비스의 지지서비스를 평가하는 도구로써 토지이용변화에 따른 서식처의 가치를 평가할 수 있는 유용한 도구라고 할 수 있다(Xu et al., 2019). InVEST의 Habitat Quality 모델은 토지피복 정보를 기반으로 서식지 질을 평가하고 각종 환경정책에 따른 서식지 변화를 예측하는데 사용되고 있다. 서식지 질의 평가는 임의 시점에 대상지 간의 서식지 질의 정량적 평가가 가능하고 통시적으로는 서식지 질의 시간적 변화를 시나리오로 설정하여 결과에 따라 정책 결정에 사용할 수 있다.

InVEST 모델의 Habitat Quality 모델은 생물다양성 정도를 나타내주는 지표로 서식처 질이 높을수록 생물다양성이 많음을 의미하며, 이 모델에서는 각 서식지 유형과 생물다양성에 대한 위협 요인을 합하여 시간에 따른 상대적인 서식처 질 및 퇴화 정도의 결과를 얻는다. 이러한 접근 방식은 어떤 지역을 개발 혹은 보전에 관한 정책 수립을 할 때 빠른 시간 내 참고할 만한 정보를 제공하며, 토지피복 변화에 따른 미래의 서식지 질 분석도 가능하다.

Habitat Quality 모델은 생물다양성과 관련된 육상 서식지의 질을 평가하며, 토지이용에 따라 서식지에 미치는 영향을 정성적인 값으로 나타낸다. 평가 결과는 0-1 사이값으로 나타나며, 1에 가까울수록 서식지 질이 우수한 것을 의미한다. 서식지 질은 서식지에 미치는 위협요인과 그 위협요인의 영향정도를 나타내는 요인들은 도출하여 분석한다.

본 연구에서는 InVEST 모델 중 Habitat Quality 모델 (InVEST ver 3.13.0)을 사용하여 서식지 질을 평가하였다. 입력자료인 토지피복도는 환경공간정보서비스에서 제작된 공간자료를 사용하였으며 (www.egis.go.kr), 과거의 토지피복자료는 2007년 1:25,000 축적인 중분류 해상도 5m 자료를 이용하였고, 현재자료는 가장 최근에 구축된 2022년 1:25,000 축적의 중분류 해상도 5m 자료를 이용하였다. 이 모든 자료는 Arc GIS Pro 3.1 ver.을 이용하여 구축하였다.

Habitat Quality 모델 분석에 필요한 각종 입력값은 문헌 및 기존의 선행 연구의 결과를 바탕으로 수행하며, 입력자료의 변수들로는 선정된 위협 요소의 상대적 위협 정도, 위협 요소에 대한 최대 영향 거리, 각 요소들의 서식 적합성 지수, 선정된 위협 요인의 서식지들의 민감 정도가 사용된다.

모델의 분석에 필요한 위협 요소는 토지피복 중분류를 이용하여 도시지역, 주거 지역, 농경지, 도로, 산업 지역으로 구분하였다(Table 2). 도시지역은 상업지역, 문화·체육·휴양지역, 공공지역, 주거지역은 주거지역, 농경지는 논, 밭, 시설재배지, 과수원, 기타재배지, 도로는 교통 지역, 공업 지역은 공업지역으로 구분하였다. 위협 요소는 최대영향거리와 가중치로 값을 설정할 수 있으며, 최대영향거리는 위협 요소가 영향을 미치는 최대 거리의 범위를 말하며 가중치는 위협 요인이 미치는 상대적 강도로 0-1까지의 가중치로 설정할 수 있다(Kim, 2020).

Table 2. InVEST Habitat Quality 모델 분석에 이용되는 서식지의 위협 요소 및 입력자료

위협요소	최대영향거리	가중치	Decay
도시지역	7.1	1	exponential
주거지역	5.9	0.88	exponential
농경지	3.4	0.68	linear
도로	3.5	0.86	linear
공업지역	8	1	exponential

민감도 자료는 위협에 따른 서식지의 민감도를 나타낸 자료를 말하며, 수치가 높을수록 해당 지역이 민감하다는 것을 나타낸다(Table 5). 민감도에 들어가는 서식지 적합성(Habitat Suitability)은 토지 피복도에서 서식지의 적합성을 나타낸다. 서식지 적합성은 0-1의 범위를 가지며, 값이 높을수록 서식지의 값이 높은 것을 의미한다. 민감성은 토지 피복도에서 위협요소의 민감도를 의미하며, 값이 높을수록 민감도가 높아 위협 요소에 의한 변화가 높은 것을 나타낸다(Sharp et al., 2018).

Habitat Quality 모델의 분석에 필요한 위협 요소 및 민감도 계수는 국내 보호 실정을 반영한 선행연구의 민감도 및 서식지 질 계수를 이용하여 분석을 진행하였다. 특히 본 연구는 산림 생태계 서비스의 가치평가에 중점을 두고 있으므로 기존 국내 연구에서 진행된 침엽수와 활엽수의 계수를 달리하여 서식처의 가치평가를 하였으며, 이를 통해 도출된 서식지 질은 0과 1 사이의 값으로 나타내며, 1에 가까울수록 자연성이 높은 것으로 평가한다.

Table 3. InVEST Habitat Quality 모델 분석에 이용되는 서식지 민감도의 입력자료

토지피복분류	서식지 적합성	도시지역	주거지역	농경지	도로	공업지역
주거지역	0	0	0	0	0	0
공업지역	0	0	0	0	0	0
상업지역	0	0	0	0	0	0
문화·체육·휴양지 역	0	0	0	0	0	0
교통지역	0	0	0	0	0	0
공공시설지역	0	0	0	0	0	0
논	0.25	0.69	0.59	0.03	0.59	0.75
밭	0.35	0.69	0.59	0.03	0.59	0.75
시설재배지	0.25	0.69	0.59	0.03	0.59	0.75
과수원	0.35	0.69	0.59	0.03	0.59	0.75
기타재배지	0.4	0.69	0.59	0.03	0.59	0.75
활엽수림	0.86	0.8	0.7	0.65	0.7	0.85
침엽수림	0.91	0.85	0.75	0.7	0.75	0.9
혼효림	0.86	0.8	0.7	0.65	0.7	0.85
자연초지	0.7	0.65	0.55	0.57	0.6	0.7
인공초지	0.6	0.8	0.7	0.72	0.75	0.85
내륙습지	0.7	0.7	0.72	0.75	0.55	0.68
연안습지	0	0	0	0	0	0
자연나지	0.08	0.05	0.08	0.15	0.05	0.03
인공나지	0.08	0.05	0.08	0.15	0.05	0.03
내륙수	0.7	0.73	0.7	0.65	0.55	0.75
해양수	0	0	0	0	0	0

### 2.2.2 InVEST Carbon Storage and Sequestration model

탄소 저장량 분석을 위한 모델로는 InVEST 모델이 대표적이다. 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 및 계획의 영향을 직접적·효과적으로 평가할 수 있다는 장점으로 인해 탄소 저장량 분석 및 추정 관련 연구에 사용되고 있다(Li et al., 2020).

InVEST모형은 VISIT, CBMCFS3, InVEST, Forest Growth 모형과 같은 다른 탄소 측정 모델들과 비교하였을 때, 오차율이 적고, 국내에서 적용 가능성이 높은 모델이다(Choi et al. 2014). 이러한 InVEST Storage and Sequestration 모형은 토지피복도와 토지피복 별 탄소 저장량을 산정하여 구축한 carbon pool table을 바탕으로 탄소 저장값을 추정한다.

본 연구에서는 InVEST 모형 중 Carbon모형 (InVEST ver 3.13.0)을 사용하였다. 입력자료인 토지피복도는 환경공간정보서비스에서 제작된 공간자료를 사용하였으며(www.egis.go.kr), 과거의 토지피복자료는 2007년 1:25,000 축적인 중분류 해상도 5m 자료를 이용하였고, 현재자료는 가장 최근에 구축된 2022년 1:25,000 축적인 중분류 해상도 5m 자료를 이용하였다. 이 모든 자료는 Arc GIS Pro 3.1 ver.을 이용하여 구축하였다.

Carbon pool table은 Above ground mass, Below ground mass, Soil carbon, Dead wood로 구성되며, 토지피복에 따른 Carbon pool을 구축하여 연구지역의 토지피복 별 탄소의 저장량을 raster 픽셀로 추정한다. InVEST Carbon Storage and Sequestration 모형의 입력자료인 Carbon pool 계수는 선행연구를 바탕으로 구성하였다(Kim et al., 2016; Chung et al., 2015; Tomasso and Leighton, 2014). 특히, Aboveground mass, Below ground mass의 탄소저장 값은 국내 임상별 단위면적당 임목 축적량에 탄소저장계수를 곱하여 산출하였으며, 국내 상황을 가장 잘 반영하고 있는 선행연구에서 제시한 값을 사용하였다(Lee et al. 2016, Table 4).

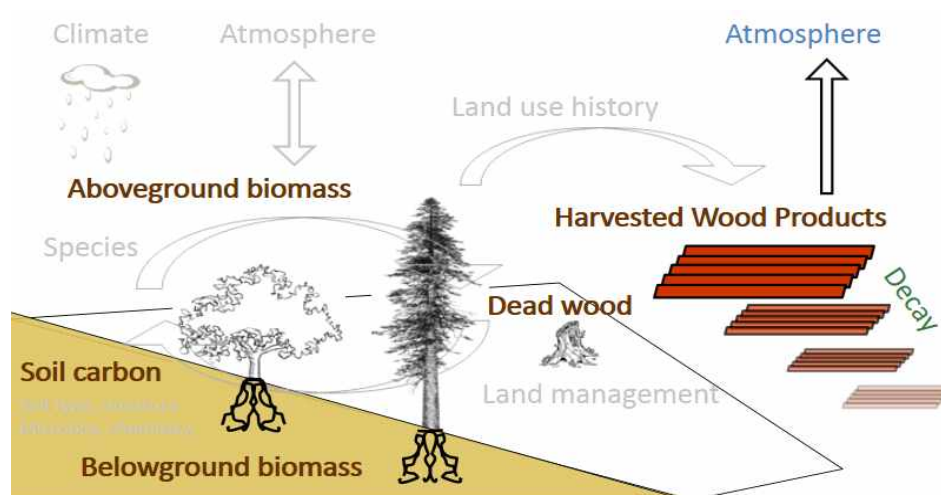


Figure 2. InVEST Carbon model Process (Natural Capital Project 2012)

Table 4. InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델에 이용되는 Carbon pool의 입력자료 (단위: Mg of C/ ha)

대분류	중분류	Above ground biomass	Below ground biomass	Soil carbon	Dead Wood
시가화·건조지 역	주거지역	0	0	0	0
	공업지역	0	0	0	0
	상업지역	0	0	0	0
	문화·체육·휴양지 역	0	0	0	0
	교통지역	0	0	0	0
	공공시설지역	0	0	0	0
농업지역	논	0	0	69.9	0
	밭	0	0	62.2	0
	시설재배지	0	0	45.9	0
	과수원	0	0	51	13
	기타재배지	0	0	45.9	0
산림지역	활엽수림	64.31	23.15	55.68	10.31
	침엽수림	42.87	11.57	38.75	13.45
	혼효림	53.59	17.36	47.22	11.79
초지	자연초지	4.17	16.69	88.2	0
	인공초지	1.15	4.58	11.5	0
습지	내륙습지	35.24	9.18	88	0
	연안습지	1.3	1.3	240	0.7
나지	자연나지	0	0.33	0.33	0
	인공나지	0	0.33	0.33	0
수역	내륙수	0	0	0	0
	해양수	0	0	0	0

InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델은 탄소저장량의 변화를 통해 탄소 저장량의 경제적 가치 환산이 가능하다. 시간의 흐름에 따른 토지이용도의 변화를 정량적으로 산출하여 적용 대상 국가의 탄소 할인을 및 탄소의 값을 적용하여 탄소저장 변화량에 따른 시장가치 또는 사회적 비용에 대해 경제적 환산이 가능하다. 저장된 탄소의 가치는 대기에 탄소를 방출하지 않음으로써 피할 수 있는 사회적 피해의 가치와 같다는 가정으로 구동되는 모델이다. 본 연구에서는 탄소 할인율인 5.6%를 적용하였고, 토지이용도는 전국을 대상으로 구축된 2007년, 2022년 중분류 토지이용도를 사용하였으며, 탄소 가격은 두가지 의미로 나누어 선정하여 경제적 가치 환산을 구동하였다. 탄소 가격은 시간에 따른 가격 변동이 크고, 불확실성을 고려하여 두 가지 가격을 선정하였다. 먼저 실효 탄소 가격(ECRs: Effective Carbon Rates)은 배출권 거래제에서 사용되는 가격이다. ECRs 가격은 기후와 경제의 불확실성을 근거로 추정되며, 정확한 값을 도출하기 어렵기 때문에 OECD 보고서에서 총 41개국 대상으로 분석한 평균 평균값인 14.4 Euro로 보고된 가격을 적용하였다 (OECD 2016). 그리고 탄소의 사회적 비용(SSC: Social Cost of Carbon)은 기후변화에 의한 생산성, 경제성장률, 생태계 등에 미치는 영향과 피해를 고려하여, 현재 기후변화가 생산성과 경제 성장률에 미치는 영향을 고려한 탄소의 사회적 비용을 말하며, 2017년 KIEP 보고서에서 약 \$204(US)로 유추하고 있음에 따라 이 값을 적용하였다. Carbon 모델로 도출된 탄소저장 변화량에서 경제적가치 환산하기 위해 ECRs 값과 SCC 평균값을 모델 단위인 US달러로 적용하여 경제적 가치를 도출하였다(Choi et al., 2021, Table 5).

Table 5. InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델의 입력자료

Input data	Raw data	Reference
토지피복도	2007년, 2022년 (1:25000)	환경공간정보서비스 (www.egis.go.kr) Kim et al., 2016
Carbon pool table	선행연구	Chung et al., 2015 Tomasso and Leighton, 2014
Price of carbon	Effective Carbon Rate (ECRs)	OECD 2016 KIEP 2017 KEITI2018
	Social Cost of Carbon (SCC)	
Market discount in Price of Carbon	Number (5.6)	Moon et al., 2017 Ministry of Environment 2014 Lee and Kim 2015



## 제 3 장 연구 결과

- 
- 3.1 연구지역의 토지피복 변화
  - 3.2 연구지역의 서식지 질 평가
  - 3.3 연구지역의 탄소 저장량 변화
  - 3.4 연구지역의 탄소 저장량에 대한 경제적 가치 환산
-

### 3.1 연구지역의 토지피복 변화

2007년과 2022년 중분류 토지피복도를 이용하여 서울시 전체 및 연구지역 7개소에 대한 2007년과 2022년 중분류 토지피복도를 이용하여 토지피복의 변화를 분석하였다.

서울시 전체의 토지피복을 분석한 결과 시가화·건조지역, 농업지역, 습지, 수역은 토지피복의 면적이 감소하였으며, 산림지역, 초지, 나지의 토지피복은 증가한 것을 확인할 수 있었다(Table 6). 특히 시가화·건조지역 중 공공시설지역(-4.55%), 산림지역 중 혼효림(-4.75%)이 큰 폭으로 감소하였다. 또한 논(-1.00%)과 밭(-1.05%)도 서울시 전체 면적대비 1%가량 감소하였다. 2007년 대비 2022년 감소 면적 비율은 공업 지역의 경우 -72.79%, 공공시설지역은 -56.91% 감소하였으며, 2007년 논과 밭의 면적 대비 2022년 논과 밭의 면적 감소율을 분석한 결과 논은 -70.06%, 밭은 -62.91%, 시설재배지는 -69.11%가 감소한 것을 확인할 수 있었다. 반면 초지 중 인공 초지는 5.49%, 산림지역의 활엽수림은 5.45%, 나지 중 자연 나지는 1.19% 증가하였다.

Table 6. 서울시의 과거 및 현재의 토지피복 별 면적의 변화 (단위: ha)

대분류	중분류	2007	2022	변화
시가화·건조지역	주거지역	17695.08	17097.55	-597.53
	공업지역	461.10	125.45	-335.65
	상업지역	5210.00	5485.79	275.80
	문화·체육·휴양지역	564.56	640.22	75.67
	교통지역	7326.20	7315.89	-10.31
	공공시설지역	4842.73	2086.74	-2755.99
농업지역	논	868.25	260.00	-608.26
	밭	1447.15	536.73	-910.43
	시설재배지	339.25	104.81	-234.44
	과수원	50.22	41.90	-8.31
	기타재배지	14.31	116.31	102.01
산림지역	활엽수림	6759.63	10063.18	3303.54
	침엽수림	2344.20	2606.97	262.77
	혼효림	4860.39	1983.36	-2877.03
초지	자연초지	65.96	369.56	303.60
	인공초지	2589.87	5912.71	3322.84
습지	내륙습지	220.27	207.70	-12.57
	연안습지	-	-	-
나지	자연나지	0.27	724.05	723.78
	인공나지	1607.12	1676.04	68.92
수역	내륙수	3302.83	3214.43	-88.40
	해양수	-	-	-
Total		60,569.37	60,569.37	

백사실 계곡의 2007년 대비 2022년의 토지피복의 변화는 주거지역 및 활엽수림의 면적이 감소하였으며, 특히 활엽수림의 경우 감소 면적이 -5.80ha로 면적의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 밭(0.41ha)과 침엽수림(0.60ha), 혼효림(4.90ha)의 면적은 증가한 것을 알 수 있었다. 또한 봉산의 토지피복은 2007년 대비 2022년의 토지피복은 주거지역(-0.25ha) 및 활엽수림(-0.34ha)의 면적이 감소하고 침엽수림의 면적(0.59ha)이 증가하였다. 불암산 삼육대의 토지피복의 경우 2007년 대비 2022년 토지피복은 공공시설지역 및 혼효림의 면적이 감소하였으며, 혼효림의 경우 -10.84ha의 큰 면적이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 반면 활엽수림, 침엽수림, 내륙수의 면적은 증가하였으며, 활엽수림의 경우 10.01ha의 면적이 증가한 것을 알 수 있었다. 관악산의 2007년 대비 2022년의 토지피복의 변화는 혼효림 및 인공나지의 면적은 감소하였으며, 특히 혼효림의 경우 -36.08ha가 감소하였으며, 이는 관악산 생태경관보전지역의 47.95%를 차지하는 면적으로 많은 면적이 감소한 것을 알 수 있었다. 그러나 활엽수림, 침엽수림, 자연 나지의 면적은 증가하였으며, 특히 활엽수림의 경우 14.34ha, 침엽수림의 경우 18.41ha가 증가하였다. 현인릉의 2007년 대비 2022년의 토지피복의 변화는 공공시설지역 및 혼효림의 면적이 -0.12ha, -1.87ha 감소하였으나 상업지역(0.03ha), 교통지역(0.06ha), 활엽수림(1.21ha), 인공초지(0.28ha), 인공나지(0.36ha)의 면적은 증가하였다. 또한 인왕산의 2007년 대비 2022년의 토지피복의 변화는 혼효림 및 인공나지의 면적이 각각 -16.70ha, -6.10ha로 크게 감소하였으나 자연나지 및 침엽수림, 활엽수림의 면적이 11.21ha, 8.82ha, 2.78ha로 각각 증가하였다. 청계산 원터골의 2007년 대비 2022년의 토지피복의 변화는 활엽수림이 감소한(2.11ha)만큼 혼효림이 증가한 것을 확인할 수 있었다(Table 7).

Table 7. 연구대상지역의 과거 및 현재의 토지피복 별 면적의 변화(단위: ha)

대분류	중분류	백사실			봉산			불암산 삼육대			관악산			현인릉			인왕산			청계산 원터골		
		2007	2022	변화	2007	2022	변화	2007	2022	변화	2007	2022	변화	2007	2022	변화	2007	2022	변화	2007	2022	변화
시가화· 건조지 역	주거지역	0.16	0.04	-0.12	0.25	-	-0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	공업지역	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	상업지역	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	-	-	-	-	-	-
	문화·체육·휴양 지역	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	교통지역	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-
	공공시설 지역	-	-	-	-	-	-	0.08	-	-0.08	-	-	-	0.12	-	-0.12	-	-	-	-	-	-
농업지 역	논	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	밭	-	0.41	0.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	시설재배 지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.06	0.04	-	-	-	-	-	-
	과수원	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	기타재배 지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
산림지 역	활엽수림	1259	679	-580	7.16	682	-0.34	-	10.01	10.01	15.19	29.53	14.34	3.68	4.89	1.21	-	2.78	2.78	15.63	13.53	-2.11
	침엽수림	-	0.60	0.60	-	0.59	0.59	-	0.84	0.84	18.80	37.21	18.41	-	-	-	-	8.82	8.82	-	-	-
	혼효림	0.40	5.30	4.90	-	-	-	20.09	9.25	-10.84	40.28	4.20	-36.08	1.87	-	-1.87	19.43	2.73	-16.7	0.85	2.95	-

초지	자연초지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	인공초지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28	0.28	-	-	-	-	-	-			
습지	내륙습지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	연안습지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
나지	자연나지	-	-	-	-	-	-	-	4.31	4.31				11.21	11.21	-	-	-	-			
	인공나지	-	-	-	-	-	-	-	0.98	-0.98	0.36	0.36	6.10		-6.10	-	-	-	-			
수역	내륙수	-	-	-	-	-	0.51	0.58	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	해양수	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
총합		13.14	13.14	-	7.41	7.41	-	20.68	20.68	-	75.24	75.24	-	5.68	5.68	-	25.54	25.54	-	16.48	16.48	-

### 3.2 연구지역의 서식지 질 변화

2007년과 2022년 중분류 토지피복도를 이용하여 서울시 전체 및 연구지역 7개소에 대한 토지피복의 변화에 따른 서식지 질의 변화를 분석하였다. 2007년 서울시 전체 서식지 질은 0-0.688의 범위로 나타났으며, 2022년은 최소 0-0.665로 2007년에 비해 서식지 질의 범위는 다소 감소한 것을 확인할 수 있었다(Figure 3). 그러나 평균값의 변화를 분석한 결과 2007년 서울의 서식지 질 평균은 0.091, 2022년 서울의 서식지 질 평균은 0.106으로 다소 개선되었음을 알 수 있었다.

2007년 대비 2022년 서울 전체의 서식지 질이 높은 곳은 서울의 북쪽과 남쪽이 높은 것으로 나타났으며, 북쪽의 서식지 질이 높은 곳은 북한산 국립공원과 수락산과 이어지는 경계 부근이며, 남쪽의 서식지 질이 높은 곳은 관악산과 청계산으로 이어지는 경계 부근으로 나타났다. 내부의 서식지 질이 높은 곳은 밤섬 부근의 한강공원과 잠실 한강공원, 용산가족공원 및 남산공원으로 나타났다. 반면 안산과 인왕산, 밤섬-노들섬의 구간은 2007년 대비 2022년 서울 전체의 서식지 질이 낮아진 것을 확인할 수 있었다.

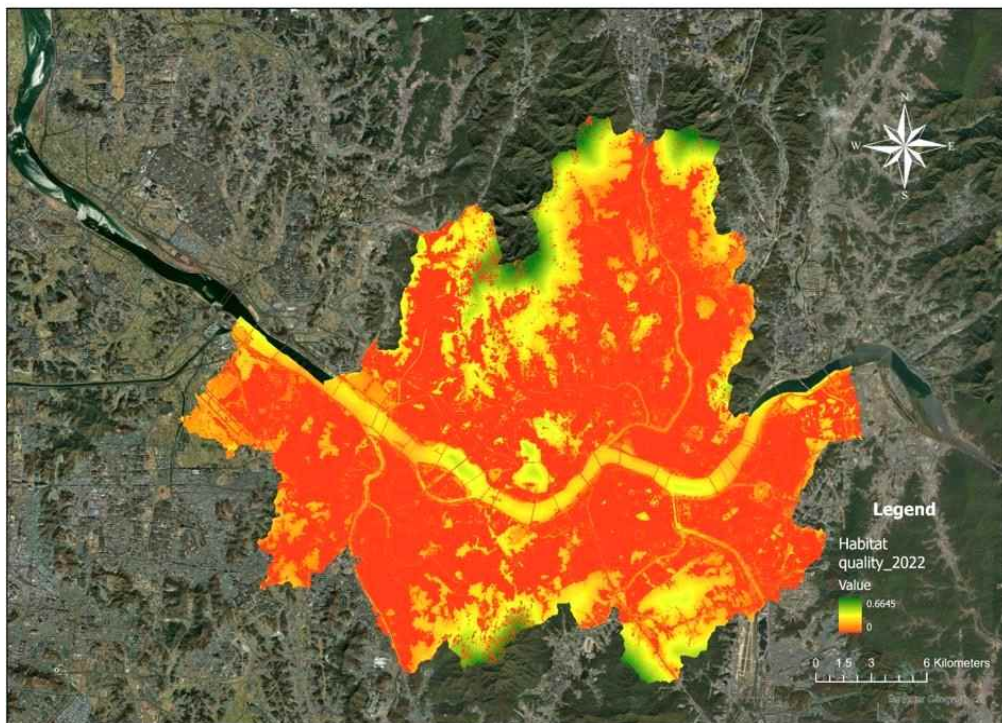
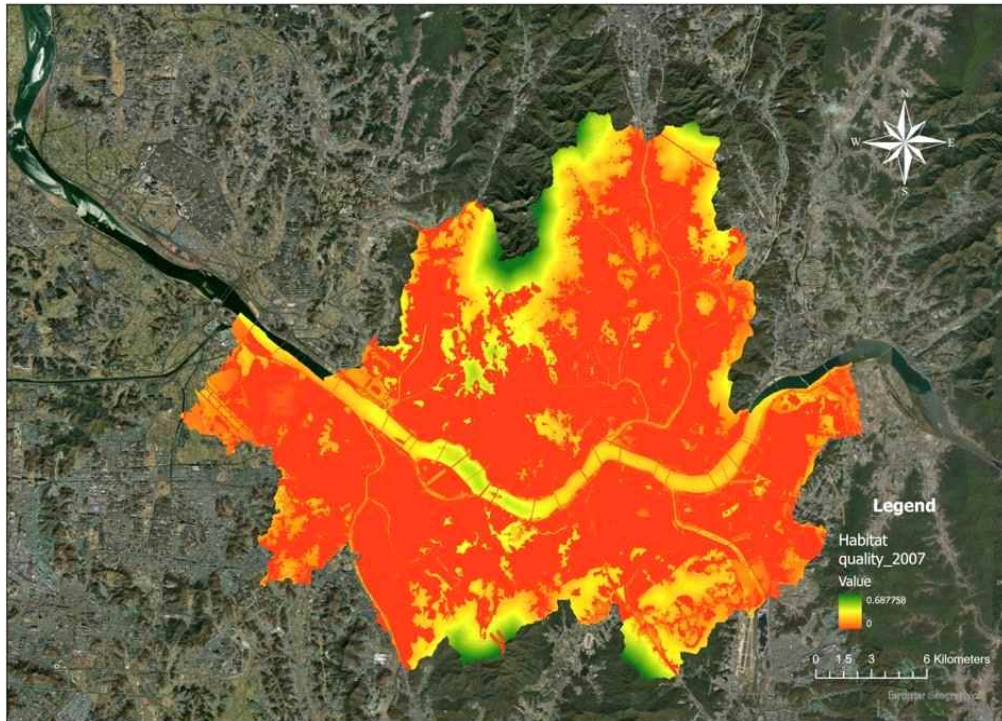


Figure 3. 2007년 서울시 전체의 서식지 질(위)과 2022년 서울시 전체 서식지의 질(아래) : 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 서식지의 질이 높은 것을 나타냄



서울시 산림보호구역의 2007년, 2022년 서식지 질을 분석한 결과 서울시의 평균보다 높은 서식지 질을 나타내는 것을 알 수 있었다(Table 5). 2007년 서식지 질의 범위가 큰 곳은 관악산으로 나타났으며, 서식지 질의 평균이 높은 곳은 청계산 원터골로 나타났다. 2022년 서식지 질의 범위가 큰 곳은 관악산으로 나타났으며, 서식지 질의 평균이 높은 곳은 청계산 원터골과 관악산으로 나타났다.

서울시 산림보호구역의 서식지 질은 2007년 대비 2022년 낮아진 것을 알 수 있었다. 백사실계곡의 2007년 서식지 질의 범위는 0-0.321, 평균은 0.293, 2022년 서식지 질의 범위는 0-0.315, 평균은 0.281로 서식지 질의 질이 낮아졌으며, 봉산의 2007년 서식지 질의 범위는 0-0.308, 평균은 0.279이고 2022년 서식지 질의 범위는 0.260-0.296, 평균은 0.278로 서식지 질의 범위가 작아지면서 서식지 질 역시 낮아지고 있음을 알 수 있었다. 불암산 삼육대 역시 2007년 서식지 질의 범위는 0-0.308, 2022년 서식지 질의 범위는 0.177-0.283으로 서식지 질의 최소값은 증가하였지만, 서식지 최대값은 감소하여 서식지 질의 범위가 작아졌으며, 서식지 질의 평균 역시 0.296에서 0.273으로 낮아진 것을 알 수 있었다(Figure 4).

인왕산의 서식지 질의 범위는 2007년 서식지 질의 범위는 0.080-0.381, 평균은 0.288이며, 2022년 서식지 질의 범위는 0.079-0.316, 평균은 0.199로 서식지의 질의 범위가 감소하였고, 청계산 원터골의 서식지 질의 범위는 2007년 0.370-0.477, 평균은 0.416, 2022년 서식지 질의 범위는 0.033-0.436, 평균은 0.378로 과거에 비해 현재의 서식지의 범위가 감소한 것을 확인할 수 있었다(Figure 4-1).

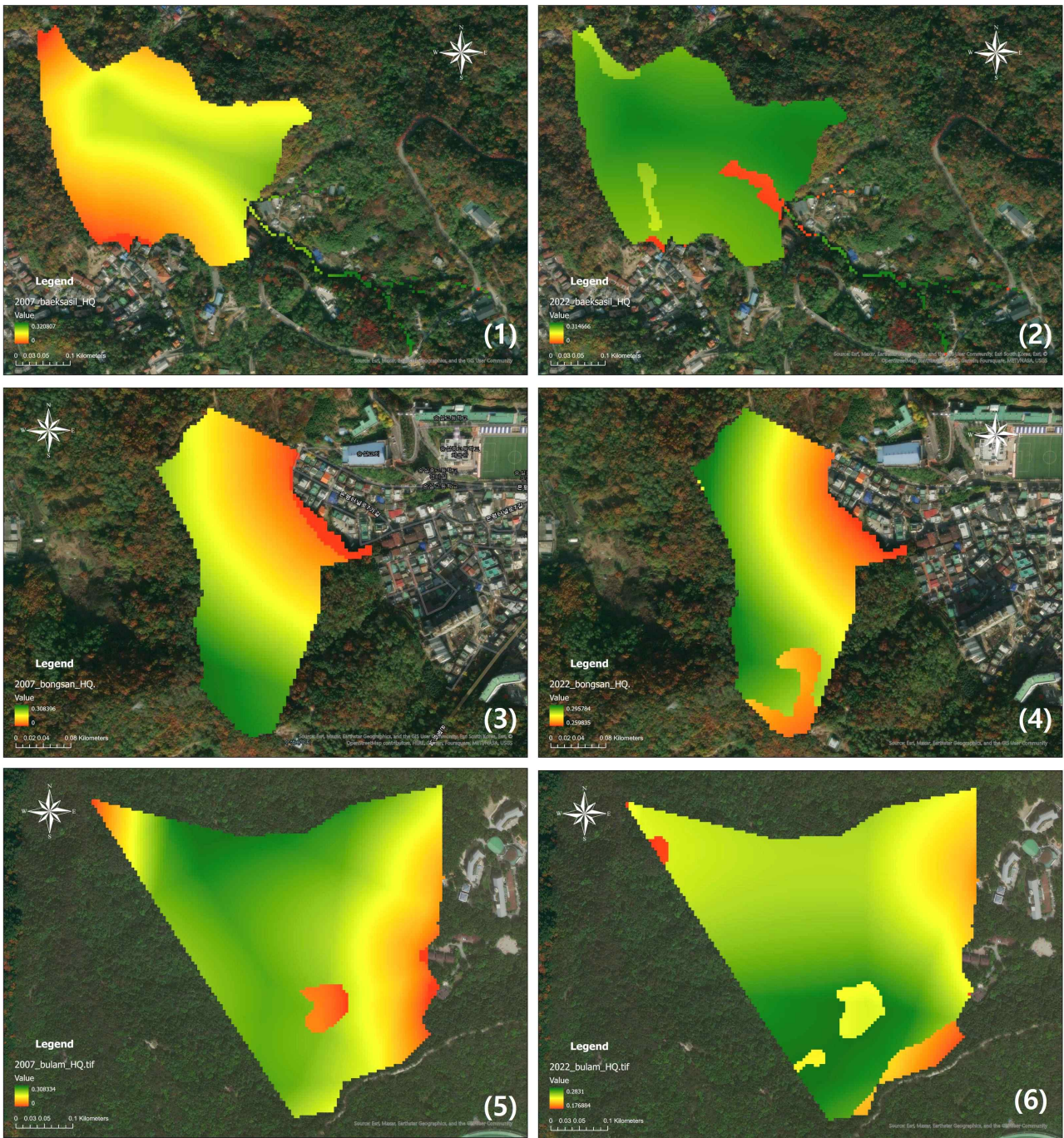


Figure 4. 2007년 연구 지역의 서식지 질(오른쪽)과 2022년 연구 지역 서식지의 질(왼쪽)의 변화. 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 서식지의 질이 높은 것을 나타냄: (1),(2): 백사실계곡, (3),(4): 봉산, (5),(6): 불암산 삼육대



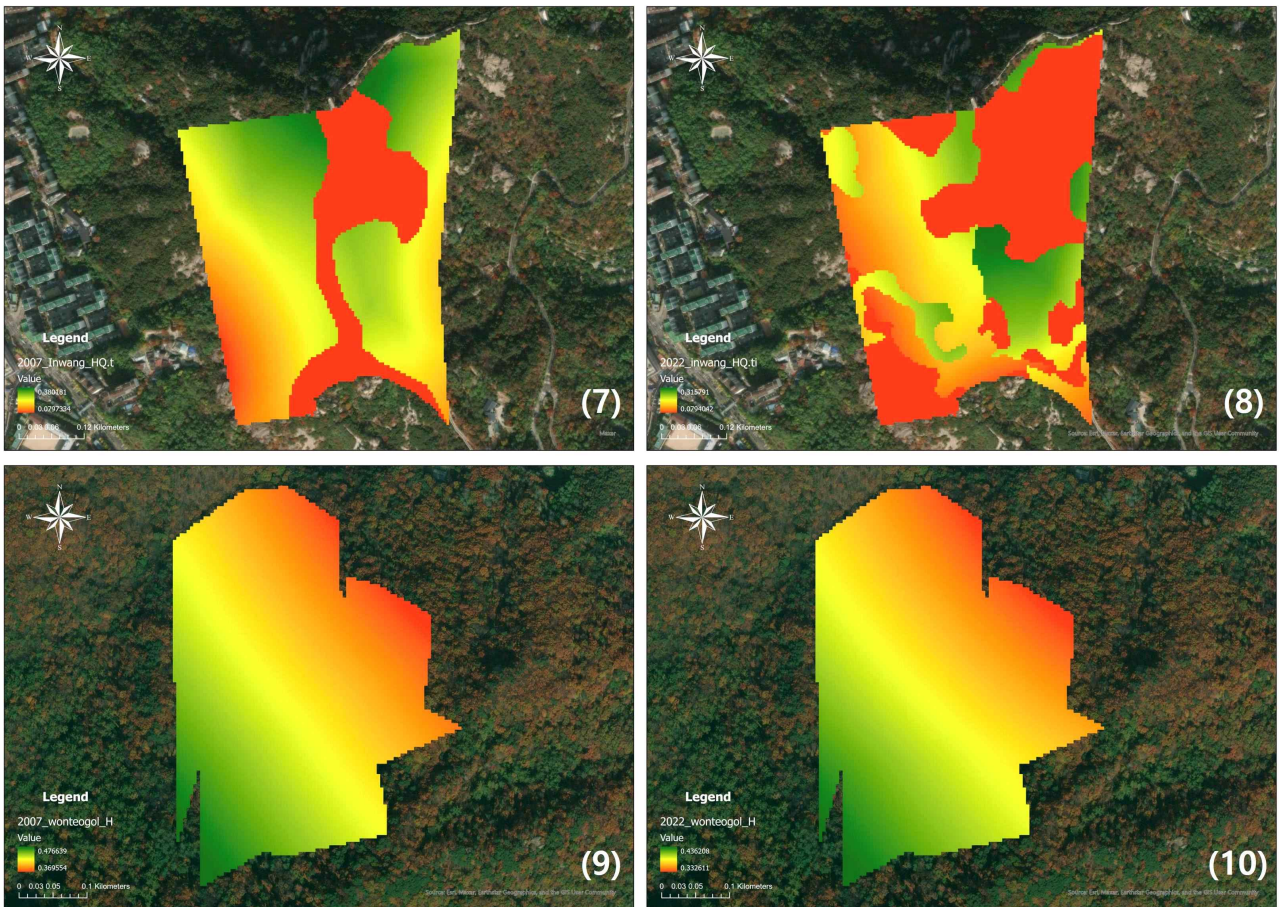


Figure 4-1. 2007년 연구 지역의 서식지 질(오른쪽)과 2022년 연구 지역 서식지의 질(왼쪽)의 변화. 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 서식지의 질이 높은 것을 나타냄: (7),(8): 인왕산, (9),(10): 청계산 원터굴

한편 관악산의 2007년 서식지의 질의 범위는 0.800-0.524, 2022년 서식지의 질의 범위는 0.080-0.525로 서식지 질이 다소 증가한 것을 알 수 있었으며, 현인릉의 2007년 서식지 질의 범위는 0-0.189, 2022년 서식지 질의 범위는 0-0.273으로 서식지 질이 증가한 것을 확인할 수 있었다(Figure 4-2).

관악산과 현인릉의 경우 2007년 대비 2022년 서식지의 질이 증가하였고, 나머지 지역의 경우 2007년 대비 2022년 서식지의 질이 낮아졌으며, 특히 인왕산의 경우 2007년 대비 2022년 서식지의 질이 가장 많이 낮아진 지역임을 알 수 있었다.

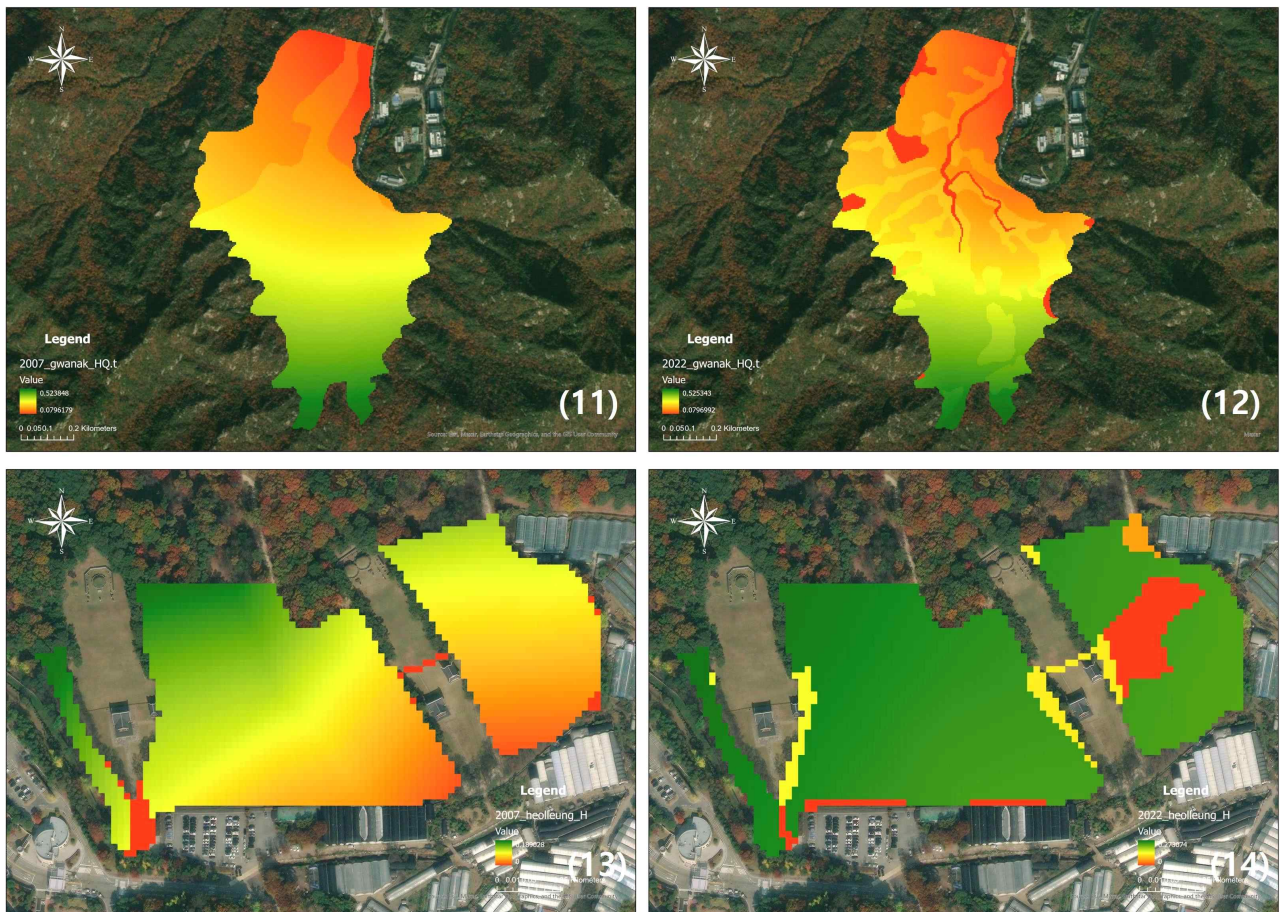


Figure 4-2. 2007년 연구 지역의 서식지 질(오른쪽)과 2022년 연구 지역 서식지의 질(왼쪽)의 변화. 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 서식지의 질이 높은 것을 나타냄 :(11),(12): 관악산, (13),(14): 현인릉

Table 8. 연구대상지역의 과거 및 현재의 서식지 질의 변화

	2007년			2022년		
	최소	최대	평균	최소	최대	평균
<b>서울시 전체</b>	0.000	0.688	<b>0.091</b>	0.000	0.665	<b>0.106</b>
백사실계곡	0.000	0.321	0.293	0.000	0.315	0.281
봉산	0.000	0.308	0.279	0.260	0.296	0.278
불암산 삼육대	0.000	0.308	0.296	0.177	0.283	0.273
<b>관악산</b>	0.080	0.524	<b>0.373</b>	0.080	0.525	<b>0.378</b>
<b>현인릉</b>	0.000	0.189	<b>0.170</b>	0.000	0.273	<b>0.230</b>
인왕산	0.080	0.381	0.288	0.079	0.316	0.199
청계산 원터골	0.370	0.477	0.416	0.033	0.436	0.378

본 연구의 결과를 대도시의 연구 결과와 비교한 결과 2018년 광주광역시 전체 서식지 질은 0-0.879, 평균값은 0.494(Kim, 2020), 부산 연안 육역을 대상으로 평가한 서식지 질의 평균값은 0.415(Jung and Sung, 2022)로 서울시 서식지 질의 범위는 이들 지역에 비해 매우 낮은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 광주광역시의 경우 무등산 국립공원을 포함하고 있기 때문에 다른 지역에 비해 다소 높은 값을 나타내고 있는 것으로 판단되며, 부산의 경우 연안 주변을 평가하였으므로 부산 전체에 비해 다소 높을 것으로 생각된다.

한편 서울시의 고립된 녹지 패치를 대상으로 분석한 결과, 서울시 내 녹지 패치 서식지 질의 범위는 0.12-0.74, 평균은 0.37로 나타났으며(Kim, 2018), 이는 서울시 산림보호구역 중 일부 지역의 서식지 질의 평균과 비슷한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 다른 선행연구에서도 도시 외곽의 산림, 한강과 같은 자연환경에서 높은 서식지 질을 확인할 수 있었으며, 이는 본 연구의 연구 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다.

본 연구 결과를 통해 서울시 산림생태계 보호 지역과 같은 보호 지역 내에서도 서식지의 질이 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 시간의 흐름에 따라 보호 지역의 서식지의 질이 변화하고 있으며, 이는 주변부의 복합적인 토지이용의 변화가 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다(Kim, 2018). 그러므로 추후 토지이용의 변화가 산림생태계 보전지역에 영향을 미치는 구간과 같은 후속 연구들이 진행된다면 보다 효과적으로 산림생태계를 보호할 뿐만 아니라 서울시 생태계 서비스를 더욱더 증진시킬 수 있을 것으로 생각된다.



### 3.2 연구지역의 탄소 저장량 변화

2007년과 2022년 중분류 토지피복도를 이용하여 서울시 전체 및 연구지역 7개소에 대한 토지피복의 변화에 따른 탄소 저장 능력의 변화를 분석하였다.

서울시 전체를 대상으로 분석한 결과 2007년 서울시의 총 탄소 저장 능력은 2169882.28 Mg C 이고, 2022년 서울시의 총 탄소 저장 능력은 2313804.99 Mg C로 2007년에 비해 2022년의 서울시 탄소 저장 능력이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 2007년과 2022년 모두 탄소 저장 능력이 높은 곳은 서울의 북쪽과 남쪽이 높은 것으로 나타났으며, 북쪽의 탄소 저장량이 높은 곳은 북한산 국립공원과 수락산과 이어지는 경계 부근이고, 남쪽은 관악산과 청계산으로 이어지는 경계 부근, 서쪽의 망우산, 아차산 부근으로 나타났다. 그리고 내부의 탄소 저장량이 높은 곳은 남산공원, 봉제산, 국립현충원 등 산림과 초지의 비율이 높은 곳이 탄소의 저장량이 높은 것으로 나타났다. 또한 2022년의 경우 서울의 용산 가축공원 등 내부에 탄소 저장량이 높은 곳이 나타났지만, 각종 개발로 인하여 서초구 세곡동 부근과 와 강동구 고덕동 부근, 강서구 마곡지구의 경우 토양의 탄소 저장량이 2007년에 비해 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Figure 5).

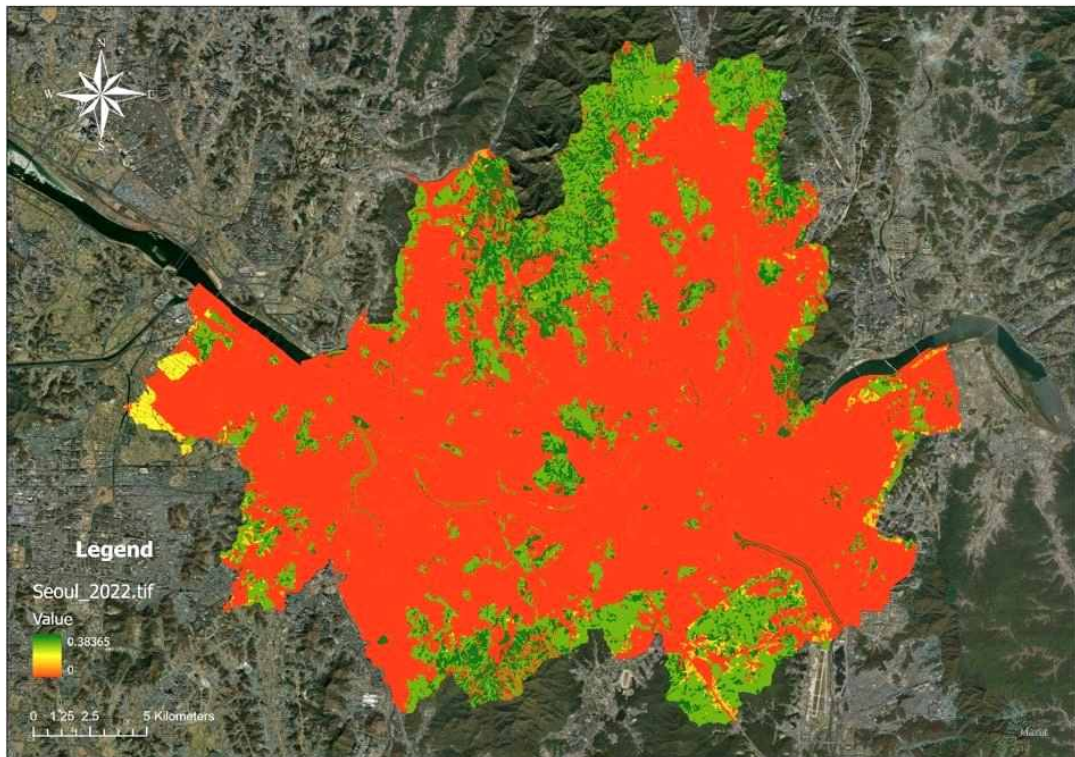
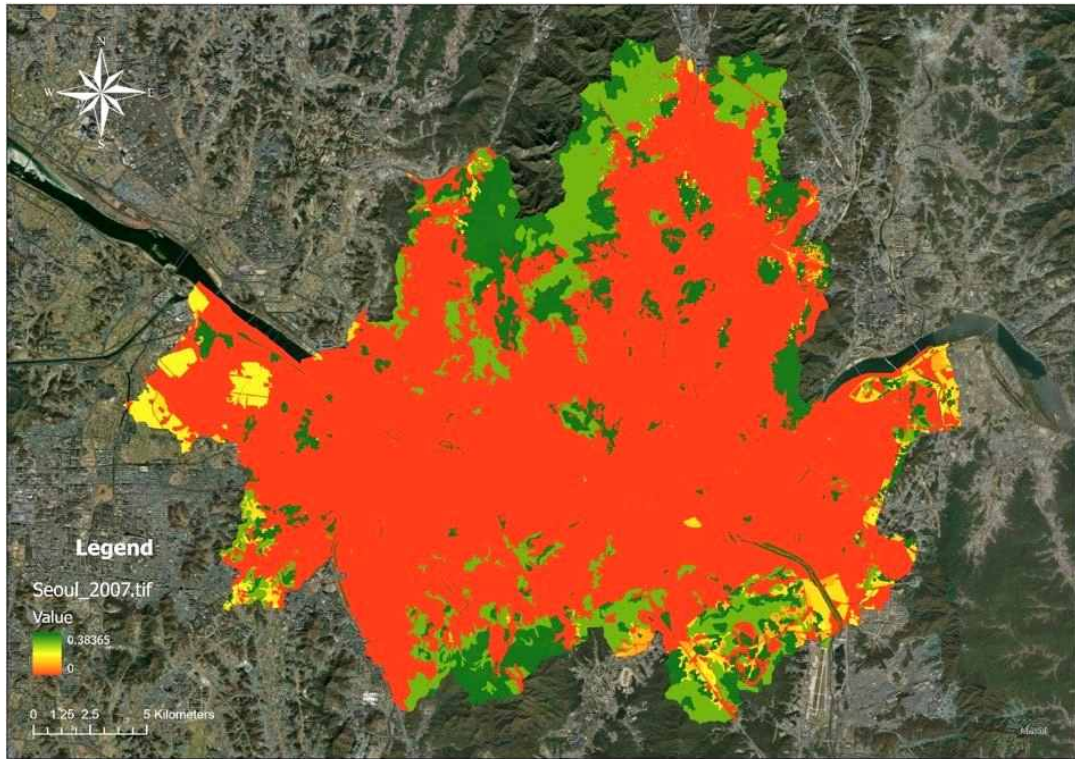


Figure 5. 2007년 서울시 전체 탄소 저장량(위)과 2022년 서울시 전체 탄소 저장량(아래) : 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 탄소 저장량이 높은 곳을 나타냄



탄소저장능력의 증가 및 감소의 원인은 토지피복의 변화의 결과이며, 농업지역(논, 밭, 시설재배지, 과수원, 기타재배지), 산림지역(활엽수림, 침엽수림, 혼효림), 초지(자연초지, 인공초지), 습지(내륙습지, 연안습지), 나지(자연나지, 인공나지)의 증감이 탄소저장 능력의 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 산림지역의 탄소저장 능력은 다른 토지피복 유형에 비해 높으므로 산림지역의 확장은 탄소저장 능력의 변화에 영향을 미치며, 탄소 저장능력이 증가한 봉산과 불암의 경우 다른 4개소 지역(백사실, 관악, 현인릉, 인왕, 원터골)과 비교하여 산림의 면적이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한 다른 지역에 비해 순산림의 면적이 감소한 관악산과 인왕산의 경우 탄소 저장능력이 2007년에 비해 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다(Table 6).

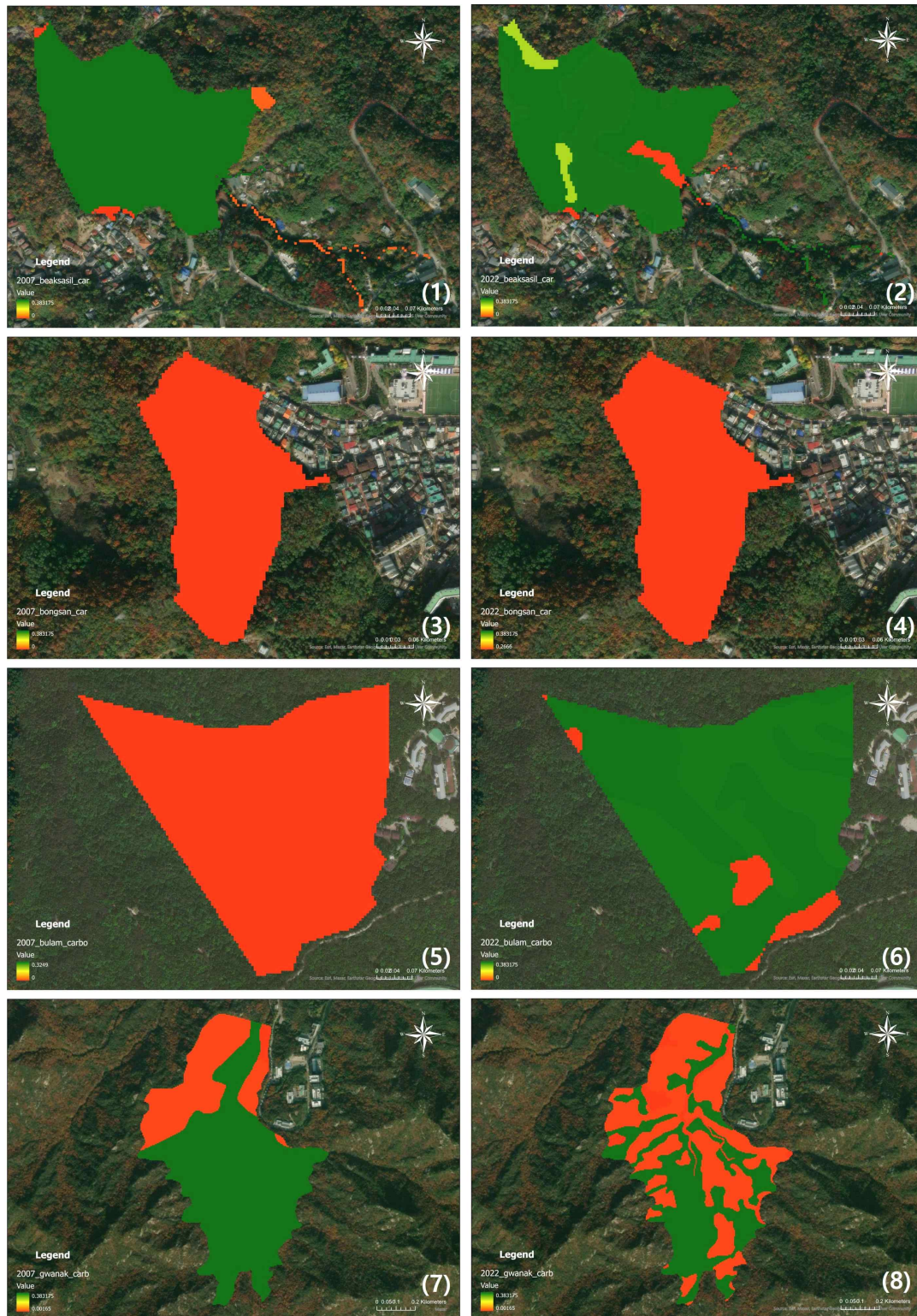


Figure 6. 2007년(오른쪽)과 2022년(왼쪽) 연구 지역의 탄소 저장량 변화. 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 서식지의 질이 높은 것을 나타냄: (1),(2): 백사실계곡, (3),(4): 봉산, (5),(6): 불암산 삼육대 (7),(8): 관악산



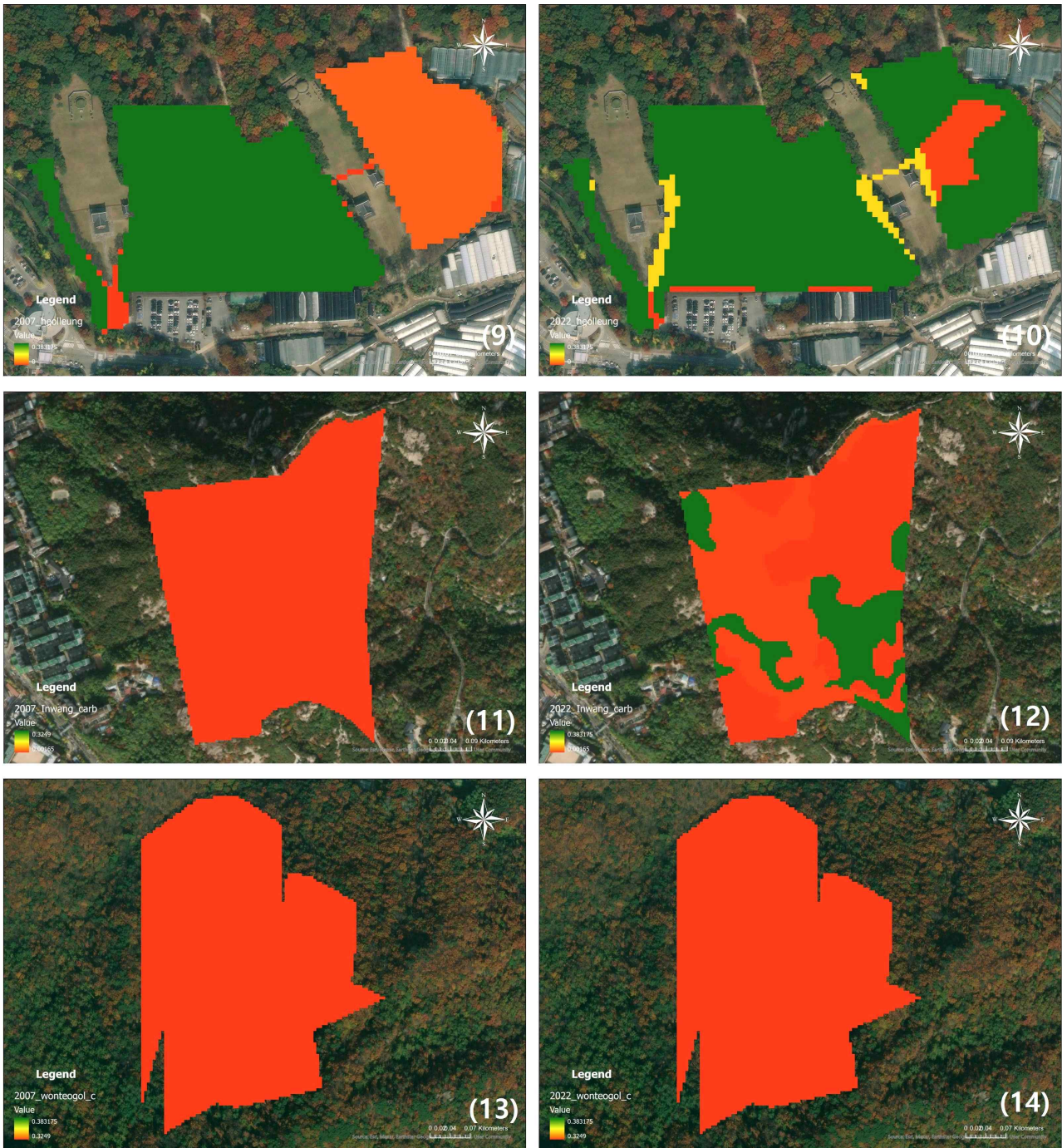


Figure 6-1. 2007년(오른쪽)과 2022년(왼쪽) 연구 지역의 탄소 저장량 변화. 빨간색일수록 서식지의 질이 낮은 것을 의미하며, 노랑-초록의 단계로 갈수록 서식지의 질이 높은 것을 나타냄: (9),(10): 현인릉, (11),(12): 인왕산, (13),(14): 청계산 원터골

### 3.3 연구지역의 탄소 저장량에 대한 경제적 가치 환산

토지피복의 변화에 따른 탄소 저장의 경제적 가치 추정을 환산하였다(Table 6). 서울시 전체를 대상으로 분석한 결과 서울시 전체를 대상으로 분석한 결과 2007년 서울시의 총 탄소 저장 능력은 2169882.28 Mg C이고, 2022년 서울시의 총 탄소 저장 능력은 2313804.99 Mg C로 나타났다. 2007년 대비 2022년 총 143922.72 Mg C의 탄소가 증가하며, 이는 탄소 저장변화량에 따른 가치를 환산하였을 때, 실효탄소요금 평균값인 \$16.06을 적용하였을 경우 \$2302365.13가 증가하며, 이는 탄소의 사회적 비용 평균값인 \$204를 적용하였을 경우 \$29302829.35의 탄소 경제적 가치를 증가시키는 것으로 나타났다. 서울 전체 지역의 토지피복 변화를 분석하였을 때, 시가화·건조지역 및 농업지역이 감소하였고, 농업지역의 감소는 탄소 저장능력의 감소에 영향을 미치는 요인이지만, 탄소 저장량이 높은 산림과 초지의 증가로 서울시의 탄소 저장 능력은 2007년에 비해 2022년이 증가하는 것으로 판단된다.

백사실 계곡은 2007년 대비 2022년의 탄소 저장능력은 감소한 것으로 나타났으며, 토지피복의 변화로 인한 백사실 계곡의 탄소 감소량은 -64,964Mg C로 2007년 대비 2022년 탄소 저장능력이 -8.93% 감소하였다. 탄소 저장변화량에 따른 가치를 환산하였을 때, 실효탄소요금 평균값인 \$16.06을 적용하였을 경우 \$1,039,232가 손실된 것으로 추산되며, 기후변화에 따른 생산성과 경제성장률, 생태계에 미치는 영향을 포함한 탄소의 사회적 비용 평균값인 \$204를 적용하였을 경우 \$13,200,680의 경제적 손실이 도출되었다. 백사실 계곡은 2007년 대비 2022년 저장량이 높은 산림의 면적이 감소하였으며, 특히 탄소 저장 능력이 높은 활엽수림의 감소가 원인으로 사료된다.

봉산은 2007년 대비 2022년 탄소 저장능력은 증가하였으며, 증가한 탄소의 양은 4,324Mg C로 2007년 대비 2022년 탄소 저장능력이 0.98% 증가하였다. 탄소 저장량에 따른 가치를 환산하였을 때, 실효탄소요금 평균값인 \$16.06을 적용하였을 경우 \$69,114가 증가한 것으로 나타났으며, 탄소의 사회적 비용 평균값인 \$204를 적용하였을 경우 \$880,028가 증가한 것을 알 수 있었다. 봉산의 경우 2007년 대비 2022년 산림지역이 증가하였고, 산림의 증가가 탄소 저장량을 증가시켜 봉산 지역의 탄소 경제적 가치를 증가시킨 것으로 생각된다.

불암산 삼육대는 7개 지역 중 탄소의 저장능력이 가장 많이 증가한 지역으로 2007년 대비 2022년 탄소의 저장능력은 7.58% 증가하였으며, 이 시기 증가한 탄소의 양은 85,712Mg C이다. 시간의 흐름에 따른 탄소 저장의 변화량에 ECR인 \$16.06을 적용한 결과 \$1,371,140이 증가한 것으로 도출되었으며, SCC인 \$204를 적용한 결과 \$17,450,864가 증가한 것을 알 수

있었다. 불암산 삼육대의 경우 혼효림이었던 산림이 감소하고, 탄소 저장능력이 높은 활엽수림의 면적이 10.01ha 증가하면서 탄소저장능력이 크게 향상되고, 이에 따라 불암산 삼육대의 탄소 경제적 가치도 높아진 것으로 예측된다.

관악산은 2007년 대비 2022년의 탄소 저장능력은 -5.81% 감소하였으며, 감소된 탄소의 양은 -210,272Mg C로 나타났다. 시간의 흐름에 따른 탄소 저장의 변화량에 ECR인 \$16.06을 적용한 결과 \$-3,363,792가 감소하였으며, SCC인 \$204를 적용한 결과 \$-42,811,872가 감소한 것을 알 수 있었다. 관악산의 경우 산림의 감소하고 나지가 증가하는 토지피복의 변화가 나타났으며, 이는 탄소의 저장능력을 감소시키고, 이로 인하여 관악산의 탄소 경제적 가치가 낮아진 것으로 판단된다.

현인릉의 탄소 저장능력은 2007년 대비 2022년 -6.61% 감소하였으며, 감소된 탄소의 양은 -20,024 Mg C이다. 시간의 흐름에 따른 탄소 저장의 변화량에 ECR인 \$16.06을 적용한 결과 \$-320,352 가 감소하였으며, SCC인 \$204를 적용한 결과 \$-4,077,216 가 감소한 것을 알 수 있었다. 현인릉은 상업지역, 교통지역, 인공초지, 인공나지, 밭, 활엽수의 면적은 증가하였지만, 혼효림 면적은 활엽수의 증가에 비해 더 많은 면적이 감소하였으며, 상업지역 및 교통지역, 인공초지, 인공나지의 증가로 인하여 현인릉의 탄소 경제적 가치가 감소한 것으로 생각된다.

인왕산은 연구 대상 7개 지역 중 탄소의 저장능력이 가장 많이 감소한 지역으로, 탄소 저장능력은 2007년 대비 2022년 -46.39% 감소하였으며, 이 시기 감소한 탄소의 양은 -320,620 Mg C 이다. 시간의 흐름에 따른 탄소 저장의 변화량에 ECR인 \$16.06을 적용한 결과 \$-5,129,004가 감소하였으며, SCC인 \$204를 적용한 결과 \$-65,278,212가 감소한 것을 알 수 있었다. 인왕산의 경우 7개 연구지역 중 산림지역 면적의 감소가 가장 높은 것으로 나타났으며 인공 나지의 면적 감소도 높은 것으로 나타났다. 산림의 일부가 탄소 저장능력이 낮은 자연나지로 전환되면서 탄소 저장능력이 감소되고 이로 인하여 인왕산의 탄소 경제적 가치가 낮아진 것으로 사료된다.

청계산 원터골은 2007년 대비 2022년의 탄소 저장능력은 감소한 것으로 나타났으며, 토지피복의 변화로 인한 백사실 계곡의 탄소의 감소량은 -19,628 Mg C로 2007년 대비 2022년 탄소 저장능력이 -2.00% 감소하였다. 청계산 원터골은 활엽수림의 면적의 감소만큼 혼효림의 면적 증가를 나타냈지만, 활엽수림의 탄소 저장 능력이 혼효림보다 더 높기 때문에 청계산 원터

골의 산림의 면적에는 변화가 없지만 수종의 변화로 인하여 연구지역의 탄소 경계적 가치가 낮게 도출된 것으로 생각된다.

Table 9. 연구대상지역의 과거 및 현재의 탄소 저장량 및 탄소 저장량의 변화와 이를 바탕으로 ECR과 SCC의 방법으로 도출한 연구 대상 지역의 탄소 경제적 가치 도출 결과 (단위 Mg of C)

	2007 Carbon storage	2022 Carbon storage	2007-2022 Change of Carbon storage	ECR (\$16.06)	SCC(\$204)
서울시	2,169,882.28	2,313,804.99	143,922.72	2,302,365.13	29,302,829.35
백사실계곡	792,356	727,392	-64,964	-1,039,232	-13,200,680
봉산	438,660	442,980	4,324	69,144	880,028
불암산 삼육대	1,044,488	1,130,200	85,712	1,371,140	17,450,864
관악산	3,827,268	3,616,996	-210,272	-3,363,792	-42,811,872
현인릉	322,732	302,708	-20,024	-320,352	-4,077,216
인왕산	1,011,792	691,172	-320,620	-5,129,004	-65,278,212
청계산 원터골	1,002,452	982,828	-19,628	-313,980	-3,996,084

## 제 4 장 연구 결과의 활용 계획

---

### 4.1 연구 결과의 활용방안

---



## 4.1 연구 결과의 활용 방안

본 연구는 서울시 생태경관보전지역 중 산림생태계 지역의 생태계서비스를 평가하였다. 산림 생태계서비스의 평가는 토지피복에 따른 서식지 질의 변화 및 탄소 저장 변화량과 그에 따른 경제적 가치 환산에 대해 평가하였다. 그 결과 서울시 전체의 서식지 질은 2007년 대비 2022년 0.091에서 0.106으로 다소 개선되었지만, 서울시 산림보호구역의 서식지 질은 관악산과 현인릉을 제외한 나머지 지역은 감소하였으며, 서울시 전체의 탄소 저장 변화량은 2007년 대비 2022년 143922.72 Mg C의 탄소가 증가하였으며, 이는 실효탄소요금 평균값(\$16.06)을 적용하였을 경우 \$2302365.13의 경제적 가치가 증가하며, 탄소의 사회적 비용 평균값(\$204)을 적용하였을 경우에는 \$29302829.35의 탄소 경제적 가치를 증가하였다.

자연생태계는 기후환경 변화의 충격을 흡수하는 완충재(buffer)역할을 하며, 온실가스 감축 사업 및 기후변화 적응 사업이 실행되는 공간이므로 (황 등, 2020), 생태계의 가치를 정량적으로 평가하고, 가치가 높은 지역은 생물 다양성을 보호하는 보호지역으로 활용하는 것이 필요하다(Pullin et al., 2013). 그러므로 본 연구 결과는 추후 서울시의 생태계 서비스를 증진시키기 위한 보전 지역 수립시 의사 결정 우선 순위를 결정하는데 활용될 수 있으며, 서울시의 생물 다양성 보전 및 탄소 저장량 평가, 그리고 서울시의 기후변화에 대한 영향의 대응 방안을 수립하는데 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한 온실가스 감축 방안의 하나로 식생, 산림 등 자연생태계를 통한 온실가스 흡수가 주요 대안이 될 수 있어 국제사회는 자연을 활용한 해법을 모색중이며(구 외, 2022), 서울시는 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위해 2005년 대비 온실가스 배출량의 20%를 탄소 상쇄를 통해 확보하기 위하여 중단기적으로 도시 숲을 조성하여 온실가스 자체 흡수원을 확대할 예정이다(황 등, 2020). 국내에서는 다양한 산림의 탄소흡수량에 대한 활동 및 국가통계자료가 부족하며, 현존하는 자료도 무분별로 추정값이 산재하여 육상의 국내 총탄소흡수량과 지방자치단체별 탄소흡수량 현황 및 추이 분석이 어렵기 때문에 국내 현실이 반영된 산림 및 생물다양성 보전을 기반으로 하는 효율적인 탄소흡수원 마련이 필요하다(구 외, 2022). 이때 본 연구 분석에 이용된 InVEST 모델을 이용한 토지피복 및 수종에 따른 탄소 저장량의 평가 및 경제적 가치 환산 방법을 이용하여 서울시의 현재 및 미래의 도시 숲 조성에 대한 시나리오를 도출하고 탄소 저장의 변화 및 경제적 평가를 적용한다면, 탄소 흡수의 정량적인 평가를 통해 효과적이고 경제적인 2050 서울시 탄소중립의 정책 수립이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구 결과를 통해 분석된 서식지 질의 변화는 생태경관보전지역과 같은 보호지역에서도

서식지 질의 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 주변부의 복합적인 토지이용의 변화가 영향을 미치는 것으로 판단되므로, 산림생태계 보호를 위한 buffer zone과 같은 대책을 수립에 있어 기초자료로 활용될 수 있으며, 산림생태계를 보호 및 서울시 생태계 서비스를 증진시킬 수 있는 방안에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

또한 서울시 생태경관보전지역에서 산림 생태계 지역의 생태계 서비스의 정량적인 평가 및 생태계 서비스 가치를 추정하고, 추후 생태경관보전지역이 확대에 의한 토지이용변화에 따른 탄소 고정량의 변화를 도출할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 서울시 산림 생태계의 보호 및 관리 방안을 위한 생태계 서비스 값의 제시를 통해 산림생태계 보호를 위한 기초자료를 수립할 수 있을 것이다.

한편 다양한 토지유형의 탄소 고정량 구축은 추후 서울시의 토지이용 계획 및 기후환경영향 평가 단계에서 활용될 수 있으며, 생태계서비스 모델링 방법을 이용하여 추후 환경관련 분야 중 개발사업, 개발정책 수립 단계인 전략환경영향평가와 환경영향평가 단계에서 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

또한 환경정책에 대한 시나리오 분석이 가능하며, 정량적인 결과를 도출할 수 있는 모델이므로 추후 환경영향의 미래 예측 및 평가, 그리고 국토개발 정책 과정에서 의사 결정 지원을 판단할 수 있는 객관적인 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 구경아, 오일찬, 홍현정, 명수정, 김준성. 2022. 생물다양성 보전을 통한 생태계 탄소흡수원 확대방안(Ⅰ). 한국환경연구원
- 황인창, 김고운, 백종락, 손원익. 2020. 파리협정 이행 위한 서울시 '2050 탄소중립'전략. 서울연구원 정책과제연구보고서
- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 47(2):151-163.
- Choi, J., Jongmin, O., Lee, S. 2021. The evaluation of carbon storage and economic value assessment of wetlands in the city of Seoul. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 8(2), 120-132.
- Choi JY, SD Lee. 2018. Evaluation of Ecosystem Service for Distribution of Korean fir using InVEST Model. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(2): 181-193.
- Costanza R, R de Groot, P Sutton, S Van der Ploeg, SJ Anderson, I Kubiszewski, RK Turner. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26: 152-158.
- Gao, J., F. Li, H. Gao, C. Zhou and X. Zhang. 2017. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*. 163: 148-155.
- 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.
- Han Y, W Kang, J Thorne, Y Song. 2019. Modeling the effects of landscape patterns of current forests on the habitat quality of historical remnants in a highly urbanized area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 41: 354-363.
- Jeong, S., Sung, K. (2022). Assessing Habitat Quality and Risk of Coastal Areas in Busan. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 31(2), 95-105.
- KEITI (Korea Environmental Industry & Technology Institute). 2018. Domestic environmental trend report June 2018: Carbon price and market trends in Korea and abroad. The Ministry of Environment. pp. 1-13. (in Korean)

- Kim JH. 2021. A Comparative Study on the Habitat Quality Assessment and NDVI at Mudeungsan National Park. *Journal of National Park Research* 11(1): 81–86
- Moon, J.Y., Han, M.S., Song, J.H., and Kim, E.M. 2017. global application and economic analysis of carbon pricing for emissions reduction. KIEP Research Paper Policy Analyses. 17–31. (in Korean)
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2016. Effective Carbon Rates on Energy. Available online: <http://www.Oecd.Org/>.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993.
- Park WS. 2011. Analysis of Negotiating History and Core Issue of Nagoya Protocol, *Chung-Ang Law Association*, 13(2): 585–640.(in Korean)
- Pullin, A.S.·Bangpan, M.·Dalrymple, S.· Dickson, K.·Haddaway, N.R.·Healey, J.R.·Hauari, H.·Hockley, N.·Jones, J.P.G.·Knight, T.·Vigurs, C.·Oliver, S. 2013. Human well-being impacts of terrestrial protected areas. *Environmental Evidence* 2 : 19, 1–41.
- Terrado M, S Sabater, B Chaplin–Kramer, L Mandle, G Ziv, V Acuña. 2016. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 540: 63–70.
- Yi, H., Güneralp, B., Kreuter, U.P., Güneralp, İ., and Filippi, A.M. 2018. Spatial and temporal changes in biodiversity and ecosystem services in the San Antonio River Basin, Texas, from 1984 to 2010. *Science of the Total Environment* 619–620: 1259–1271.

# 주 의

1. 이 보고서는 서울녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 서울녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.
4. 본 보고서 내용은 서울녹색환경지원센터에서 주지하는 내용과 다를 수 있습니다.



## 서울녹색환경지원센터

주소 : 서울시 동대문구 서울시립대로 163 서울시립대학교 제2공학관 215호

전화 : 02-6490-5400 팩스 : 02-6490-5407

홈페이지 : <http://sgec.uos.ac.kr>