

Research Paper

## 토지이용에 따른 대안별 탄소 저장량 비교

구슬기\* · 이영수\*\* · 이상돈\*

이화여자대학교 환경공학과\*, 한국환경연구원\*\*

### Comparison of Carbon Storage Based on Alternative Action by Land Use Planning

Seulki Koo\* · Youngsoo Lee\*\* · Sangdon Lee\*

Department of Environmental Sciences & Engineering, Ewha Womans University\*  
Korea Environmental Institute\*\*

**요약:** 탄소의 관리는 지구온난화 억제를 위한 중요한 요인으로서 대두되고 있으며, 토지이용 변화는 그 원인 중 하나로 손꼽히고 있다. 본 연구에서는 개발에 따른 탄소 저장량의 변화를 정량화하기 위하여 InVEST Carbon Storage and Sequestration Model(InVEST 모델)의 계산식을 차용한 탄소 저장량 산정을 시도하였다. 탄소 저장량 분석에 앞서 국내 문헌자료를 기반으로 탄소 풀을 구성하였으며, 이를 통해 오송 ○○ 국가산업단지(Osong National Industrial Park, ONIP) 개발 및 대안 적용에 따른 탄소 저장량 변화를 추정하였다.

분석 결과 '대안 1'을 적용할 경우 총 16,789.5MgC, '대안 2'를 적용할 경우 16,305.3MgC의 탄소가 방출될 것으로 예상된다. 이는 사업 전 탄소 저장량의 각각 44.4%, 43.1%를 차지하며, '대안 2'를 선택하는 것이 탄소 배출 저감에 유리한 것으로 나타났다. 이러한 차이는 대안 1과 2의 초지 면적 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 대안 2를 택할지라도 초지 내 적정 수준의 녹피울 관리와 다층구조 식생 조성 및 에너지 사용량이 낮은 시설의 설치 등 그 효과를 높이기 위한 노력이 필요하다. 이와 더불어 하천 정비 과정에서 사라지는 습지를 보존, 혹은 인공습지를 조성함으로써 탄소 저장량을 증대할 수 있을 것으로 사료된다.

위와 같은 토지피복별 탄소 계수를 활용한 탄소 저장량의 평가는 환경영향평가 및 전략환경영향평가 시 토지이용 계획에 대한 비교·평가 분석 결과의 객관성을 높이는 데 기여할 수 있다. 더불어 본 연구에서 구축한 탄소 풀은 분석의 정확도를 높이기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 탄소 저장량, 토지이용 변화, 오송 ○○국가산업단지, 토지관리, InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델

**Abstract:** Carbon management is emerging as an important factor for global warming control, and land use change is considered one of the causes. To quantify the changes in carbon stocks due to

development, this study attempted to calculate carbon storage by borrowing the formula of the InVEST Carbon Storage and Sequestration Model (InVEST Model). Before analyzing carbon stocks, a carbon pool was compiled based on previous studies in Korea. Then, we estimated the change in carbon stocks according to the development of Osong National Industrial Park (ONIP) and the application of alternatives.

The analysis shows that 16,789.5 MgC will be emitted under Alternative 1 and 16,305.3 MgC under Alternative 2. These emissions account for 44.4% and 43.1% of the pre-project carbon stock, respectively, and shows that choosing Alternative 2 is advantageous for reducing carbon emissions. The difference is likely due to the difference in grassland area between Alternatives 1 and 2. Even if Alternative 2 is selected, efforts are needed to increase the carbon storage effect by managing the appropriate level of green cover in the grassland, creating multi-layered vegetation, and installing low-energy facilities. In addition, it is suggested to conserve wetlands that can be lost during the stream improvement process or to create artificial wetlands to increase carbon storage.

The assessment of carbon storage using carbon pools by land cover can improve the objectivity of comparison and evaluation analysis results for land use plans in Environmental Impact Assessment and Strategic Environmental Impact Assessment. In addition, the carbon pool generated in this study is expected to be used as a basis for improving the accuracy of such analyses.

**Keywords :** carbon stock, land use change, Osong National Industrial Park, land management, InVEST Carbon Storage and Sequestration model

## I. 서론

탄소의 관리가 지구온난화 억제를 위한 중요한 요인으로서 대두되고 있다(IPCC 2022). 이에 따라 탄소 저장량을 정량적으로 평가하기 위한 시도가 이루어지고 있다(Tomasso and Leighton 2014; Choi et al. 2020; Choo et al. 2021). 1850년 이래 인간 활동으로 인한 이산화탄소 배출량 중 약 35%는 토지이용에서 기인하였으며(Foley et al. 2005), InVEST Carbon Storage and Sequestration Model(이하 InVEST 모델)은 이러한 토지이용 변화에 따른 탄소 저장량 평가에 널리 활용되고 있는 툴 중 하나이다.

InVEST 모델은 생태계 서비스를 정량화하여 정책 의사결정을 지원하기 위해 개발된 모델로 경관 내 저장된, 혹은 시간이 지남에 따라 격리되는 탄소의 양을 추정한다. 모델의 입력자료는 토지피복도(혹은 토지이용도)와 탄소 풀(carbon pool)만이 요구되어 쉽게 활용할 수 있다(Hwang et al. 2022; Alaoui et al. 2023). 그리고 현재와 미래, Reducing Emissions from Forest Deforestation and Degradation (REDD)

적용에 따른 결과, 탄소 격리의 가치 분석 기능을 제공하며, 이를 시각적으로 나타내주어 그 활용도가 높다. InVEST 모델의 결과는 탄소 풀에 크게 의존하는데, 탄소 저장량은 환경(토양을 구성하는 입자의 성질, 식생 밀도, 수종, 토양수분함량, 관리 방법 등)에 영향을 받기 때문에 InVEST 모델 사용 시 예측하고자 하는 경관의 탄소 저장량을 대표할 수 있는 탄소값 설정이 중요하다(Song et al. 1997; An et al. 2022). 이에 본 연구에서는 국내 탄소 측정 자료를 활용한 탄소 풀을 생성하였으며, 해당 탄소 풀을 적용하여 '오송 ○○국가산업단지 개발사업'의 두 가지 대안을 비교하였다.

탄소 저장량의 정량적인 평가는 개발사업이 환경에 미치는 영향과 대안에 따른 완화 정도를 나타냄으로써 설계의 적절성을 평가하는 지표로 활용될 수 있다. 따라서 국내 환경에 맞춘 탄소 풀을 활용함으로써 탄소 저장량 분석의 객관성을 높이고, 결과적으로 대안 선정 및 평가를 위한 의사결정 과정을 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 연구방법

### 1. 연구의 공간적·시간적 범위

본 연구는 ‘오송 ○○국가산업단지 개발사업’의 대상지인 충청북도 청주시 오송읍 일원(127°18′7.61″E, 36°36′53.85″N~127°20′20.46″E, 36°35′2.39″N)을 대상으로 진행되었다(Figure 1). 개발 예정 지역은 논이 약 47.5%, 밭이 약 16.5%, 시설재배지가 약 14.8%를 차지하고 있는 농업지대이다. 해당 사업은 2021~2030년 진행될 예정이며, 사업 여건 변화와 개발 목표를 고려하여 토지이용 계획에 따른 두 가지 대안을 제시하였다.

‘대안 1’은 타당성 조사 시 계획한 것으로 산업시설 용지 비용, 녹지공간 조성, 생산활동 및 지원 이용 편익과 근로자 및 지역주민의 여가·휴식 공간 조성을 고려하여 설계되었다.

‘대안 2’는 대안 1에서 산업지구와 연구 용지의 배치 변경으로 주거지역에 대한 영향을 저감하고, 중심공원과 주차장 확대로 지역사회의 이용성과 편의성을 증대한 설계이다(MOLIT 2021). 사업 면적은 대안 1을 적용할 경우 675.3ha이며, 대안 2를 적용할 경우 677.0ha로 계획되어 있다. 산업단지 개발 및 대안 적용에 따른 비교를 위하여 개발사업이 시작되기 이전과 이후 두 시점을 기준으로 분석하였는데, 대안 1을 적용할 경우를 ‘계획 1’, 대안 2를 적용할 경우를 ‘계획 2’로 지칭한다. 분석 시 개발 이전의 시점은 이용 가능한 토지피복도 중 가장 최근 자료인 2022년 세분류 토지피복도(환경공간정보서비스, egis.me.go.kr)의 실제 촬영 연도(2021년)를 적용하였으며, 개발사업 이후 시점은 사업이 완료되는 2030년으로 설정하였다.

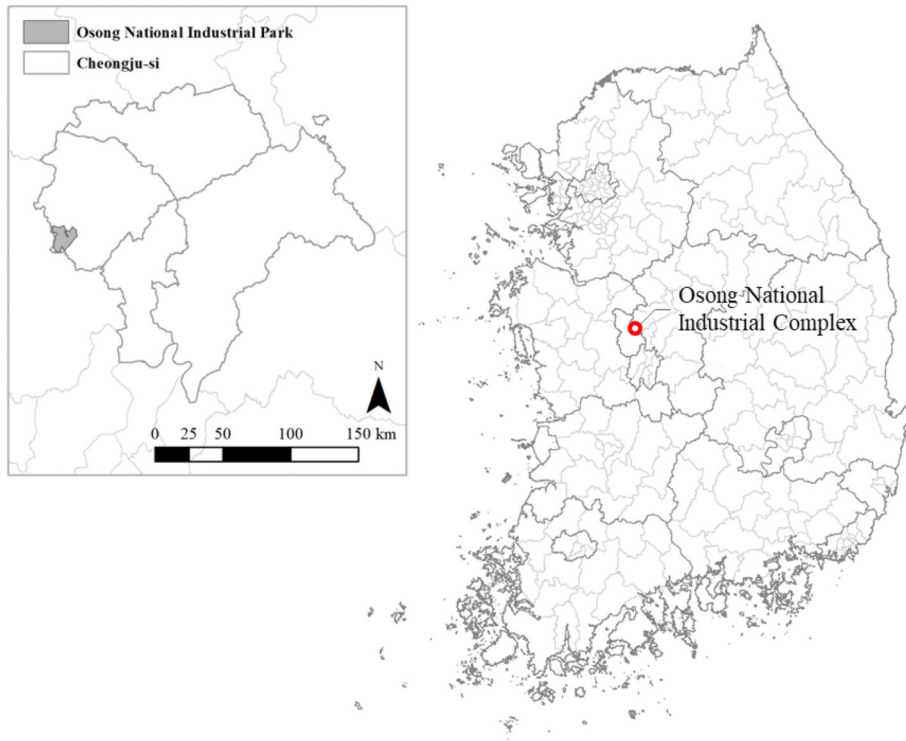


Figure 1. Map of South Korea and study area located in the Chungbuk province at Osong National Industrial Complex.

## 2. 탄소 저장량 평가를 위한 탄소 풀 구축

InVEST 모델을 구동하기 위해서는 토지피복별 탄소 풀이 필요하다. 탄소 풀은 지상부(aboveground biomass), 지하부(belowground biomass), 토양(soil), 고사 유기물(dead organic matter) 탄소를 구분된다. 탄소 저장량은 이들의 합으로 나타낼 수 있으며, 아래 식(Eq. 1)에 따라 토지피복별 탄소 저장량을 계산하였다(Hwang et al, 2021).

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

- i*: land cover type
- $C_i$ : carbon storage per unit area
- $C_{i,A}$ : aboveground carbon density
- $C_{i,B}$ : belowground carbon density
- $C_{i,S}$ : soil organic carbon density
- $C_{i,D}$ : dead organic matter carbon density

각 토지피복에 대한 탄소 계수는 동일한 풀(pool)에서 측정된 값을 묶어 평균을 냈으며, 그 후 모든 풀의 탄소 저장량을 합한 것( $C_i$ )을 최종 탄소 계수로 사용하였다. 세분류 토지피복도에서 시가화·건조지역은 식생이 자랄 수 없는 불투수층을 주로 포함하므로 지상부와 고사 유기물에 대해서는 평가하지 않았다. 밭, 논, 과수원의 경우 작물 및 열매는 소비를 통해 탄소를 대기에 환원하므로 이에 대한 탄소값 또한 제외하였다(Jo et al, 2014). 일부 탄소 측정 문헌을 확인하지 못한 항목에 대해서는 KEI(2016)의 값을 적용하였다.

## 3. 사업 진행에 따른 탄소 저장량 변화

토지피복에 따른 탄소 저장량을 추정하기 위하여 Eq. 1을 통해 계산한 토지피복별 탄소 저장량( $C_i$ )에 해당 토지피복의 면적( $A_i$ )을 곱하였다(Eq. 2).

$$C_{i,total} = C_i \times A_i \quad (\text{Eq. 2})$$

- i*: land cover type
- $C_i$ : carbon storage per unit area (MgC/ha)
- $C_{i,total}$ : total carbon storage (MgC/ha) of land cover
- $A_i$ : area of land cover

이때 사업 전 토지피복도는 현재 이용할 수 있는 자료 중 가장 최근에 구축된 2022년 세분류 토지피복도를 사용하였다. 탄소 저장량은 더 세부적인 분류체계를 적용할 때 그 정확도가 높아질 수 있다. 그러나 가용 데이터가 한정됨에 따라 중분류 및 대분류 수준으로 재분류하여 사용하였다. 개발사업 이후 자료는 오송 ○○국가산업단지 개발사업 환경영향평가 평가항목·범위 등의 결정내용(MOLIT 2021)에 작성된 ‘대안 1’과 ‘대안 2’를 바탕으로 ArcMap 10.7.1을 이용하여 생성하였다. 해당 사업 계획에 관한 정보는 보고서 형식으로 제공되어 정확한 사업 경계를 확인할 수 없었다. 대안별 토지이용계획에서는 대안 1 적용 시 사업면적이 675.3ha, 대안 2 적용 시 677.0ha로 기재되어 있으나, 보고서 내 사진을 기반으로 생성한 폴리곤 면적은 각각 688.7ha, 688.3ha로 차이가 있다. 토지이용계획을 벡터화한 뒤 각 분류 항목은 환경공간정보

Table 1. Reclassification of items and classification code/name on the land use plan

Classification code and name	Items
100 (Urban or built-up land)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apartment house</li> <li>• Detached house</li> <li>• Production facility</li> <li>• Commercial facility</li> <li>• Gas station</li> <li>• Multi-functional complex</li> <li>• Mixed-use building</li> <li>• Business facility</li> <li>• Square</li> <li>• Cultural facility</li> <li>• Community facility</li> <li>• Road</li> <li>• Pedestrian capacity</li> <li>• Parking lot</li> <li>• Research facility</li> <li>• Environmental fundamental facility</li> <li>• Detention pond</li> <li>• Neighborhood living facility</li> <li>• School</li> <li>• Public facility</li> <li>• Supporting facility</li> <li>• Substation</li> <li>• Religious facility</li> </ul>
420 (Artificial grassland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Park</li> <li>• Public open space</li> <li>• Green area</li> </ul>
710 (Inland water)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stream</li> </ul>

서비스의 토지피복 분류체계 및 Oh et al. (2016)을 참고하여 재구성하였다(Table 1, Figure 2).

**4. 탄소 저장량에 대한 가치 환산**

InVEST 모델에서는 저장된 탄소량뿐 아니라 추정된 탄소의 변화량을 바탕으로 아래 식(Eq. 3)에 따라 단위 면적당 경제적 가치를 평가할 수 있다.

$$value\ seq_i = V \frac{s_i}{q-p} \sum_{t=0}^{q-p-1} \frac{1}{(1 + \frac{r}{100})^t (1 + \frac{c}{100})^t} \quad (Eq. 3)$$

- i*: land cover type
- value seq<sub>i</sub>*: price of carbon in unit area (ha)
- V*: price per metric ton of carbon
- s*: amount of carbon (MgC), sequestered on 1 hectare of *i*
- q*: future year
- p*: current year
- r*: yearly market discount rate for the carbon price
- c*: yearly rate of change in the price of carbon

경제적 가치 환산에는 비교 기준이 되는 두 시기의 연도, 톤당 탄소 가격, 연간 탄소 할인율, 연간 탄소 가격 변동률이 입력자료로 이용된다. 2021년과 2030년을 각각 현재와 미래 시점으로 설정했으며, 탄소 가격은 CO<sub>2</sub>에 대한 사회적 비용(Social Cost of Carbon, SCC) \$56(한화 70,812원; 2022년 평균 환율 \$1-1,264.5원 적용), 연간 탄소 할인율은 3%, 연간 탄소 가격 변동률을 0%로 설정하였다(IWG, 2021).

대상지 전체에 대한 탄소 저장량 산정을 위해 Eq. 3로 계산된 토지피복별 단위 면적당 경제적 가치 (*value seq<sub>i</sub>*)에 해당 토지피복의 면적(*A<sub>i</sub>*)을 곱하여 이를 합산하였다(Eq. 4).

$$value\ seq_{total} = \sum value\ seq_i \times A_i \quad (Eq. 4)$$

- value seq<sub>total</sub>*: total price of carbon in study area
- value seq<sub>i</sub>*: price of carbon in unit area (ha)
- A<sub>i</sub>*: area of land cover

Table 2. Amount of carbon per unit area by Land Use and Land Coverage classification

Classification (code)	References				Amount of carbon (MgC/ha)	Tomasso and Leighton (2014) (MgC/ha)
	Aboveground biomass	Belowground biomass	Soil	Dead organic matter		
Urban or built-up land (100)		Bae (2021)	Bae (2021)		27.00	33.79
Paddy field (210)			Lee et al. (2013a), Han et al. (2020), NIFoS (2006), NAAS (2013)		51.83	-
Non-irrigated land (220)			NIFoS (2006), NAAS (2013)		54.05	67.79
Protected cultivation (230)			KEI (2016)		45.90	-
Orchard (240)	NAAS (2021)	Lee et al. (2013b)	Lee et al. (2013b)		166.97	-
Other cropland (250)			KEI (2016)		45.90	-
Artificial grassland (420)	Jo (1999), Jang and Shin (2022)	Jo (1999), Jang and Shin (2022)	Jo (1999), NAAS (2013), Bae and Ryu (2015)		61.16	120.01
Inland wetland (wetland vegetation) (510)	Kim et al. (2016)	KEI (2016)	Bae and Ryu (2015), Yoo et al. (2022), Yu et al. (2022)		216.19	182.07
Barren (600)		KEI (2016)	Bae and Ryu (2015)		16.13	0.66
Inland water (710)		KEI (2016)			0.00	0.00



### III. 결과 및 고찰

#### 1. 탄소 저장량 평가를 위한 탄소 풀 구축

탄소 풀은 국내 탄소 저장량을 측정 혹은 추정한 선행연구를 참고하여 작성하였다(Table 2). 국내 선행연구에서 널리 활용된 Tomasso and Leighton

(2014)의 탄소 풀과 비교했을 때 시가지·건조지역, 인공초지는 각각 6.79MgC/ha, 58.85MgC/ha 더 작은 값이, 농경지(평균), 습지, 나지는 각각 5.14MgC/ha, 34.12MgC/ha, 15.47MgC/ha 더 큰 값이 부여되었다.

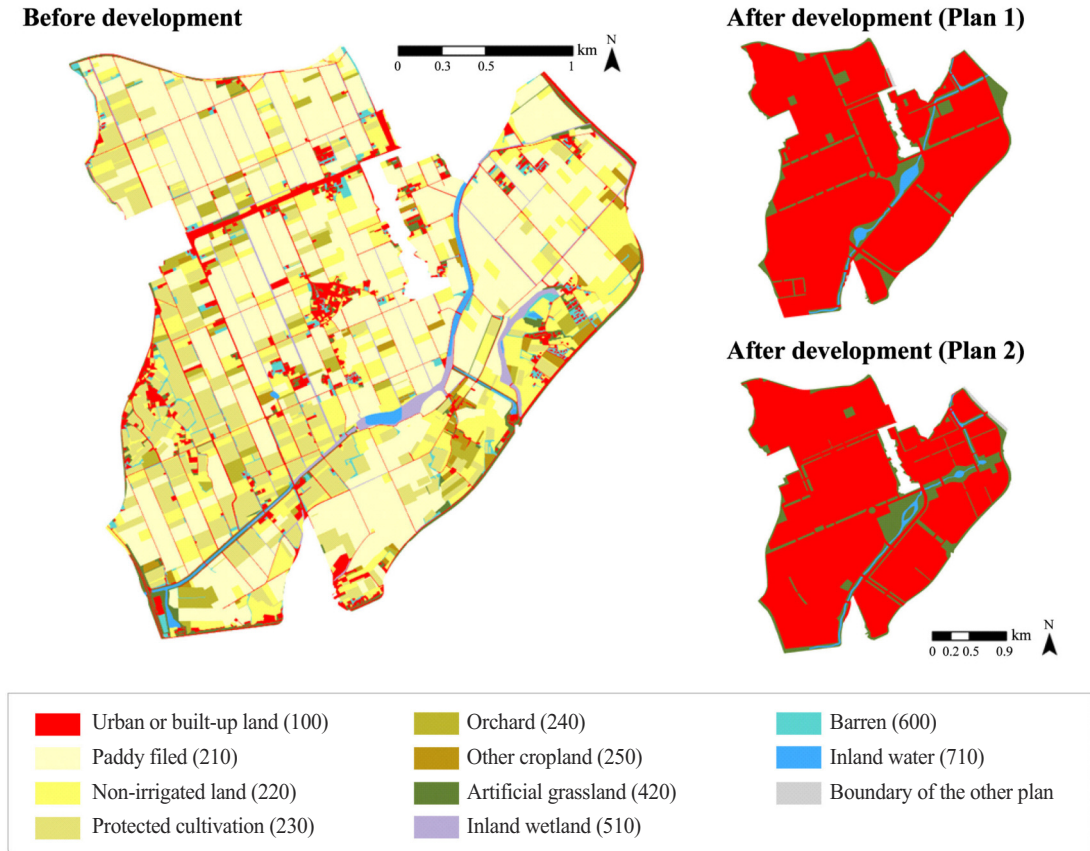


Figure 2. Land use map of before development (left) and after development (right) generated based on Table 1.

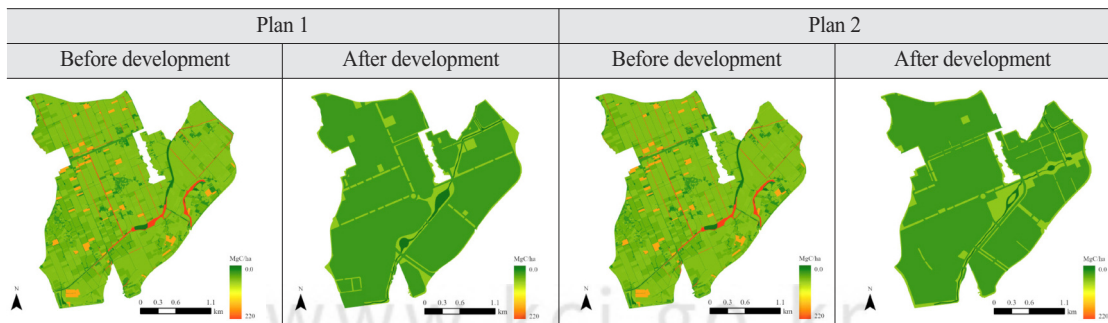


Figure 3. Estimated carbon stock of the area before and after development (MgC/ha).

## 2. 사업 진행에 따른 탄소 저장량 변화

분석 결과 기존 부지에 저장된 탄소량은 계획 1에서 37,844.9Mg (55.0MgC/ha), 계획 2에서 37,794.6 Mg (54.9MgC/ha)으로 산정되었다. 사업 후에 대해서는 대안 1을 적용할 경우 21,055.5Mg (30.6MgC/ha), 대안 2를 적용할 경우 21,489.3Mg (31.2MgC/ha)으로 총 탄소 저장량이 감소할 것으로 예측된다 (Figure 3, Table 3).

개발 전후 탄소 저장량 변화의 주요 원인은 대상지 면적의 절반가량을 차지하는 농경지, 특히 논 면적의 감소로 판단된다(Figure 4). 계획 1에서는 전체 논 면적의 87.5%가, 계획 2에서는 86.9%가 시가지·건조 지역으로 변경되었다. 논은 기타 토양보다 탄소 저장량이 높은 탄소 저장고로, 토양유기탄소(Soil organic carbon, SOC) 저장에 있어 논이 산림토양보다 높은 잠재력을 갖는다고 평가되기도 한다(Liu et al. 2021; Qin et al. 2021). 따라서 토지피복 변화에 따른 탄소 저장량 감소는 타당한 것으로 판단된다. 그러나 Baе (2021)는 서울 아파트단지 불투수층 아래 심토층에서 상당량의 탄소가 저장됨을 확인하였는데, 아파트

단지가 조성되기 이전 농경 활동의 영향으로 추정하였다. 이는 농경지에서 시가지·건조지역으로 바뀐 지역에 대한 탄소 저장량이 과소평가 되었을 가능성이 있음을 의미하며, 동시에 개발 방식에 따라서는 일부 탄소가 유지될 수 있음을 시사한다.

탄소 배출 저감을 위해서는 대안 2를 택하는 것이 적합할 것으로 판단되며, 이러한 차이는 대안 2에서 10.5ha 더 넓은 면적의 초지(공원, 녹지, 공공공지(公共空地))를 조성한 결과로 보인다(Figure 4). 국내에서는 공원 조성 시 주민 삶의 질 개선을 우선시하여 산림과 비교해 탄소의 흡수 및 저장량이 현저히 떨어지는 것으로 평가된다. 그럼에도 도시 면적이 확대되고 있는 현대에 도시의 탄소 흡수원으로서 공원과 가로수의 역할은 무시할 수 없다(GRI 2009; An 2021). 공원녹지가 탄소 흡수원 확충, 지표수 조절, 미기후 조절, 생물다양성 보전 등 환경 문제 완화에 기여함이 연구를 통해 밝혀지고 있으며(Armson et al. 2013; Breuste et al. 2013; SI, 2010), Canedoli et al. (2020)은 도시공원이 같은 지역의 산림과 초지에 버금가는 SOC를 저장하고, 농경지보다 높은 SOC 값을

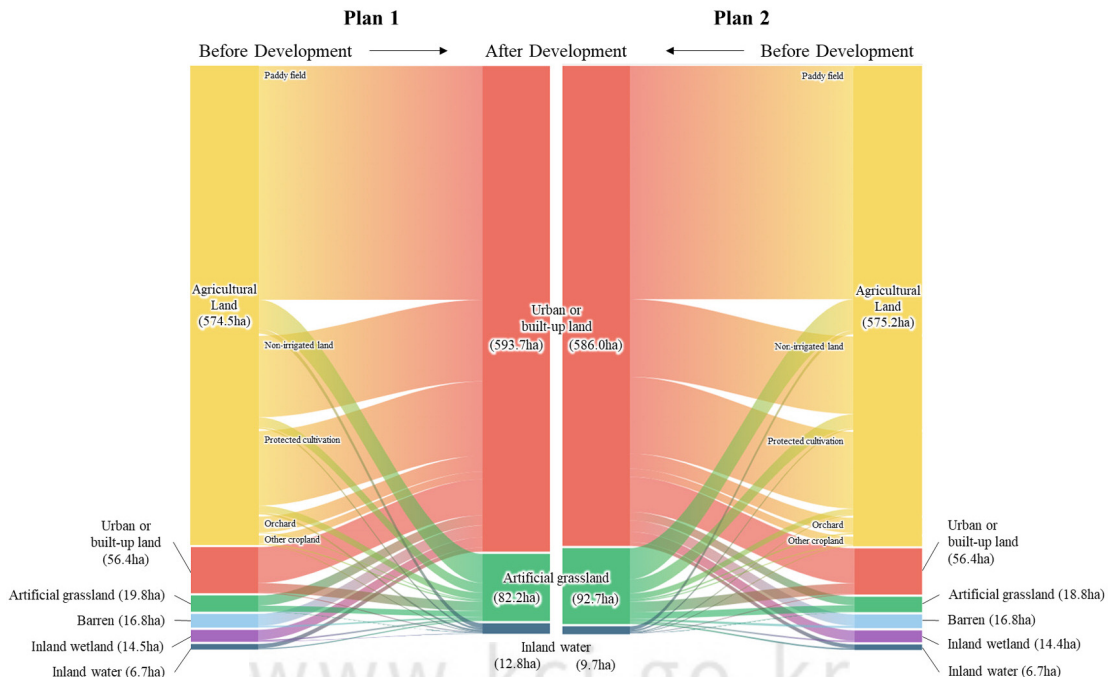


Figure 4. Differences land cover according to development plans

Table 3. Comparison of changes in carbon stock and converted values according to the plans

Plan 1			
	Amount of carbon storage		Social cost (won)
	MgC	MgC/ha	
Before development	37,844.9	55.0	2,387,974,241.9
After development	21,055.5	30.6	1,328,578,078.5
Change	-16,789.4	-24.4	-1,059,396,163.4
Plan 2			
	Amount of carbon storage		Social cost (won)
	MgC	MgC/ha	
Before development	37,794.6	54.9	2,384,797,729.5
After development	21,489.3	31.2	1,355,953,494.6
Change	-16,305.3	-23.7	-1,028,844,234.9

나타냈다고 보고하기도 하였다.

본 연구에서 참고한 선행연구 데이터는 측정 시기와 방법(분석 방법, 시료를 채취하는 토양의 깊이)에 차이가 있다. Kim et al. (2016)은 조사 방법에 따라 탄소 저장량과 그 값에 대한 신뢰도가 달라질 수 있음을 시사한 바 있어 위에서 제시한 탄소 풀 역시 국내 토지피복별 탄소 저장량을 설명하기에 한계가 있을 것으로 판단된다. 추후 체계적인 측정 절차에 따른 탄소 저장량 평가를 통해 탄소 계수에 대한 개선이 필요할 것으로 사료된다.

### 3. 탄소 저장량에 대한 가치 환산

앞서 예측한 탄소 저장량을 바탕으로 사회적 비용(70,812원)을 적용하여 경제적 가치를 산출하였다. 탄소 저장량 감소에 따른 사회적 비용은 계획 1을 따를 때 약 10.6억 원, 계획 2를 따를 때 약 10.3억 원으로 추정된다(Table 3). 따라서 계획 2를 적용 때 3천만 원 수준의 탄소를 추가로 저장할 수 있을 것으로 예상된다.

### 4. 저장된 탄소 배출 완화를 위한 방안

계획 1과 계획 2의 탄소 저장량 차이는 초지 면적의 차이에서 비롯된 것으로 나타났다. 공원녹지에서 탄소 저장량은 녹피울과 식생 밀도 증대, 다층구조 식생 조성 등을 통해 늘릴 수 있으며, 녹피울이 높지 않은 공원을 조성한다면 침엽수와 같은 흡수량이 높은 수종 위주의 식재로 보완할 수 있다(An et al.

2011; Jo et al. 2020). 그러나 과밀한 식재는 오히려 식물 생육에 장애를 일으키므로 단순히 면적이나 녹지율을 늘리는 것을 넘어 식생과 토양에 초점을 맞춘 관리가 함께 이루어져야 한다(Lee and Shim 1998; An et al. 2011).

다량의 탄소를 저장하는 습지의 비율을 높이는 것 또한 하나의 방법이 될 수 있다. 내륙습지의 탄소 저장량은 216.2MgC/ha로 사업지 면적의 87.8%를 차지하는 농경지(논, 밭, 시설재배지)의 약 4배에 달한다(Table 2). 계획 1, 2를 살펴보면 개발사업 이전 습지였던 지역이 수역으로 변경될 것으로 예상된다. 토지이용 변경으로 사라지는 습지의 면적은 14.4-14.5ha로 전체 면적의 약 2%에 불과하지만, 이를 보존하는 것만으로 사업 전 탄소 저장량의 약 8.2-8.3%에 달하는 탄소를 격리할 수 있다. 현재의 하천 상태를 유지하기 어렵다면 인공습지를 조성함으로써 탄소 저장량을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 이때 탄소 격리율은 녹지와 마찬가지로 해당 습지에 서식하는 식생에 따라 달라질 수 있으며, 설계 시 단일식생보다는 목본류와 관목류를 함께 식재하는 것이 효과적이다(Robles et al. 2023).

## IV. 결론

본 연구에서는 국내 환경을 대상으로 탄소 저장량을 측정된 선행연구를 통해 탄소 풀을 구성하였으며, InVEST Carbon Storage and Sequestration Model



(InVEST 모델)의 탄소 저장량 계산식을 차용하여 오송 ○○국가산업단지 개발 및 대안 적용에 따른 탄소 저장량을 평가하였다. 분석 결과 계획 1을 따를 때 총 16,789.4MgC, 계획 2를 따를 때 16,305.3MgC의 탄소가 방출될 것으로 예상된다. 더불어 이에 대한 가치를 화폐 단위로 환산하였으며, 각각 약 10.6억, 약 10.3억 원으로 추산되었다. 결과적으로 계획 2를 채택할 때 약 3천만 원의 가치를 낼 수 있을 것으로 분석되었다. 개발 전후 탄소 저장량 변화에 영향을 미친 주요 원인은 기존 토지피복의 대부분을 차지한 농경지, 특히 논외의 감소이며, 계획 1과 2 사이의 탄소 저장량 차이는 각 대안의 초지 면적 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 녹지에서의 탄소 저장량은 식생과 주변 시설의 영향을 받으므로 적정 수준의 녹피복 관리와 다층구조 식생 조성 및 에너지 사용량이 낮은 시설의 설치 등 그 효과를 높이기 위한 노력이 필요하다. 추가로 하천 정비 과정에서 사라지는 습지를 보존, 혹은 목본류와 관목류를 병합하여 식재한 인공습지를 조성하는 방법 또한 고려될 수 있을 것이다.

연구 과정에서 구축된 탄소 풀은 한국의 환경적 특성을 반영함으로써 국내 탄소 저장량 분석의 정확도를 높이기 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 토지피복별 탄소 계수를 활용한 탄소 저장량의 평가는 환경영향평가 및 전략환경영향평가 시 객관성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에 활용된 자료의 시료 수집 방법이 상이하다는 한계가 존재하므로 추후 체계적인 탄소 저장량 측정 절차 마련 및 이에 따른 평가로 탄소 계수에 대한 개선이 필요할 것으로 사료된다.

## 사사

본 논문은 환경부 환경산업기술원(RS-2022-KE002025), 한국연구재단(KRF-2021R1A2C1011213), 서울녹색환경지원센터(SESTC-2023), 환경부 기후변화영향평가 제도 도입을 위한 시범사업(2022030A58C-00)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Alaoui HI, Chemchaoui A, Asri BE, Ghazi S, Brhadda N, Ziri R. 2023. Modeling predictive changes of carbon storage using invest model in the Beht watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 9: 4313-4322. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01697-3>.
- An KH, Kim HK, Choi YS. 2011. A Study on the City Park Plan of Carbon-neutral or CO2 absorber. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 27(9): 47-54.
- An KH. 2021. The Role of City Parks to Realize a Carbon Neutral City. *Architecture*, 66(1): 26-29.
- An SE, Lee JM, Kim CS. 2022. Relationships between Soil Carbon Storage and Soil Properties of Urban Parks in Jinju-si, Gyeongsangnam-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 24(2): 115-123. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2022.24.2.115>.
- Armson D, Stringer P, Ennos AR. 2013. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3): 282-286. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.04.001>.
- Bae J, Ryu Y. 2015. Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park. *Landscape and Urban Planning*, 136: 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.015>.
- Bae JH. 2021. Evaluation of soil organic carbon stocks in heterogeneous land cover types towards carbon neutral city. [Ph.D. Thesis, Seoul National University]. <https://s-space>.

- snu.ac.kr/handle/10371/177723.
- Breuste J, Schnellinger J, Qureshi S, Faggi A. 2013. Urban Ecosystem services on the local level: Urban green spaces as providers. *Ekologia (Bratislava)*, 32(3): 290-304. <https://doi.org/10.2478/eko-2013-0026>.
- Canedoli C, Ferre C, El Khair DA, Padoa-Schioppa E, Comolli R. 2020. Soil organic carbon stock in different urban land uses: high stock evidence in urban parks. *Urban Ecosystems*, 23: 159-171. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00901-6>.
- Choi JY, Lee SD. 2020. Change of Carbon Fixation and Economic Assessment according to the Implementation of the Sunset Provision. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 7(2): 126-133. <https://doi.org/10.17820/eri.2020.7.2.126>.
- Choo IK, Seong YJ, Shiksha B, Jung YH. 2021. Calculation of Soil Carbon Changes by Administrative District with Regard to Land Cover Changes. *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, 22(3): 37-43. <https://doi.org/10.14481/jkges.2021.22.3.37>.
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Gyeonggi Research Institute (GRI). 2009. Quantification of CO<sub>2</sub> uptake by urban trees and greenspace management for C sequestration. (2009-9). Gyeonggi Research Institute. <https://www.gri.re.kr/web/main/index.do>.
- Han YS, Nam HS, Park KL, Lee YM, Lee BM, Park KC. 2020. Evaluation of Soil Carbon Storages in the Organic Farming Paddy Fields. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 28(1): 73-82. <https://doi.org/10.17137/korrae.2020.28.1.73>.
- Hwang JH, Choi YY, Yoo YJ, Sun Z, Cho HJ, Jeon SW. 2021. 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. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.5.523>.
- Hwang JH, Jang RI, Jeon SW. 2022. 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 –. *Journal of Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 25(5): 15-27. <https://doi.org/10.13087/kosert.2022.25.5.15>.
- Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases (IWG). 2021. Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, And Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990. United States Government. Available from: <https://www.whitehouse.gov/omb/information-regulatory-affairs/regulatory-matters/#scghgs>
- Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) [Internet]. [date unknown]. Carbon Storage and Sequestration; [cited 2023 Mar 8]. Available from: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/carbonstorage.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022: Climate Change 2022: Impacts,

- Adaptation and Vulnerability. 3056. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Jang JH, Shin JH. 2022. The Analysis of the Carbon Storage Characteristics of Neighborhood Park in Urban Development Areas. *Journal of the Korea Landscape Council*, 14(2): 126-140. <https://doi.org/10.36466/KLC.14.2.9>.
- 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, Park SM, Kim JY, Park HM. 2014. Carbon Uptake and Emissions of Apple Orchards as a Production-type Greenspace. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 42(5): 64-72. <https://doi.org/10.9715/KILA.2014.42.5.064>.
- Jo HK, Park HM, Kim JY. 2020. Carbon Reduction and Enhancement for Greenspace in Institutional Lands. *Journal of the Korea*, 48(4): 1-7. <https://doi.org/10.9715/KILA.2020.48.4.001>.
- Korea Environment Institute (KEI). 2016. General Studies Integrated Assessment to Environmental Valuation via Impact Pathway Analysis. (Report No. 2016-10). Korea Environment Institute. <https://docviewer.nanet.go.kr>.
- Kim JS, Han SH, Chang HN, Kim TY, Jang IY, Oh WS, Seo CW, Lee WK, Son YH. 2016. Quantitative Assessment of Climate Regulating Ecosystem Services Using Carbon Storage in Major Korean Ecosystems. *Korean Society of Environmental Biology (Environmental Biology)*, 34(1): 8-17. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.1.008>.
- Lee JB, Shim KK. 1998. A Study on the Optimum Planting Density of Urban Public Park in Seoul-In Case of the Munjung-Family APT. Complex-. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 26(2): 219-228.
- Lee CH, Jung KY, Kang SS, Kim MS, Kim YH, Kim PJ. 2013a. Effect of long term fertilization on soil carbon and nitrogen pools in paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 46(3): 216-222. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2013.46.3.216>.
- Lee TK, Choi JJ, Kim JS, Lee HC, Ro HM. 2013b. Carbon and Nitrogen Stocks of Trees and Soils in a 'Nittaka' Pear Orchard. *Horticultural Science & Technology*, 31(6): 828-832. <https://doi.org/10.7235/hort.2013.13105>.
- Liu Y, Ge T, van Groenigen KJ, Yang Y, Wang P, Cheng K, Zhu Z, Wang J, Li Y, Guggenberger G, Sardans J, Penuelas J, Wu J, Kuzyakov Y. 2021. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis. *Communications Earth & Environment*, 2(154). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0>.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2021. Environmental Assessment in Osnong National Industrial Park (decision content on evaluation criteria, range and ect). Unpublished.
- National Institute of Agricultural Sciences (NAAS). 2013. Estimation of Carbon Storage in Cropland Using Remote Sensing. Ministry of Education, Science and Technology. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do>.
- National Institute of Forest Science (NIFoS). 2006. Establishment of a Greenhouse Gas Statistics System for the Forest Sector in Response to the UNFCCC. National Institute of Forest Science.

- National Institute of Agricultural Sciences (NAAS). 2021. Assessing Soil Organic Carbon Stocks and Fluctuations Under Changing Land Use. National Institute of Agricultural Sciences.
- Oh KY, Lee MJ, No WY. 2016. A Study on the Improvement of Sub-divided Land Cover Map Classification System – Based on the Land Cover Map by Ministry of Environment –. *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(2): 105-118. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2016.32.2.4>.
- Qin Z, Yang X, Song Z, Peng B, Van Zwieten L, Yu C, Wu S, Mohammad M, Wang H. 2021. Vertical distributions of organic carbon fractions under paddy and forest soils derived from black shales: Implications for potential of long-term carbon storage. *Catena*, 198: 105056. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105056>.
- Robles MEL, Reyes NJDG, Choi HS, Jeon MS, Kim LH. 2023. Carbon Storage and Sequestration in Constructed Wetlands: A Systematic Review. *Journal of Wetlands Research*, 25(2): 132-144. <https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.2.132>.
- Seoul Institute (SI). 2010. A Study on Ensuring Carbon Reservoir and Reducing Carbon Emissions Plan. (Report No. 2010-PR-15). Seoul Institute. <https://www.si.re.kr/node/24596>.
- Song CY, Chang KS, Park KS, Lee SW. 1997. Analysis of Carbon Fixation in Natural Forests of *Quercus mongolica* and *Q. variabilis*. *Journal of Korean Forest Society*, 86(1): 35-45.
- Tomasso LP, 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*, 5(17): 1572-1587. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2014.517149>.
- Yoo J, Kim J, Kim J, Lim J, Kang H. 2022. Soil carbon storage and its economic values of inland wetlands in Korea. *Ecological Engineering*, 182(106731). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106731>.
- Yu HY, Kim SH, Kim JG. 2022. Carbon sequestration potential in montane wetlands of Korea. *Global Ecology and Conservation*, 37: e02166. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02166>.