

부산 연안역 탄소저장량 및 경제적 가치 평가

정세화* · 정진욱** · 임유림*** · 성기준****

Jeong, Se Hwa*, Chung, Jin Wook**, Yim, Yu Rim***, Sung, Ki June****

Evaluation of Carbon Storage and Economic Value in the Busan Coastal Zone

ABSTRACT

To cope with climate change, studies are being conducted on natural-based solutions (NBS) that reduce carbon by utilizing ecosystems and ecological resources ultimately to achieve carbon neutrality. In this study, carbon storage and economic value evaluations were conducted of the coastal land and sea of Busan using InVEST's Carbon and Coastal Blue Carbon models, which are ecosystem service-based evaluation models. As a result, it is estimated that the amount of carbon storage per unit area is lower than that of the entire Busan land area and that if the currently underway or planned development works are completed, the carbon storage of the coastal land areas would be decreased more. Coastal sea areas have less carbon storage than coastal land, but there is great potential for NBS that utilize ecological resources in the future. If the reclamation of public water affects important habitats with high carbon storage levels, it will reduce these levels, and such negative effects could last for a long time. For the sustainable management of Busan coastal areas, ecosystem service-based management strategies are needed considering carbon storage.

Key words : Carbon neutral, Natural-based solutions, Climate change, Ecosystem service, InVEST

초 록

전 세계적으로 기후변화에 대응하기 위해 탄소중립 달성을 위한 전략 중 하나인 생태계와 생태자원을 활용하여 탄소를 저감하는 자연기반해법 방안에 관한 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 생태계서비스 기반의 평가 모델인 InVEST Carbon, Coastal Blue Carbon 모델을 이용하여 부산 연안 육역과 연안 해역을 대상으로 탄소저장량 추정 및 경제적 가치 평가를 진행하였다. 연구 결과 부산 연안 육역은 부산 전체 육역과 비교하여 단위면적당 탄소저장량이 적으며, 현재 추진 중이거나 계획된 개발이 완료되면 탄소저장량은 더 감소할 것으로 나타났다. 연안 해역은 육역과 비교해 탄소저장량이 적은 것으로 나타났지만, 향후 생태자원을 활용하는 자연기반해법의 잠재성은 크다. 하지만 공유수면 매립과 같은 개발 행위로 탄소저장량이 많은 중요 서식지에 영향을 줄 경우, 탄소저장량의 감소를 초래하며 이러한 부정적인 영향이 장기적으로 지속될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 부산 연안역의 지속가능한 관리를 위하여 탄소저장량을 고려한 생태계서비스 기반의 관리 전략이 필요하다.

검색어 : 탄소중립, 자연기반해법, 기후변화, 생태계서비스, InVEST

* 정회원 · 부경대학교 생태공학과 공학석사 (Pukyong National University · woody0205@pukyong.ac.kr)

** 부경대학교 생태공학과 학부 과정 (Pukyong National University · j7928@naver.com)

*** 부경대학교 생태공학과 학부 과정 (Pukyong National University · jenny4747@nate.com)

**** 정회원 · 교신저자 · 부경대학교 생태공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Pukyong National University · Ksung@pknu.ac.kr)

Received November 24, 2021/ revised March 22, 2022/ accepted April 1, 2022

1. 서론

인류의 생존을 위협하는 기후변화에 대응하기 위하여 제48차 IPCC 총회에서는 2050년까지 전 지구 이산화탄소 총배출량이 제로를 달성해야 함을 제시하였다(IPCC, 2018). 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 탄소 배출량을 감축하기 위하여 장기저탄소발전전략(LEDS) 수립 등 탄소중립 목표를 이루기 위해 노력하고 있다(ME, 2021). 탄소 배출량을 줄이기 위해 탈 탄소 산업구조 형성, 대체에너지 개발 등 여러 정책의 추진과 더불어 생태계의 탄소 흡수 기능을 활용하여 탄소를 저장하는 자연기반해법(Natural Based Solution, NBS)의 필요성이 강조되고 있다. 이와 관련된 생태계와 생태자원의 탄소 흡수 능력을 파악하는 탄소저장량 평가 및 가치 추정을 위한 연구들이 진행되고 있다(KNPRI, 2019; Tomasso and Leighton, 2014).

생태계서비스 기반의 의사결정 지원 평가 모델인 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)는 기후조절과 관련된 생태계서비스 평가를 지원하며, 육상 생태계의 탄소저장량을 평가하는 Carbon과 해양생태계의 탄소저장량을 평가하는 Coastal Blue Carbon 등으로 구성되어 있다. InVEST 모델은 사용자가 쉽게 접근해 사용할 수 있고, 결과의 오차율이 적은 것으로 알려져 의사결정의 기초자료로 사용될 수 있다(Choi et al., 2019; Roh, 2016). 국내에서는 국립공원, 습지 생태계, 도시개발지역 등 육상 지역을 대상으로 InVEST Carbon 모델을 적용한 탄소저장량 추정 및 가치 평가 연구들이 진행된 바 있다(Choi et al., 2021; Kim et al., 2017; KNPRI, 2019).

연안 도시인 부산은 산림, 해양, 습지 등으로 이루어져 다양한 생태계를 포함하고 있으며, 육상과 해양생태계 각각의 탄소 흡수 기능을 모두 활용할 수 있는 이점을 지니고 있다. 하지만 탄소저장

가치가 다소 다른 두 생태계를 동시에 고려한 탄소저장 평가 연구는 많이 연구되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 생태계서비스 평가 모델인 InVEST를 이용해 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소저장량을 추정하고 이들의 가치를 평가하고자 한다. 또한 다양한 개발 시나리오 분석을 통해 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소저장량 변화를 파악하고자 한다. 본 연구 결과를 통해 부산 연안역의 토지 이용과 서식지별 탄소저장 능력을 파악하고, 향후 자연기반해법을 이용한 탄소 배출을 줄이는 제도적 방안을 제시하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

2.1 연구 범위 및 내용

본 연구에서는 2019년을 기준으로 연안 육역과 연안 해역의 탄소저장량을 추정하고 경제적 가치 평가를 진행하였다. 연안관리법에 따라 연안 육역의 범위는 해안선 기준 육지 방향으로 500 m 이내로 설정하였으며, 항만, 국가 어항 혹은 산업단지의 경우 1,000 m 이내의 육지 지역으로 설정하였다. 연안 해역의 경우 가용할 수 있는 자료의 한계로 해안선 기준 해양 방향으로 500 m 이내의 지역으로 설정하였다(Fig. 1). 연구 범위에 해당하는 연안 육역의 면적은 143.61 km², 연안 해역의 면적은 133.15 km²이다.

부산 연안 육역은 토지 이용에 따라 시가지, 농업지역, 산림, 초지, 습지, 나지 지역으로 분류하여 탄소저장량을 평가하였으며, 2019년 기준 부산 전체 육역인 777.21 km²를 대상으로 탄소저장량을 함께 추정하여 연안 육역의 탄소저장량과 비교 분석하였다. 또한 2019년 기준으로 부산에서 개발 사업이 추진 중이거나 계획 중인 오시리아 관광단지, 에코델타시티 등 개발지구의 일부가 본 연구의 연안 육역 범위에 포함된 경우, 개발 후 해당 지역의 탄소저장

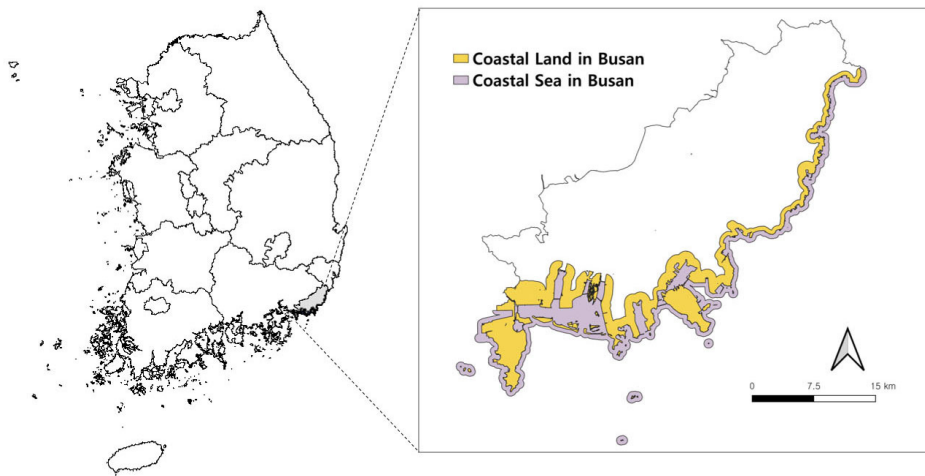


Fig. 1. Study Area (Coastal Land and Sea)

량 변화를 추정하여 개발 사업이 연안 육역의 탄소저장에 미치는 영향을 평가하였다.

연안 해역은 InVEST 모델 특성상 해양의 물리화학적 탄소저장을 고려하지 않고 연안에 서식하는 식물과 퇴적물에 저장되는 탄소를 고려해 갈피, 갈대, 새섬매자기, 갯벌, 패류, 해조류 양식장 등의 지역을 대상으로 탄소저장량 평가를 시행하였다(Sharp et al., 2020). 또한 2019년 기준으로 부산 연안 해역에서 추진 중이거나 계획 중인 공유수면 매립, 신항만 건설 등의 완료 후 연안 해역의 탄소저장 변화량을 분석하였으며, 각각의 경우에 대하여 2050년 연안 해역의 탄소저장량을 예측하여 분석하였다. 양식장의 경우 해조류와 패류 바이오매스에 저장되는 탄소는 수확되면서 제거되기 때문에 저장량 계산에서 고려하지 않고 모델 적용 시점부터 양식장 바닥에 퇴적되는 탄소량은 고려하였다.

2.2 연안 탄소 저장량 평가 모델(InVEST v.3.9.0)

2.2.1 InVEST Carbon 모델

연안 육역의 탄소저장량 평가에 사용된 InVEST Carbon 모델은 토지피복도와 토지 이용별 탄소 보유계수를 기반으로 탄소저장량을 평가하는 모델로, 과거, 현재, 미래와 같은 특정 시점의 탄소저장량 평가가 가능하며(KNPRI, 2019), Eq. (1)을 이용해 토지피복도의 토지이용별 면적과 단위면적당 탄소 보유계수 값을 입력하여 연안 육역의 총 탄소저장량을 계산하게 된다. M_{Land} 는 총 탄소저장량(Ton·C)을 나타내며, C_i 는 토지이용별 탄소저장량(Ton·C/m²), A_i 는 토지이용별 면적(m²)을 나타내며, i 는 대상 지역의 토지이용 유형을 나타낸다.

$$M_{Land} = \sum (C_i \times A_i) \quad (1)$$

$$C_i = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (2)$$

탄소 보유계수는 토지 이용에 따라 각 토지의 지상부 생체량(C_{above} , Ton·C/m²), 지하부 생체량(C_{below} , Ton·C/m²), 토양(C_{soil} , Ton·C/m²), 무기물(C_{dead} , Ton·C/m²)에 저장되는 탄소량을 나타내며(Table 1), 본 연구에 사용된 값은 국내의 선행연구에서 사용된 계수를 참고하여 사용하였다(Roh et al., 2016; Tomasso and Leighton, 2014).

2.2.2 InVEST Coastal Blue Carbon (CBC) 모델

연안 해역의 탄소저장량 평가에 사용된 InVEST CBC 모델은 해양 지역의 생물학적 탄소저장 기작을 바탕으로 탄소저장량을 추정하는 모델로, 초기 탄소량, 반감기, 연간 탄소 축적량 등을 고려하여 생체, 퇴적물이나 토양, 사체에 저장되는 탄소를 합산해

평가한다. 연안 해역의 탄소저장량 평가에 이용되는 수식은 Eq. (3)과 같다. 여기서 C_s 는 연안 해역의 총 탄소저장량(MegaTon·C)을 나타내며, $C_{p,t}$ 는 연구 시점의 서식지 유형별 탄소저장량(MegaTon·C), $N_{p,t}$ 는 연구 시점의 서식지 유형별 순 탄소저장 증가량(MegaTon·C)을 나타낸다(Sharp et al., 2020).

$$C_{s,t} = \begin{cases} C_{p,t-1} + N_{p,t} & \text{if } t > t_{baseline} \\ C_{p,t_{baseline}} & \text{if } t = t_{baseline} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{p,t} = C_{psoil,t} + C_{pbioass,t} + C_{pitter,t} \quad (4)$$

Eq. (4)의 $C_{psoil,t}$, $C_{pbioass,t}$, $C_{pitter,t}$ 는 퇴적물과 생체 및 사체에 저장된 탄소량(MegaTon·C)을 나타내는데(Table 2), 관련 선행연구 자료와 국내 선행연구에서 생물량 데이터를 활용하여 사용하였으며, p 는 서식지 유형, t 는 경과 시간이다(An et al., 2006; Byun et al., 2019; Choi et al., 2016; CNI, 2018; Dong et al., 2012; Jung, 2021; Kim and Sung, 2010; Kim et al., 2008; Mok, 2019; Wahyudi et al., 2020; Yuan et al., 2020).

2.3 지도 구축 및 경제적 가치 평가

모형에 필요한 지도는 ArcMap 10.5.1과 QGIS 3.22.4 프로그램을 사용하여 구축하였다. 연안 육역의 경우 환경부에서 제공된 2019년 대분류, 세분류 토지피복도를 활용해 해상도 5 m의 raster 형태로 구축하였다(ME, 2021). 연안 해역의 경우 국립해양조사원의 재질분포도와 2019년 세분류 토지피복도를 활용해 구축하였으며, 양식장, 갈피, 새섬매자기, 갈대 등 탄소를 저장하는 연안 서식지 지도는 낙동강관리본부 낙동강하구에코센터, 국가공간정보포털, 국가해양정보마켓센터에서 제공되는 자료를 이용하였다(KOMC, 2019; ME, 2020; MOLIT, 2021).

부산 연안역에 저장된 탄소의 경제적 가치를 평가하기 위하여 환경부 온실가스종합정보센터에서 제시한 2019년 전체배출권의 평균 탄소 거래가격인 28,440원/Ton·CO₂을 적용하였다(GIR, 2021).

3. 결과 및 고찰

3.1 연안 육역 탄소저장량 및 경제적 가치 평가

부산 연안 육역의 탄소저장량 평가 결과를 Table 1과 Fig. 2에 제시하였다. 부산 연안 육역에 저장된 총 탄소량은 약 144만 Ton·C로 부산 전역의 탄소저장량 추정치인 1,019만 Ton·C에 비해 약 14.1%의 탄소를 저장하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 산림 지역이 전체 탄소저장량 중 약 71.8%를 차지해 저장량이 가장 많았던

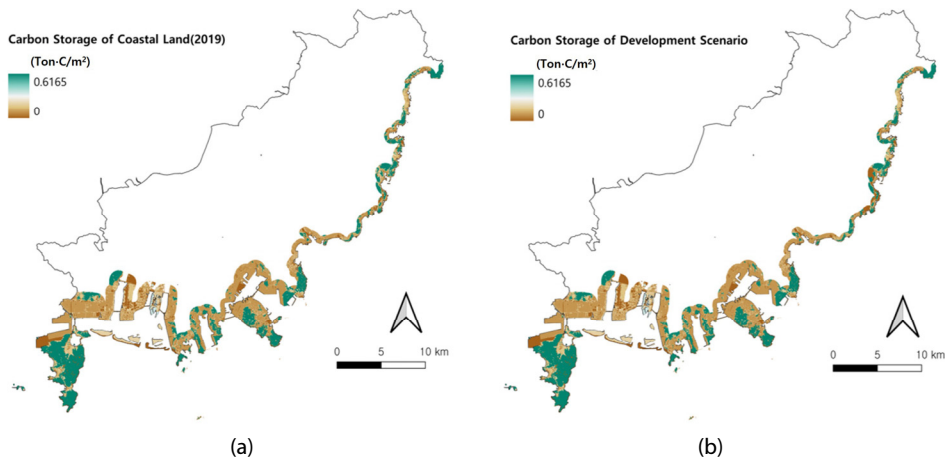


Fig. 2. Carbon Storage in 2019 (a) Coastal Land, (b) Coastal Land of the Development Scenario

반면 나지 지역은 전체 탄소저장량 중 0.07 %만을 담당하였다. 또한 단위면적당 탄소저장량 역시 산림 지역이 25 kg·C/m²로 가장 높았으며, 나지 지역은 0.07 kg·C/m²로 가장 낮은 값을 나타냈다. 부산 연안 육역의 평균 탄소저장량을 경제적 가치로 환산하였을 때 약 1,044원/m², 총 1,499억 원으로 추정된다.

연안 육역의 단위면적당 탄소저장량은 10.0 kg·C/m²로 13.1 kg·C/m²인 부산 전체와 비교해 약 76.3 %밖에 되지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 연안 육역에서 탄소 저장량이 낮은 시가지와 나지가 차지하는 비율이 더 높기 때문으로, 다른 지역에 비해 개발이 많이 진행되어 탄소저장 기능을 할 수 있는 생태계가 상당량 훼손되었음을 보여준다.

부산 연안 육역에서 2019년 현재 개발이 추진 중이거나 계획 중인 지역 중 본 연구의 대상 지역에 포함되는 2.75 km²에 대하여 개발이 완료될 경우 연안 육역의 총 탄소저장량은 약 143만 Ton·C로, 개발로 인해 기존의 나지, 산림, 초지가 시가지로 조성되면서 현재 탄소저장량보다 1만여 톤 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 연안 육역의 범위를 500 m에서 1,000 m 이내로만 설정하여 개발 지구의 일부 지역만이 포함되면서 나타난 결과이다. 따라서 연안 육역의 범위를 확대하여 개발지구 전체를 고려하면 개발로 인하여 감소하는 탄소량도 많아지며, 발생하는 경제적 손실 또한 증가할 것으로 판단된다. 따라서 연안 육역의 개발에 있어서 해당 지역의 탄소 저장량의 변화를 고려하는 것이 바람직하며, 불가피하게 탄소저장량이 높은 생태계가 개발지역에 포함될 경우, 저장된 탄소의 총량을 유지하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

3.2 연안 해역 탄소저장량 및 경제적 가치 평가

부산 연안 해역의 탄소저장량을 평가 결과를 Table 2와 Fig. 4에 제시하였다. 부산의 연안 해역에 저장된 총 탄소량은 약 38만

Table 1. Area and Carbon Storage of Busan Coastal Land

	Coastal Land (2019)		Completion of Development	
	Area (km ²)	C Storage (Ton)	Area (km ²)	C Storage (Ton)
Urban	60.77 (42.3 %)	205,351 (14.3 %)	63.14 (42.1 %)	213,356 (14.9 %)
Farmland	7.26 (5.1 %)	49,246 (3.4 %)	7.21 (5.0 %)	48,844 (3.4 %)
Forest	41.81 (29.1 %)	1,031,150 (71.8 %)	41.58 (29.0 %)	1,025,412 (71.5 %)
Grassland	17.20 (12.0 %)	140,952 (9.8 %)	16.57 (11.5 %)	135,806 (9.5 %)
Wetland	0.63 (0.4 %)	9,088 (0.6 %)	0.61 (0.4 %)	8,997 (0.6 %)
Barren	14.64 (10.2 %)	967 (0.1 %)	13.27 (11.2 %)	876 (0.1 %)
Water	1.28 (0.9 %)	0 (0 %)	1.22 (0.9 %)	0 (0 %)
Total	143.61 (100 %)	1,436,753 (100 %)	143.61 (100 %)	1,433,291 (100 %)
Economic Value	149,960,807,024 won		149,599,461,497 won	

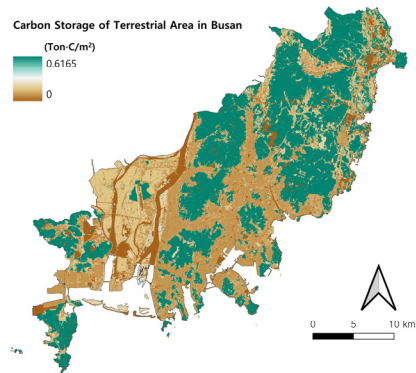


Fig. 3. Carbon Storage of Terrestrial Area in 2019

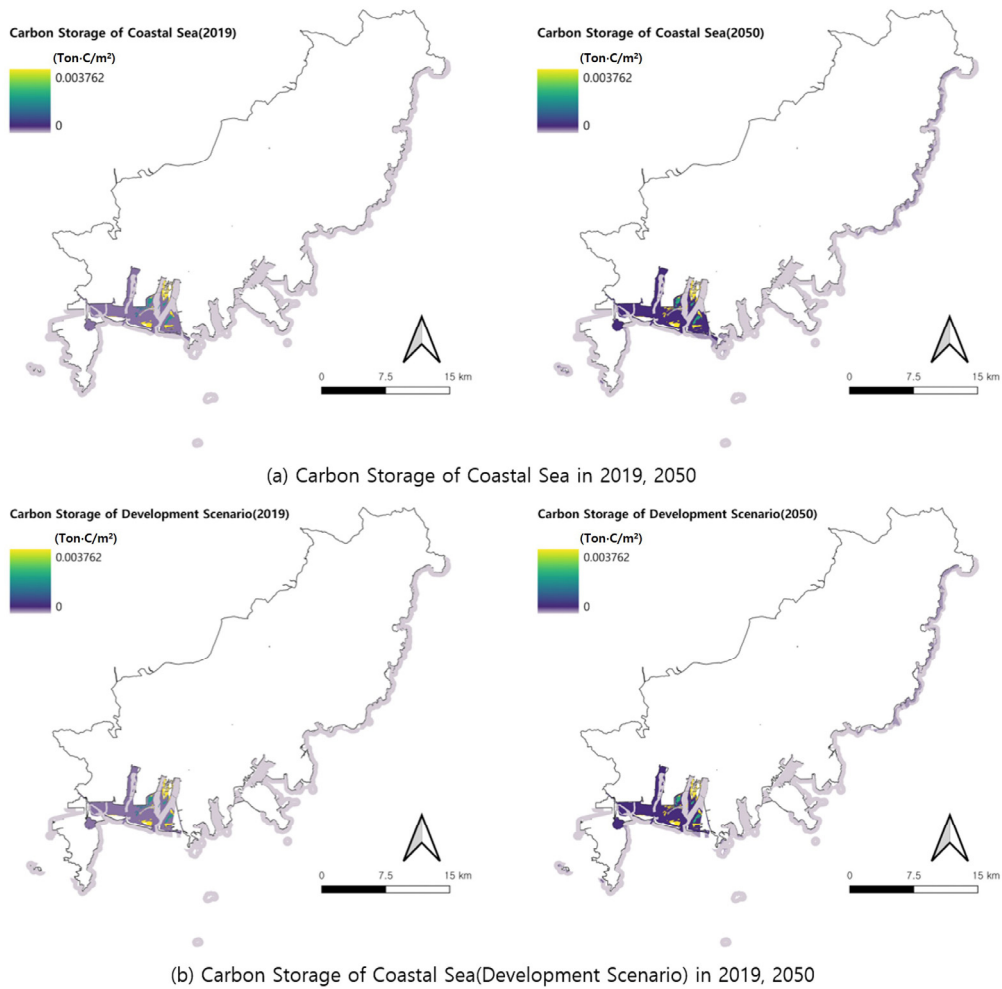


Fig. 4. Carbon Storage in 2019, 2050 (a) Coastal Sea, (b) Coastal Sea of the Development Scenario

Ton·C로 나타났다. 갈대 서식지가 전체 탄소저장량 중 약 48.2 %를 차지해 저장량이 가장 많았다. 새섬매자기 서식지는 전체 탄소저장량 중 약 3.62 %로 저장량이 가장 작은 것으로 나타났는데, 이는 분포 면적이 가장 작았기 때문이다. 단위면적당 탄소저장량으로 비교하였을 때 갈대 서식지가 102.5 kg·C/m²로 가장 높았으며, 갯벌이 6.3 kg·C/m²로 가장 낮은 값을 나타냈다. 갯벌의 경우 탄소를 저장할 수 있는 식물이 없으며, 아직 논란이 있는 플랑크톤에 의한 탄소저장 기작을 본 연구에서는 고려하지 않았기 때문이다. 2019년 부산 연안 해역의 탄소저장량을 경제적 가치로 환산하였을 때 약 301원/m², 총 400.6억 원으로 추정되었다(Table 2).

부산 연안 해역의 현재 추진 중이거나 계획 중인 17.3 km²에 대한 개발이 완료되면 총 탄소저장량은 약 36만 Ton·C로, 개발 전과 비교해 약 2만여 톤의 탄소저장량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구의 대상 지역인 연안 해역 일부가 공유수면 매립과 신항만 건설 등으로 인해 육지 지역으로 변경되고, 중요한 탄소

보유지역인 갈대와 새섬매자기 서식지와 갯벌의 면적이 감소하기 때문이다. 탄소를 흡수하는 중요 생태자원의 훼손되면서 해당 지역의 탄소저장 능력의 감소로 이어짐을 알 수 있다. 해양에서 육지로 전환된 지역의 경우 토지 이용 용도에 따라 연안 육역의 탄소저장량에 영향을 줄 수 있다. 개발 완료 후 부산 연안 해역의 탄소저장량을 경제적 가치로 환산하였을 때 약 379.9억 원으로 추정되며, 개발 전과 비교하여 약 5.2 % 감소한 것으로 나타났다.

개발이 진행되지 않는다면 2050년 부산 연안 해역의 총 탄소저장량은 90만 Ton·C로 증가하며 경제적 가치 또한 총 944.5억 원으로 약 2.4배 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 연안 해역 일부가 공유수면 매립과 신항만 건설 등으로 개발되었을 경우 2050년의 탄소저장량은 85만 Ton·C으로, 개발하지 않았을 경우와 비교하여 약 5.1만여 톤의 탄소가 적게 저장된 것으로 나타났으며, 경제적 가치 또한 5.7 % 감소하는 것으로 나타났다. 이는 개발로 인한 생태자원의 감소로 인해 연안 해역의 탄소저장에 부정적인 영향이 개발

당시에만 미친 것이 아니라 해당 서식지의 잠재적 탄소 저장능력 또한 훼손하면서 장기적으로 부정적인 영향을 미친 것으로 판단 된다.

2019년 기준 부산 연안 해역과 부산 전체 육역의 단위면적당 탄소저장량은 각각 2.9 kg·C/m² 과 13.1 kg·C/m²로 육역이 약 4.5배 높은 것으로 나타났다. 이는 본 연구 대상 연안 해역 중

Table 2. Area and Carbon Storage of Busan Coastal Sea

Habitat	Coastal Sea (2019)		After Development	
	Area (km ²)	C Storage (Ton)	Area (km ²)	C Storage (Ton)
Sea and Aquaculture	107.98 (81.1 %)	0 (0 %)	93.02 (80.3 %)	0 (0 %)
Tidal Flat	22.21 (16.7 %)	139,164 (36.3 %)	19.91 (17.2 %)	124,775 (34.3 %)
<i>Scirpus Planiculmis</i>	0.33 (0.3 %)	13,877 (3.6 %)	0.33 (0.3 %)	13,877 (3.8 %)
Seagrass	0.83 (0.6 %)	45,699 (11.9 %)	0.81 (0.7 %)	44,860 (12.3 %)
Reed	1.81 (1.4 %)	185,091 (48.2 %)	1.76 (1.5 %)	180,418 (49.6 %)
Total	133.15 (100 %)	383,830 (100 %)	115.84 (100 %)	363,930 (100 %)
Economic Value	40,062,179,484 won		37,985,120,964 won	

Habitat	Coastal Sea (2050)		Development Scenario (2050)	
	Area (km ²)	C Storage (Ton)	Area (km ²)	C Storage (Ton)
Sea	95.28 (71.6 %)	0 (0 %)	82.77 (71.5 %)	0 (0 %)
Aquaculture (Seaweed)	2.70 (2.0 %)	1,574 (0.2 %)	2.40 (2.1 %)	1,398 (0.2 %)
Aquaculture (Complex)	9.90 (7.4 %)	37,592 (4.2 %)	7.75 (6.7 %)	29,444 (3.5 %)
Aquaculture (Shell)	0.10 (0.1 %)	702 (0.1 %)	0.10 (0.1 %)	702 (0.1 %)
Tidal Flat	22.21 (16.7 %)	289,218 (32.0 %)	19.91 (17.2 %)	259,316 (30.4 %)
<i>Scirpus Planiculmis</i>	0.83 (0.6 %)	51,849 (5.7 %)	0.81 (0.7 %)	50,897 (6.0 %)
Seagrass	0.33 (0.3 %)	46,064 (5.1 %)	0.33 (0.3 %)	46,064 (5.4 %)
Reed	1.81 (1.4 %)	477,898 (52.8 %)	1.76 (1.5 %)	465,835 (54.6 %)
Total	133.15 (100 %)	904,898 (100 %)	115.84 (100 %)	853,657 (100 %)
Economic Value	94,448,547,770 won		89,100,278,644 won	

가장 넓은 면적을 차지하는 해양의 탄소저장량을 정량적 자료의 부족으로 인하여 0으로 가정하였기 때문이다. 실제 해양은 많은 양의 탄소를 흡수하는 것으로 알려져 있으며, 식물 플랑크톤 또한 해양 탄소 순화에 중요한 역할을 담당하고 있다고 밝혀지고 있어, 해양의 탄소저장량은 본 연구에서 추정된 양보다 많을 것으로 기대된다(Krause-Jensen and Duarte, 2016). 따라서 본 연구에서 자료의 한계로 포함하지 않았을 미발견 서식지의 추가 및 해양과 갯벌의 탄소저장 기작 등을 포함한다면 연안 해역에 저장되는 탄소저장량은 이보다 많이 증가할 것이다. 또한 이들 지역에 있어서 새로운 서식처 조성이나 복합 양식과 같이 탄소저장량을 높이는 방안들이 추진된다면 연안 해역이 감당할 수 있는 탄소저장량은 더욱 증가할 것이다.

3.3 연안역 개발 시 탄소저장 변화량

공유수면 매립 등 현재 연안 해역에서 계획된 사업이 완료되면 약 17.3 km²의 해양 지역이 육상 지역으로 전용되면서 연구 범위인 연안 육역 면적이 증가하고 연안 육역의 탄소저장량 또한 개발 전보다 0.25 %인 약 3,550 Ton의 탄소가 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 5). 반면 연구 범위인 연안 해역의 경우 면적이 13 % 감소하고, 탄소저장량 또한 개발 전보다 19,900 Ton·C로 약 5.2 %로 감소하는 것으로 나타났다. 결국 개발 사업의 결과 연안 해역에서 개발로 인하여 감소하는 탄소 저장량이 연안 육역에서의 증가량보다 많아지면서 총 16,350 Ton·C의 손실이 발생하게 된 것이다. 이는 훼손된 지역에 탄소 저장량이 높은 연안 해역의 갈대, 새섬매자기, 갯벌 지역이 일부 포함됐지만, 육지로 전환된 지역이 탄소저장량이 적은 시가지나 나지 등으로 사용되기 때문이다. 이러한 결과는 향후 연안역 개발 사업의 경우 연안 육역과 연안 해역의 탄소저장 변화량을 고려하여 저장량 손실을 최소화할 수 있도록 해야 하며, 불가피한 개발이 발생하면 해당 지역 탄소저장에 중요한 역할을 하는 주요 서식지의 보전방안은 물론 대체 서식지 조성과 같은 적극적인 대안이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

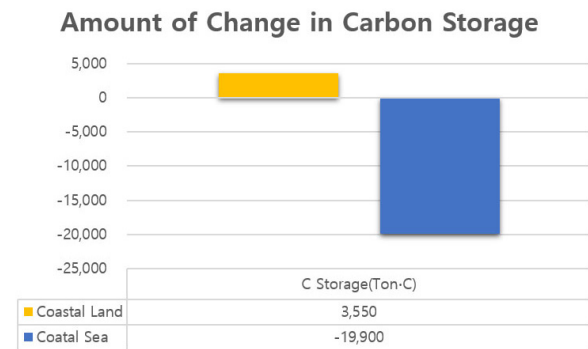


Fig. 5. Amount of Carbon Storage in Coastal Zone

4. 결론

본 연구에서는 생태계서비스 평가 모델인 InVEST를 이용하여 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소저장량 및 경제적 가치를 평가하였으며, 개발 시나리오를 적용하여 이들 지역의 탄소저장량 변화를 분석하였다.

평가 결과 부산 연안 육역의 단위면적당 탄소저장량은 부산 전역에 비해 낮은 것으로 나타났는데, 이는 연안 지역이 다른 육상 지역과 비교했을 때 시가지, 나지 비율이 높기 때문으로, 다른 지역에 비해 이미 개발이 많이 진행된 것을 알 수 있다. 현재 추진 중이거나 계획 중인 개발이 진행되면 탄소저장량이 더 감소하는 것으로 나타났다. 부산 연안 해역의 경우 연안 육역에 비해 탄소저장량이 적은 것으로 나타났지만 향후 탄소를 저장할 잠재력은 더 큰 것으로 나타났다. 하지만, 공유수면 매립과 신항만 건설 개발이 현재 탄소저장량이 많은 중요 서식지가 훼손될 경우, 연안 해역의 전체 탄소저장량이 감소할 뿐만 아니라 해당 서식지의 잠재적 탄소 저장능력 또한 훼손하면서 장기적으로 부정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 향후 탄소거래가격이 올라가면 경제적 손실 또한 더 증가할 것이다.

따라서 향후 연안역의 개발 계획을 수립하기 위해서는 해당 지역의 탄소 저장량의 변화를 고려하는 것이 바람직하며, 불가피하게 탄소저장량이 높은 생태계가 개발지역에 포함될 경우, 저장된 탄소의 총량을 유지 혹은 증대하는 방안이 강구되어야 할 것이다. 이를 위해 탄소저장량의 높은 삼림이나 연안의 중요 서식지 보존, 기존 개발지역의 녹지 조성 등을 통한 탄소 저장능의 추가 확보, 아직 발견되지 않은 연안 해역의 탄소 보유 서식지의 발굴 및 해조류와 패류의 복합 양식 등 연안역의 효율적인 탄소 관리 체계 구축이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 탄소저장량을 고려한 생태계서비스 기반의 부산 연안역 관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부재원(과학기술정보통신부 여대학원생 공학연구팀제 지원사업)으로 과학기술정보통신부와 한국여성과학기술인육성재단의 지원을 받아 연구되었습니다(WISET 계약 제 2021-182호).

References

An, S. M., Lee, J. Y. and Jeong, S. J. (2006). "Seasonal biomass and carbon, nitrogen contents change of *schoenoplectus trigueter* in Nakdong river estuary." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 39-49 (in Korean).

- Byun, C. H., Lee, S. H. and Kang, H. J. (2019). "Estimation of carbon storage in coastal wetlands and comparison of different management schemes in South Korea." *Journal of Ecology and Environment*, Vol. 43, No. 1, pp. 61-72.
- Choi, J. Y., Lee, Y. S. and Lee, S. D. (2019). "A study on the ecosystem services value assessment according to city development: In case of the busan eco-delta city development." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 28, No. 5, pp. 427-439 (in Korean).
- Choi, J. Y., Oh, J. M. and Lee, S. D. (2021). "The evaluation of carbon storage and economic value assessment of wetlands in the city of Seoul." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 8, No. 2, pp. 120-132 (in Korean).
- Choi, S. K., Kim, S. G., Lee, K. S. and Li, W. T. (2016). "The ecological importance of the dwarf seagrass *zostera japonica* in intertidal areas on the southern coast of Korea." *Ocean Science Journal*, Vol. 51, No. 1, pp. 1-12 (in Korean).
- ChungNam Institute (CNI) (2018). *Blue carbon potential value assessment research service for coastal station* (in Korean).
- Dong, W., Shu, J., He, P., Ma, G. and Dong, M. (2012). "Study on the carbon storage and fixation of *phragmites australis* in baiyangdian demonstration area." *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 13, pp. 324-330.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR) (2021). *2019 Emission transaction system operation result report* (in Korean).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5 C*, USA.
- Jung, S. W. (2021). *Development of ecological model for evaluation of marine forest status and community structure*, Ph.D. Dissertation, Pukyong National University (in Korean).
- Kim, B. R. and Sung, K. J. (2010). "Design of riparian areas for the carbon sequestration and diffused pollutants control." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 32, No. 11, pp. 1030-1037 (in Korean).
- Kim, J. S., Kim, C. K., Yoo, K. J. and Hwang, S. I. (2017). "A preliminary study for identifying soil management area in environmental impact assessment on development projects." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 26, No. 6, pp. 457-469 (in Korean).
- Kim, T. H., Park, S. R., Kim, Y. K., Kim, J. H., Kim, S. H., Kim, J. H., Chung, I. K. and Lee, K.S. (2008). "Growth dynamics and carbon incorporation of the seagrass, *zostera marina* L. in jindong bay and gamak bay on the southern coast of Korea." *Algae*, Vol. 23, No. 3, pp. 241-250 (in Korean).
- Korea National Park Research Institute (KNPRI) (2019). *2019 National park ecological service valuation study - Seoraksan Mountain · Deogyusan Mountain · Mudeungsan Mountain · Byeonsanbando National Park* - (in Korean).
- Korea Ocean data Market Center (KOMC) (2019). *Coastal line. aquaculture. trade port. national fishing port*, Available at: <http://www.khoa.go.kr/komc/main.do> (Accessed: October 19, 2021).
- Krause-Jensen, D. and Duarte, C. M. (2016). "Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration." *Nature Geoscience*, Vol. 9, pp. 737-742.

- Ministry of Environment (ME) (2020). *Land cover map*, Available at: <https://egis.me.go.kr/main.do> (Accessed: October 19, 2021).
- Ministry of Environment (ME) (2021). *The implementation plan of the ministry of environment's carbon neutrality in 2021* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2021). *Urban development zone*. Available at: <http://www.nsd.go.kr/lxportal/?menuno=2679> (Accessed: October 19, 2021).
- Mok, J. I. (2019). *Creating added value for korea's tidal flats: Using blue carbon as an incentive for coastal conservation*, Master Dissertation, UC San Diego, California, USA.
- Roh, Y. H. (2016). "Introduction of carbon storage and spatial distribution estimation techniques - Establishment of underlying data to support climate change policy." *Science & Technoloeh Policy*, Vol. 26, No. 5, pp. 46-51 (in Korean).
- Roh, Y. H., Kim, C. K. and Hong, H. J. (2016). "Time-series changes to ecosystem regulating services in Jeju: Focusing on estimating carbon sequestration and evaluating economic feasibility." *Environmental Policy*, Vol. 24, No. 2, pp. 29-44 (in Korean).
- Sharp, R., Douglass, J. and Wolny, S. (2020). *InVEST user's guide - Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs version 3.9.0. national capital project*, California, USA.
- Tomasso, L. P. and 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 Environment Protection*, Vol. 5, pp. 1572-1587.
- Wahyudi, A. J., Rahmawati, S., Irawan, A., Hadiyanto, H., Prayudha, B., Hafizt, M., Afdal, A., Adi, N. S., Rustam, A., Hernawan, U. E., Rahayu, Y. P., Iswari, M. Y., Supriyadi, I. H., Solihudin, T., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Kusumaningtyas, M. A., Daulat, A., Salim, H. L., Sudirman, N., Suryono, D. D. and Kiswara, W. (2020). "Assessing carbon stock and sequestration of the tropical seagrass meadows in indonesia." *Ocean Science Journal*, Vol. 55, No. 1, pp. 85-97.
- Yuan, Y., Li, X., Jiang, J., Xue, L. and Craft, C. B. (2020). "Distribution of organic carbon storage in different salt-marsh plant communities: A case study at the yangtze estuary." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 243, pp. 1-11.