



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공 학 석 사 학 위 논 문

부산지역 육상 및 해양 생태계의
탄소보유능과 서식지 질 평가



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

생 태 공 학 과

정 세 화

공 학 석 사 학 위 논 문

부산지역 육상 및 해양 생태계의 탄소보유능과 서식지 질 평가

지도교수 성 기 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

생 태 공 학 과

정 세 화

정세화의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



위 원 장 공학박사 강 대 석 (인)

위 원 수산학박사 최 창 근 (인)

위 원 공학박사 성 기 준 (인)

목 차

표목차	iii
그림목차	iv
Abstract	vi
I. 서론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 연구 범위 및 절차	4
II. 이론적 배경 및 선행연구 고찰	5
1. 생태계서비스 정의	5
가. 생태계서비스 개념	5
나. 생태계서비스 관련 선행연구	8
2. InVEST 모델	12
가. InVEST 모델 개요	12
나. InVEST 모델을 적용한 선행연구	14
III. 부산 육상 지역 탄소보유량 및 경제적 가치 평가	17
1. 서론	17
2. 연구 방법	19
3. 결과 및 고찰	23
4. 결론	33

IV. 부산 연안역 탄소보유량 및 경제적 가치 평가	34
1. 서론	34
2. 연구 방법	36
3. 결과 및 고찰	42
4. 결론	54
V. 부산 연안역 서식지 질 및 위험도 평가	55
1. 서론	55
2. 연구 방법	57
3. 결과 및 고찰	64
4. 결론	68
VI. 종합 분석	69
1. 연안역의 서식지와 탄소보유능 종합 분석	69
2. 생태자연도 비교	70
3. 국토환경성평가 비교	72
4. 해양생태도 비교	74
VII. 결론	76
참고문헌	79
Appendix	89

표 목 차

Table 1. Classification System of Ecosystem Service	7
Table 2. Evaluation Categories of InVEST for Ecosystem Services	13
Table 3. Input data of InVEST Carbon Model	21
Table 4. Area and Carbon Storage of Terrestrial Area in Busan	24
Table 5. Carbon Storage by Administrative District	31
Table 6. Input Data of InVEST Coastal Blue Carbon Model	40
Table 7. Area and Carbon Storage of Coastal Land in Busan(2019)	44
Table 8. Economic Value of Coastal Land in Busan(2019)	44
Table 9. Area and Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2019)	48
Table 10. Economic Value of Coastal Sea in Busan(2019)	48
Table 11. Area and Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2050)	51
Table 12. Economic Value of Coastal Sea in Busan(2050)	51
Table 13. Input Data of InVEST Habitat Quality Model	58
Table 14. Input Data of InVEST Habitat Risk Assessment Model	61
Table 15. Habitat Quality Value by Range and Average Value	65
Table 16. Habitat Risk Value by Range and Average Value	67
Table 17. Land Cover Map	91

그 립 목 차

Fig 1. Study Procedure	4
Fig 2. Study Area (Terrestrial Area in Busan)	19
Fig 3. InVEST Carbon Model Process	20
Fig 4. Carbon Storage of Terrestrial Area in Busan. (a) 2007, (b) 2019	25
Fig 5. Change of Land Cover in Busan(Area, %)	26
Fig 6. Carbon Storage in Busan(Sphere)	28
Fig 7. Carbon Storage in Busan(Administrative District)	28
Fig 8. Carbon Storage of Administrative District. (a) 2007, (b) 2019	29
Fig 9. Carbon Storage in Dong-Busan. (a) 2007, (b) 2019	30
Fig 10. Study Area (Coastal Land and Sea Area in Busan)	37
Fig 11. InVEST Coastal Blue Carbon Model Process	39
Fig 12. Carbon Storage of Coastal Land in Busan(2019)	45
Fig 13. Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2019)	49
Fig 14. Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2050)	52
Fig 15. The Amount of Carbon Storage of Coastal Zone	53
Fig 16. Relation Between Exposure and Consequence in Habitat Risk Assessment	62
Fig 17. Habitat Quality of Coastal Land in Busan	65
Fig 18. Habitat Risk Assessment of Coastal Sea in Busan	67

Fig 19. Overlay of Carbon Storage and Habitat in Coastal Zone	69
Fig 20. Ecological and Natural Map of Coastal Land in Busan	70
Fig 21. National Territory Environment Evaluation of Coastal Land in Busan	72
Fig 22. Marine Ecological Map in Busan	74



Assessment of Carbon Storage Capacities and Habitat Quality of
Terrestrial and Marine Ecosystems in Busan, Korea

Se Hwa Jeong

*Department of Ecological Engineering,
Pukyong National University*

Abstract

Busan, a coastal city where land and marine ecosystems are closely connected, is adversely affecting ecosystems such as land-use changes and habitat destruction due to urbanization and industrialization. In addition, the 6th IPCC report explained that the abnormal climate phenomenon was caused by human carbon emissions. Especially in cities, which were expected to face a serious climate crisis due to development activities that did not consider the ecosystem, and countries around the world, including Korea, are striving to realize carbon neutrality. Accordingly, in order to preserve biodiversity and respond to the climate crisis, the InVEST model, which can evaluate habitat and carbon storage, was applied to determine the current status of Busan's land and coastal zones.

As a result of the evaluation, carbon storage decreased compared to the past, and more storage would be lost if development proceeded. Among the administrative districts, Gijang-gun, which has the largest area and more than half of the area consists of forest areas, had the largest carbon storage, and compared to the past, the carbon storage reduction rate is the highest, so caution is needed in development. If a part of the sea area is changed to land area due to the development of coastal zone, the amount of carbon storage reduced in coastal

sea area is significantly higher than the amount of carbon storage increasing in coastal land area, indicating that alternatives are needed to minimize the loss of carbon storage. As a result of habitat evaluation, more than half or half of both coastal land and coastal sea areas showed low habitat quality or high risk, indicating that the habitat is highly likely to be damaged. The comprehensive analysis of carbon storage and habitat evaluation showed similar trends as a result of comparing them with previous studies on ecological and natural map, land, infrastructure and environment assessment map, and marine ecological map, and previous studies do not consider carbon storage or human impact.

When preparing a strategy for realizing carbon neutrality in Busan, it will be possible to utilize the current status of carbon holdings by city, county, and district as basic data, and help to select a plan to minimize losses during development by comparing the impact of coastal development on the land and sea. It is also expected that it will be used to minimize damage to the ecosystem by identifying dangerous areas through habitat evaluation, and to prepare conservation and management measures necessary for responding to climate crises and preserving biodiversity by considering carbon storage and habitat.

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

최근 40년간 지구 평균 기온은 꾸준히 상승하고 있으며, 해수온도와 해수면 상승, 생물들의 서식지 이동, 대기 중 이산화탄소 농도의 급증과 같은 급격한 기후변화 현상들에 대하여 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 인류의 편익과 발전을 목적으로 한 인간 활동에 의한 것으로 보고하였다(IPCC, 2021). 이러한 이상 기후 현상은 2050년까지 더욱 심화될 것으로 예측하고 있으며, 특히 도시의 경우 지속적인 이용과 개발 행위로 인해 다른 지역보다 심각한 기후 위기를 겪게 될 것으로 예상된다. 기후변화의 원인 중 하나인 산업화·도시화는 생물들의 서식 환경을 변화, 훼손시키고 지구 생태계를 파괴하면서 기후 조절 및 생물다양성과 관련된 생태계서비스의 손실을 유발하고 도시의 건강성 저하로 이어진다.

이에 세계 각국에서는 생물다양성의 보전 및 기후 위기 대응을 위해 생태계서비스 평가의 필요성을 강조하고 있으며, 우리나라 또한 환경부에서 생태계서비스 평가 가이드라인을 설정하고 생태계서비스 기반의 지속가능한 자연자본의 이용을 위한 연구, 생태계 평가체계 구축, 생태계서비스가 지니는 가치 평가 연구를 진행하고 있다(최지영, 2020; 이현우 외. 2015; 안소은 외. 2020). 가이드라인에 의하면 생태계서비스 평가는 경제 발전-생태계서비스 간의 개발을 위한 지원 도구로 적용될 수 있으며, 생물다양성, 기후변화와 같은 생태계서비스 각 항목들과 결합하여 평가를 적용할 수 있다.

연안 도시 부산은 과거부터 끊임없는 토지 이용과 지리적 특성에 따른 연안역 개발로 인해 산사태, 침수와 같은 자연재해에 의한 피해와 이상 기후 현상을 겪고 있는 지역으로 도시의 건강성과 생태계서비스 가치가 저하됐

을 가능성이 높은 것으로 판단된다(여운상 외, 2020). 따라서 본 연구에서는 InVEST 모델을 이용하여 생태계서비스를 기반으로 한 부산 육상 지역 및 연안 육역과 해역의 탄소보유능과 서식지 상태를 파악하고자 한다. 토지 이용에 따른 탄소보유량과 이에 대한 경제적 가치를 계산하고, 인간 활동의 영향을 받는 부산 내 연안 육역의 서식지 질과 연안 해역의 서식지 위험도를 추정해 기후 조절, 생물다양성과 관련된 생태계서비스를 결합하여 그 가치를 평가하고자 하였다.

Chapter III. 부산 육상 지역 탄소보유량 및 경제적 가치 평가

본 연구는 자연기반해법 활용을 위하여 생태계서비스 항목 중 기후조절과 관련된 탄소보유량과 경제적 가치를 평가한 논문이다. 다양한 생태계를 포함하는 부산은 생태계 각각의 탄소보유 기능을 활용한다면 탄소중립 실천에 기여하는 중요 지역으로 고려될 것이다. 하지만 연안역과 도심지의 지속적인 개발로 인해 토지피복의 변화와 서식지의 훼손으로 생태계의 탄소보유 기능이 저하 될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 목적은 InVEST Carbon 모델을 적용해 생태계서비스 평가 항목 중 기후조절과 관련된 탄소를 고려하여 현재 부산의 탄소보유능을 추정하고, 개발에 따른 탄소보유 변화량을 파악하여 보전·관리가 필요한 지역을 식별하고자 한다.

Chapter IV. 부산 연안역 탄소보유량 및 경제적 가치 평가

본 연구는 부산 육상 전체 지역의 탄소보유량 평가에 이어 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량 및 경제적 가치를 평가한 논문이다. 부산의 지리적 특성상 연안을 이용하기 위해 연안 육역과 연안 해역은 끊임없이 개발이 진행되고 있어 탄소보유 기능을 하는 육상과 해양의 중요 서식지는 훼손되고 사라질 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 탄소보유 기작이 다소

다른 육상과 해양생태계를 함께 고려하기 위해 InVEST Carbon, Coastal Blue Carbon 모델을 적용하여 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량을 추정하고 이들의 가치를 평가하고자 한다.

Chapter V. 부산 연안역 서식지 가치 및 위험도 평가

본 연구에서는 부산 연안 육역과 연안 해역의 서식지 질과 서식지 위험도를 평가하였다. 인간 활동으로 인해 연안에 위치한 서식지와 생태계에 위협 영향을 미치고, 이러한 영향들은 누적되어 서식지 훼손, 더 나아가 생물 다양성의 손실로 이어진다. 따라서 본 연구의 목적은 지속가능한 부산 연안생태계 이용 및 보전을 위해 인간 활동에 따른 연안 육역의 서식지 질과 연안 해역의 서식지 위험도를 파악하고, 서식지를 고려한 부산 연안역 관리를 위한 방향을 제시하고자 한다.

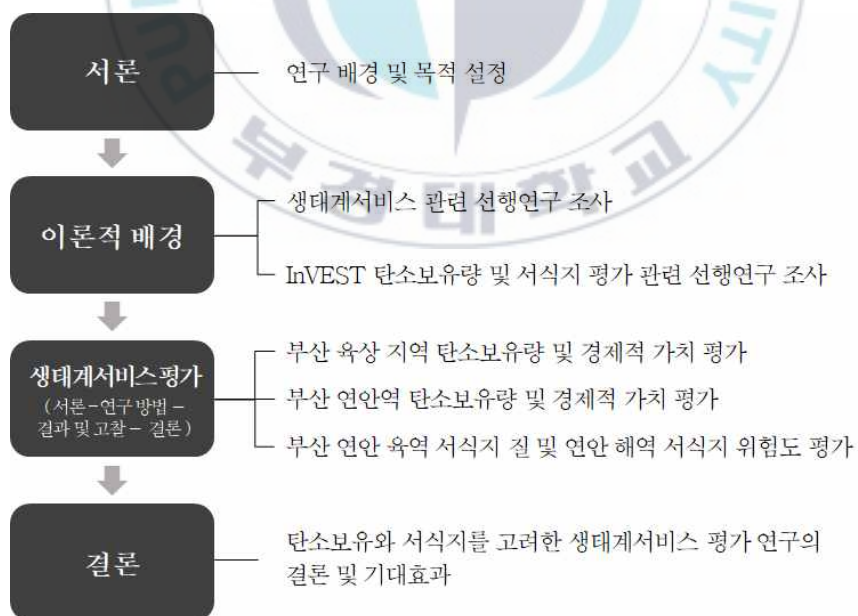


Fig 1. Study Procedure

2. 연구 범위 및 절차

본 연구의 시간적 범위는 2019년을 현재 시점으로 설정하였다. 공간적 범위는 부산 육상 전체 지역의 경우 갯벌과 해양을 제외한 육상 지역을 대상으로 하였다. 연안 육역은 연안관리법에 따라 해안선 기준 육지 방향 500m, 항만, 국가어항 혹은 산업단지는 1,000m 이내의 육지 지역으로 설정하였으며, 연안 해역은 가용할 수 있는 자료의 한계로 해안선 기준 해양 방향 500m 이내의 해양 지역으로 설정하였다.

본 연구에서는 서식지와 탄소 보유를 고려한 부산의 생태계서비스 가치 평가를 위해 부산 육상 지역 및 연안역의 탄소보유량 및 경제적 가치 평가, 연안역의 서식지 가치와 서식지 위험도 평가를 포함하여 총 3개의 연구를 진행하였다. 연구 절차는 Fig 1과 같다.

II. 이론적 배경 및 선행연구 고찰

1. 생태계서비스 정의

가. 생태계서비스 개념

Westman(1977)에 의해 생태계가 제공하는 사회적 편익을 자연의 서비스로 표현되면서 생태계서비스 개념이 등장했으며, Ehrlich의 보고서에서 ‘생태계서비스’ 단어를 처음 사용한 것으로 추정된다(Ehrlich and Ehrlich, 1981; 안소은, 2013). 이후 다양한 분야에서 생태계서비스가 다루어지면서 생태계서비스 개념과 분류체계를 정립하기 위한 연구들이 진행되었다.

Daily(1997)은 생태계서비스를 인간 생활에 필요한 생물다양성과 재화의 생산성 유지를 위한 생태계의 조건과 과정이라 설명하였으며, Costanza et al.(1997)의 연구에서는 생태계로부터 직간접적으로 생산되어 인간이 실질적으로 사용하는 편익으로 정의하고 있다. De Groot et al.(2002)의 연구에서는 생태계서비스와 편익을 다른 개념으로 인식하고, 직간접적으로 인간의 필요를 충족시키는 재화와 서비스를 제공하는 자연적 과정 및 구성요소의 생산능력으로 정의하였다. 생태계 보전 및 지속가능한 이용을 목적으로 유엔환경계획(UNEP)에서 2001년부터 2005년에 걸쳐 연구된 새천년생태계평가(Millennium Ecosystem Assessment, MA) 최종보고서에서는 생태계서비스를 인간이 생태계로부터 얻는 편익으로 정의하였다(MA, 2005).

생태계서비스의 분류체계는 대부분 기능과 역할에 따라 범주화하고, 각 범주에 따라 세부 항목으로 구분한 것을 확인할 수 있다(환경부, 2016). Costanza et al.(1997)는 생태계 기능을 17개로 분류하였으며, De Groot et

al.(2002)는 생산, 조절, 서식지, 정보기능의 4개 기능으로 분류한 후 각 기능별로 총 23개의 세부 기능을 구분하였다. MA(2005)는 생태계서비스 역할에 따라 공급, 문화, 조절, 지지서비스 4개의 서비스로 분류하고, 각 서비스별 25개의 세부 서비스를 구분하였다. TEEB(2010) 역시 MA(2005)와 동일한 4개의 서비스로 분류하고, 22개의 세부 서비스로 구분하였다. 내용적 측면에서 보았을 때 De Groot et al.(2002)와 MA(2005)의 연구에서 설명하는 분류체계는 유사한 것으로 판단할 수 있으며, 현재 MA(2005)와 TEEB(2010)에서 제시하는 정의와 분류체계가 일반적으로 사용되고 있는 것을 알 수 있다(안소은, 2013; 환경부, 2016). 각각의 생태계서비스 분류체계는 Table 1에 정리하였다.



Table 1. Classification System of Ecosystem Service

(안소은, 2013; 최지영, 2020)

Categories	De Groot et al.(2002)	Categories	MA(2005)	TEEB(2010)
Production Functions	Food Production	Provisioning Services	Food	Food
	Water Supply		Fresh Water	Water
	Raw Materials		Genetic Resources	Raw Materials
	Genetic Resources		Biochemicals	Genetic Resources
	Medicinal Resources		Fiber	Medicinal Resources
	Ornamental Resources		Ornamental Resource	Ornamental Resources
Regulation Functions	Gas Regulation	Regulating Services	Air Quality Regulation	Air Purification
	Climate Regulation		Climate Regulation	Climate Regulation
	Disturbance Prevention		Natural Hazard Regulation	Disturbance Prevention or Moderation
	Water Regulation		Water Regulation	Regulation of Water Flows
	Waste Treatment		Water Purification and Waste Treatment	Waste Treatment
	Soil Retention		Erosion Regulation	Erosion Prevention
	Soil Formation		Soil Formation	Maintenance of Soil Fertility and Nutrient Cycling
	Pollination		Pollination	Pollination
	Biological Control		Disease Regulation	Biological Control
	Nutrient Cycling		Pest Regulation	Nutrient Cycling
Habitat Functions	Refugia	Supporting Services	Primary Production	Habitats for Species
			Photosynthesis	Maintenance of Genetic Diversity
Information Functions	Cultural	Cultural Services or Cultural Amenity	Aesthetic Values	Aesthetic Information
			Cultural Heritage	Recreation and Tourism
			Recreation and Ecotourism	Inspiration for culture, are and designs
			Spiritual and Religious	Spiritual Experience
	Recreation		Educational Values	Information for Cognitive Development

나. 생태계서비스 관련 선행연구

학술논문 데이터베이스 플랫폼인 Scopus에서 'Ecosystem Service' 단어가 포함되는 논문 제목, 요약, 키워드를 검색한 결과, 2021년 11월 8일 기준 58,220개의 문헌이 검색되었다. 2000년대부터 생태계서비스 평가 관련 연구가 꾸준히 증가하고 있으며, 2017년부터 매년 꾸준히 5,000개 이상의 문헌이 발표되고 있으며 현재 2021년에 발표된 문헌만 7,060개인 것으로 검색되었다. 국내의 경우 DBpia에서 '생태계서비스' 단어가 포함되는 문헌 검색 결과, 국내학술논문은 1,029개, KCI 등재 학술지에 게재된 논문은 462건이 검색되었다. 생태계서비스에 관해 국외만큼 활발히 연구가 진행되는 것은 아니지만 우리나라 역시 2000년대에 비해 2010년대부터 연구가 증가하고 있으며, 최근 3년간 376개의 문헌이 발표되었다.

- Choi et al.(2016a)은 우리나라 산림 생태계서비스의 정량화 모델 적용을 위한 연구를 진행하였으며, 총 12개의 주요 생태계서비스를 확인하고 4개의 생태계 기능으로 범주화하여 각 기능을 추정하였다. 결과의 지도화를 통해 생물다양성이 풍부한 보호지역과 그 주변의 생태계서비스를 식별 가능한 것으로 기술하였다.
- Arunyawat S. and Shrestha R.P.(2016)은 생태계서비스와 트레이드오프 통합 분석이 가능한 InVEST의 4개 모델을 적용하여 태국 북부의 토지 이용 변화와 이로 인해 생태계서비스에 미치는 영향을 평가하였으며, GIS를 이용해 지도화 하였다. 연구 결과 연구 기간 동안 생태계서비스는 계속해서 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 농업지역에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 생태계서비스의 공간적·시간적 중첩을 통해 생태계서비스를 고려한 적절한 토지 이용 방안을 제시할 수

있을 것으로 평가하였다.

- Vorstius A.C. and Spray C.J.(2015)은 지역 수준에서의 계획과 의사결정을 지원하기 위해 생태계서비스를 지도화하는 InVEST, EcoServ-GIS 그리고 SENCE를 포함한 3가지 모델을 비교하였다. 비교 결과 각 모델마다 생성되는 생태계서비스의 지도가 다소 차이가 있는 것을 확인하였으며, 향후 연구 특성에 맞는 도구를 선정하여 검토할 필요가 있음을 시사하였다.
- Keller A.A. et al.(2015)은 다양한 기준의 Heuristic 분석 방법을 사용하여 토지 이용 변화의 영향을 최소화하기 위한 생태계서비스 평가를 실시하였으며, 연구 결과를 통해 생태계서비스 손실을 최소화할 수 있는 잠재 개발 가능지역을 식별할 수 있음을 설명하였다.
- Sudirman N. et al.(2018)은 간척, 방파제 등 연안 개발이 연안생태계에서 제공되는 생태계서비스 중 블루카본에 미치는 영향을 파악하고자 InVEST Carbon 모델을 적용하여 과거, 현재, 미래의 자카르타 만을 평가하였으며, 평가 결과는 향후 연안 관리에 도움이 될 것으로 시사하였다.
- Delpy F. and Zari M.P.(2021)은 오세아니아의 재생 도시 설계를 위한 생태계서비스 평가 도구를 식별하기 위해 다양한 생태계서비스 평가 도구들을 비교하였으며, 95개의 생태계서비스 평가 도구 중 도시 설계와 적합한 생태계서비스 평가가 가능한 도구는 4개인 것을 확인하였다.
- Hou Y. et al.(2016)은 중국의 Dianchi 강 유역을 대상으로 인간에 의한 유역과 토지 이용이 생태계서비스에 미치는 영향을 파악하기 위해 연구 지역의 순 1차 생산성, 서식지 가치, 증발산, 질소 보유, 생태계서비스-식량 공급 등을 조사하였으며, 환경과 생태계서비스에 미치는 영향을 고려한 토지 이용과 개발이 이루어져야 함을 강조하였다.

- Wei F. and Zhan X.(2019)은 급격한 도시화로 인한 생태계서비스 손실과 지속가능성 저하를 우려하여 생태계서비스 평가를 통한 도시 성장의 경계선을 정의하기 위한 평가를 진행하였다. InVEST의 Habitat Quality, Carbon Storage, Water Yield, Sediment Retention 등의 평가 모델을 적용하였으며, 연구 결과를 바탕으로 우선적으로 보전해야 될 지역을 결정할 수 있는 것으로 나타났다.
- 환경부(2016)에서는 생태계서비스 평가를 지역과 국가 단위에서 적용할 수 있도록 생태계서비스 가이드라인을 작성하였으며, 시뮬레이션이 가능한 모델로 InVEST, LPJmL, ARIES, MIMES를 제시하였다.
- 안소은(2013)은 의사결정 지원을 위해 생태계서비스 정의와 분류에 관련된 선행연구들을 비교하였으며, 분석 결과 특정 정책 목표에 대한 의사결정을 하기 위해서는 정책의 목적에 알맞은 생태계서비스와 분류체계를 정의해야할 필요가 있음을 설명하였다.
- 전성우 외(2013)는 임상도와 토지피복도를 활용한 생태계서비스 가치를 평가하기 위해 산림 질적 특성을 고려한 유형을 분류하고자 하였다. 연구 결과 자연자산이 가지는 생태계서비스 기능과 가치를 정량적으로 평가하는 연구가 필요함을 시사하였다.
- 이현우 외(2015)는 자연자본의 지속가능성을 위한 의사결정 지원도구 개발을 위해 생태계서비스 분석을 실시하고자 InVEST, ARIES, MIMES 등 생태계서비스 가치 평가 기법을 조사하였다. InVEST 모델이 공급, 문화, 조절, 지지서비스 모두 평가가 가능하고 접근이 용이해 국내 적용성이 클 것으로 판단하여 한국형 의사결정 지원 도구로 선정하였으며, 본 연구에서는 InVEST의 서식지 질, 탄소보유량, 생태관광 가치 평가를 실시하였다.
- 이현우 외(2016)는 생태계서비스를 기반으로 한 자연자본의 지속가능성

지수를 개발하기 위해 자연자본 평가지수 개발 사례를 조사하고, 해양과 육상의 건강성지수와 지속가능성 지수 개발 체계를 세우기 위한 연구를 진행하였다.

- 국립생태원(2019)은 습지보호지역의 생태계서비스 평가를 위해 생태자산과 생태계서비스 평가체계와 절차를 구성하고, 생태계서비스를 가치화하는 방안에 대해 연구하는 등 국가 생물다양성 전략 및 지속가능한 발전목표(SDGs)에 기여하기 위한 가이드라인을 제시하였다.



2. InVEST 모델

가. InVEST 모델 개요

InVEST 모델은 자연 자본과 생태계서비스 관리에 대한 의사결정 지원 평가를 목적으로 Natural Capital Project와 스탠포드 대학에서 공동 개발한 모델이다(김태연 외, 2015; Sharp et al., 2020).

본 연구에서 사용된 InVEST(v.3.9.0)는 크게 지지 생태계서비스(Supporting Ecosystem Services), 최종 생태계서비스(Final Ecosystem Services), 도시 생태계서비스(Urban Ecosystem Service), 생태계서비스 분석을 용이하게 하는 도구(Tools to Facilitate Ecosystem Services), 지원 도구(Supporting Tools) 5가지로 구분되며, 탄소보유량 평가 및 서식지 가치 평가 등을 포함한 총 25가지의 세부 모델로 구성되어 있어 다양한 생태계서비스 평가가 가능하다. 정성·정량적으로 도출되는 생태계서비스 평가 결과를 지도화하여 분석하고, 경제적 가치 평가 및 상호거래 분석 등 다방면의 연구에서 활용되고 있다(김나영, 2018). 또한 사용자가 쉽게 접근해 사용할 수 있고, 결과의 오차율이 적은 것으로 알려져 InVEST 모델은 한국환경연구원(구. 한국환경정책평가연구원)에서 한국형 의사결정지원 평가를 위한 도구로 제시되어 생태계서비스 평가 연구에 적용되고 있다(서새별, 2017; 김나영, 2018; 환경부, 2016).

Table 2. Evaluation Categories of InVEST for Ecosystem Services

(Sharp et al., 2020)

Categories of Ecosystem Services	InVEST Model
Supporting Ecosystem Services	Habitat Quality
	Habitat Risk Assessment
	Pollinator Abundance: Crop Pollination
	Forest Carbon Edge Effect
Final Ecosystem Services	Carbon Storage and Sequestration
	Coastal Blue Carbon
	NDR: Nutrient Delivery Ratio
	SDR: Sediment Delivery Ratio
	Unobstructed Views: Scenic Quality Provision
	Visitation: Recreation and Tourism
	Wave Energy Production
	Offshore Wind Energy Production
	Marine Finfish Aquacultural Production
	Fisheries
	Crop Production
Urban Ecosystem Services	Annual Water Yield
	Seasonal Water Yield
	Urban Cooling Model
Tools to Facilitate Ecosystem Service Analyses	Urban Flood Risk Mitigation Model
	Coastal Vulnerability Model
	InVEST GLOBIO Model
Supporting Tools	RouteDEM
	Delineatelt
	Scenario Generator: Proximity Based
	InVEST Scripting Guide and API

나. InVEST 모델을 적용한 선행연구

국내·외에서는 기후조절, 생물다양성 등과 관련된 생태계서비스의 효과적인 관리를 위해 InVEST 모델 중 탄소보유량 및 서식지 질, 서식지 위험도 평가 모델 등을 적용한 평가 연구가 진행되고 있다. Scopus에서 ‘InVEST’ 단어로 검색한 결과 2021년 11월 8일 기준 1,897개의 문헌이 검색되었다. InVEST 모델이 개발되고 모델의 편리성과 접근성, 정확성이 검증되면서 점차 해당 모델을 적용한 연구가 증가한 것으로 판단된다. 2020년에는 323개의 문헌이 발표된 것으로 확인하였다.

- 정민곤(2013)은 연안 생태계와 지역 사회를 종합적으로 고려하여 연안의 보존, 개발의 균형을 위한 의사결정 지원 및 관리를 위해 InVEST의 서식지 위험도(Habitat Risk Assessment), 연안 취약성(Coastal Vulnerability), 여가활동(Recreation), 경관 질(Aesthetic Quality), 육상 생물다양성(Terrestrial Biodiversity), 육상 탄소 저장(Terrestrial Carbon Storage) 모델을 적용한 평가를 통해 서해와 남해 일대의 생태계서비스를 분석하였다.
- 김태연 외(2015)는 제주도를 중심으로 생물다양성 보전과 서식지 보호를 위해 인간 활동에 의한 서식지 영향을 파악하고자 InVEST의 서식지 질(Habitat Quality) 모델을 이용하였다. 평가 결과는 생태자연도와 비교하였으며, 우리나라에 적용하기 위한 향후 개선점을 제시하였다.
- 김나영(2018)은 서울시 내에 고립된 공원 녹지 중 서식지로서의 기능을 하는 녹지 패치를 대상으로 InVEST의 서식지 질(Habitat Quality) 모델을 적용하여 도시의 특성을 고려한 서식지 가치를 평가하였다.
- 국립공원연구원(2019)은 설악산, 덕유산, 무등산, 변산반도국립공원의 보

전 및 관리를 위하여 공급서비스(담수), 조절서비스(온실가스조절, 수질 조절 등), 지지서비스(서식지 등)와 관련된 생태계서비스 가치 평가를 위해 InVEST의 탄소 저장(Carbon Storage), 서식지 질(Habitat Quality), 물 공급량(Water Yield) 등의 모델을 적용한 연구를 진행하였으며, 개선점 마련과 결과 검증 등 후속 연구 연계가 필요함을 제시하였다.

- 최지영(2020)은 국내 생태계서비스 평가를 기반으로 한 개발 정책 활용을 위해 InVEST의 정성 평가인 서식지 질(Habitat Quality) 모델과 정량 평가인 탄소저장(Carbon Storage) 모델의 평가 결과를 중첩 분석하여 생태계서비스 가치를 평가하였다.
- 최지영 외(2021)는 서울시 내의 도심 습지 지역을 대상으로 습지가 지닌 생태계서비스 중 조절서비스(탄소저장)의 가치를 파악하고자 InVEST 탄소저장량(Carbon Storage) 추정 및 경제적 가치를 평가하였다.
- Guerry et al.(2012)은 연안과 해양생태계가 제공하는 생태계서비스 및 트레이드오프의 해양 통합 평가를 제시하기 위해 캐나다 밴쿠버 섬의 서부 해안을 대상으로 InVEST의 서식지 위험도(Habitat Risk Assessment), 수질(Water Quality) 모델을 이용하였다. 이를 통해 여러 해양 생태계서비스를 평가한 결과를 이용하여 해양 환경에 적합한 해양 공간계획(Marine Spatial Planning), 생태계 기반 관리(Ecosystem-based Management)를 위한 방안을 제시하는데 사용될 수 있음을 확인하였다.
- Studwell et al.(2021)은 바다새 보전을 위해 해양에서 발생하는 인간 활동으로 인한 교란을 평가하기 위하여 InVEST의 서식지 위험도(Habitat Risk Assessment) 모델을 이용하여 해양생태계의 서식지를

평가하였으며, 서식지 위험도 평가 모델과 Marxan 분석을 함께 적용하여 중요 서식지의 우선 순위를 설정하는데 효과적임을 확인하였다.

- Lin et al.(2017)은 대만 Wutu 지역의 서식지 질과 다양한 생태계서비스 보호를 위해 보전 지역을 체계적으로 설계하고자 InVEST의 서식지 질(Habitat Quality) 모델을 이용하여 생태계서비스가 높은 지역을 식별하였다.
- Zhang et al.(2020a)은 중국 북서부 칭하이성을 대상으로 도로 개발에 의해 생태계서비스와 생물다양성이 저하되는 정도를 파악하기 위해 InVEST의 서식지 질(Habitat Quality) 모델을 적용하여 서식지 가치를 평가하였으며, 도로 개발이 서식지 가치를 저하시키는 것으로 나타났다.
- Zhao et al.(2018)은 중국 칭하이-티베트 고원을 대상으로 토지피복 변화의 영향에 따른 탄소저장 변화량을 파악하기 위해 InVEST의 Carbon 모델을 이용하여 탄소저장량을 평가하였으며, 울타리와 동물의 배설물이 탄소저장에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- Zhang et al.(2020b)은 중국 두만강 유역 습지의 토지피복 변화가 생태계서비스에 미치는 영향을 평가하기 위해 InVEST의 서식지 질(Habitat Quality)와 탄소 저장(Carbon Storage) 모델을 적용하여 통합적인 가치 평가를 진행하였다. 이를 통해 습지 보전을 위해서 생태계서비스를 고려한 토지 이용 및 개발을 재고해야 함을 제시하였다.
- Zhai et al.(2020)은 급격한 도시화로 인해 연안 생태계에 미치는 위협 영향을 평가하기 위해 InVEST의 서식지 질(Habitat Quality)와 서식지 위험도(Habitat Risk Assessment)를 이용하여 중국 11개의 지방을 포함한 연안 지역을 평가하였다. 육지와 해양생태계를 평가한 결과를 종합적으로 분석하여 두 생태계를 고려한 생태계 보존 및 복원을 위한 중요 지역을 식별하였다.

Ⅲ. 부산 육상 지역 탄소보유량 및 경제적 가치 평가

1. 서론

최근 일상생활에서 겪고 있는 이상 기온과 같은 기후변화 현상은 인류의 탄소 배출에 의한 영향이 큰 것으로 알려졌다(IPCC, 2021). 이에 앞으로의 탄소 배출 감축을 위하여 세계 각국에서는 이산화탄소 총 배출량 0을 달성하기 위한 계획인 장기 저탄소 전략(LEDs)을 수립하여 추진 중에 있으며, LEDs의 5대 기본 방향 중 자연 생태 탄소 흡수 기능을 활용하여 탄소를 저감하는 자연기반해법이 제시되고 있다(환경부, 2021a). NBS(Natural-Based Solution)를 적용하기 위해서는 우선 탄소흡수 기능을 하는 생태계 각각의 탄소보유능을 파악해야 하며, 국내·외에서는 원격탐사, 지구통계, 환경변수 등과 관련된 회귀크리깅, k-NN, 회귀모형 등 다양한 기법을 활용해 생태계의 바이오매스를 추정하고 탄소보유량을 평가한 연구가 진행된 바 있다(노영희, 2016).

생태계서비스 기반 의사결정을 지원하는 평가 모델인 InVEST Carbon 모델은 생태계서비스 중 기후조절과 관련된 탄소보유량 평가에 가능하며, 접근이 쉽고 오차율이 적어 여러 연구에서 적용되고 있다(노영희, 2016). 국내에서는 InVEST Carbon 모델을 이용하여 국립공원을 대상으로 한 탄소보유량 평가 연구, 도시 내 습지생태계의 탄소보유량 및 가치 평가 연구, 개발사업 진행 전 토양중점관리지역 선정을 위한 탄소보유량 평가 연구 등이 진행되었다(Tomasso and Leighton, 2014; 국립공원연구원, 2019; 최지영 외, 2021; 김종성 외, 2017). 국외에서는 도시 확장의 잠재적인 영향을 고려하여 InVEST Carbon 모델을 이용해 탄소보유량을 평가한 연구, 자연

림의 탄소보유량 평가 연구, 고원의 토지피복 변화 영향에 따른 탄소보유 변화량 평가 등이 진행된 바 있다(He et al., 2016; Piyathilake et al., 2021; Zhao et al., 2018).

현재 탄소중립을 위한 세부 전략을 마련 중인 우리나라는 지역별 여건을 고려하여 효율적으로 탄소 배출을 저감하기 위해 지자체별 탄소중립 이행 방안을 마련하고 있다. 광주와 전북의 경우 도시의 탄소배출량을 고려하여 신재생에너지를 활용한 탄소 배출 저감 방안을 제시하였으며, 충남의 경우 탄소보유량을 고려한 관리 방안을 제시하기 위한 연구들이 진행된 바 있다 (광주혁신추진위원회, 2020; 장남정, 2021; 충남연구원, 2018). 부산은 산림, 연안, 습지 등 다양한 생태계를 포함하여 생태계 각각의 탄소보유 기능을 활용할 수 있는 이점을 지닌 지역으로 탄소중립 실천에 기여할 수 있는 중요 지역으로 고려된다. 하지만 계속되는 연안역과 도심 지역 개발로 인한 토지 피복 변화 및 서식지 훼손이 발생하면서 생태계의 탄소보유 기능이 저하될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 육상의 탄소보유량 평가가 가능한 InVEST Carbon 모델을 이용하여 부산 육상 지역의 탄소보유량을 추정하고 이들의 경제적 가치를 평가하고자 한다. 또한 과거 시점의 탄소보유량 평가를 통해 탄소보유 변화량을 분석하여 현재 시점과 비교하고자 한다. 본 연구 결과를 통해 부산 육상 지역의 토지 피복에 따른 탄소보유 능력을 파악하고, 탄소보유량을 고려한 부산 육상 지역의 관리 방안 및 탄소중립 실현을 위한 전략을 제시하는데 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

가. 연구 범위 및 지도 구축

2019년 기준 부산 육상 지역의 총 탄소보유량을 추정하고 경제적 가치 평가를 진행하였으며, 16개 구, 군별로 분류하여 행정구역별 탄소보유량을 평가, 비교하였다(Fig 2). 또한 과거와 현재의 토지 이용 변화에 따른 탄소보유량의 변화를 추정하기 위해 2007년 기준 탄소보유량 평가를 실시하였다. 2010년대 말 이전의 토지피복지도 중 부산 전체 지역을 포함하는 지도는 2007년 중분류 지도만 존재해 과거 시점을 2007년으로 설정하였다.

갯벌과 해양을 제외한 연구 범위에 해당하는 2007년의 부산 육상의 면적은 770,270,025m²이며, 2019년의 경우 777,210,275m²이다. 토지 이용에 따라 시가지, 농업지역, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역으로 구분하여 평가를 실시하였다.

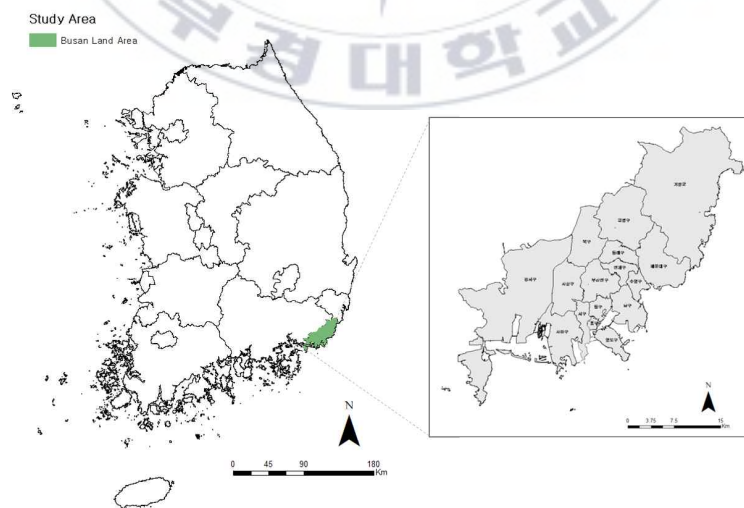


Fig 2. Study Area (Terrestrial Area in Busan)

연구에 필요한 지도는 Arc GIS MAP 10.5.1 프로그램을 사용하여 구축하였다. 환경부에서 제공된 2007년 중분류 및 2019년 세분류 토지피복지도를 이용하여 해상도 5m의 래스터 형태로 구축하였다(환경부, 2007; 환경부, 2020).

나. InVEST Carbon 모델

Carbon 모델은 생태계서비스 중 기후조절과 관련된 육상생태계의 탄소보유량을 평가하는 모델로, 과거, 현재, 미래와 같은 특정 시점의 탄소보유량 평가가 가능하다(국립공원연구원, 2019). 육상 지역의 산림, 초지, 내륙 습지 등의 생태계는 탄소를 보유함으로써 대기 중의 이산화탄소를 줄여 기후 위기에 대응하는 역할을 한다. 육상 지역은 식생에 의해 탄소를 보유하며, 식생의 지상부와 지하부 생체량, 토양, 고사목 등으로 탄소를 저장하게 된다(Fig 3).

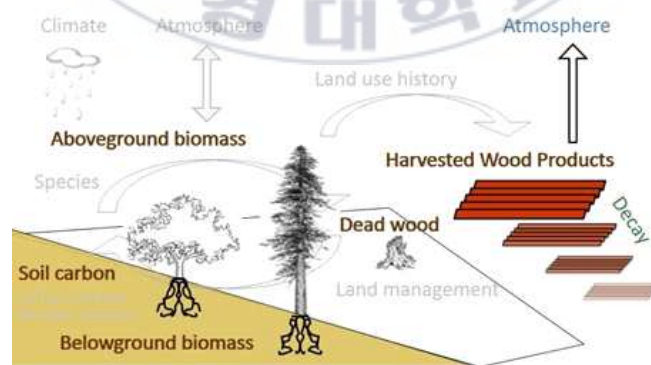


Fig 3. InVEST Carbon Model Process
(Sharp et al., 2020)

Carbon 모델의 입력 자료는 Table 3과 같다. 본 모델은 토지 이용에 따른 탄소보유량을 평가하며, 토지피복도를 이용해 변화하는 생태계의 탄소보유량을 파악할 수 있다. Eqs 1, 2를 이용해 토지피복도의 토지 이용별 면적(A_i)과 단위면적당 탄소보유계수(C_i) 값을 입력하여 총 탄소보유량(C_{Land})을 계산하게 된다.

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

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

탄소보유계수(C_i)는 토지 이용에 따라 각 토지의 지상부 생체량(C_{above}), 지하부 생체량(C_{below}), 토양(C_{soil}), 고사목(C_{dead})에 보유되는 탄소량을 나타내며, 국내외 선행연구에서 사용된 계수를 참고하여 적용하였다(Tomasso and Leighton, 2014; 노영희 외, 2016).

Table 3. Input data of InVEST Carbon Model

(Sharp et al., 2020 참고)

Required Input Data	Explanation	Format	Reference
Land Cover Map	A Land Cover Map Containing Codes for Each Land Use	Raster (.tif)	Ministry of Environment
Carbon Pool of LULC Class	Carbon Retention Coefficient per Unit Area Held by Land Use	Table (.csv)	Tomasso and Leighton, 2014; Roh et al. 2016

다. 경제적 가치 평가

본 연구에서는 시장 가격 및 탄소의 사회적 비용(Social Cost of Carbon, SCC)을 이용하는 두 가지 접근 방식으로 부산 육상 지역에 보유된 탄소의 경제적 가치를 추정하였다. 시장 가격의 경우 환경부 온실가스종합정보센터에서 제시한 2019년 전체배출권의 평균 탄소 거래가격인 28,440원/Ton·CO₂를 적용하여 추정하였다(온실가스종합정보센터, 2021). 하지만 국내에서 거래되는 탄소량은 제한적이고 배출량과 거래가격이 여러 조건에 따라 상대적으로 변동되는 한계점이 있어 시장 가격을 적용한 가치 평가 시 저평가 혹은 고평가될 수 있으므로 주의해야 한다(이창훈 외, 2016). 또한 시장 가격은 탄소 배출을 저감하기 위한 사회적 비용보다 과소 평가되고 있는 경향이 있어 Michaelowa et al.(2003)은 기후변화에 기초한 탄소의 사회적 비용을 적용하는 것을 권장하였다. 탄소의 사회적 비용은 1 Ton의 CO₂를 배출할 때 이로 인해 발생하는 손실을 막기 위해 우리 사회가 지불해야 하는 경제적 비용을 뜻한다(성웅기 외, 2020). 선행연구에서 우리나라에 적합한 할인율을 2.5~3%로 제시하였으며, 이에 본 연구에서는 미국의 2020년 3% 할인율 기준 \$51/Ton·CO₂를 우리나라 환율로 전환해 60,182.55원/Ton·CO₂(2020년 평균 환율 \$1=1,180.05원)을 적용하여 부산 육상 지역에 보유된 탄소의 사회적 가치를 추정하였다(이지웅 외, 2015; IWG, 2021).

3. 결과 및 고찰

가. 부산 전체 육상 지역의 탄소보유량

부산 육상 지역의 탄소보유량 평가 결과를 Table 4, Fig 4에 제시하였다. 초록색에 가까울수록 탄소보유량이 많은 것으로 해석한다. 탄소보유량 추정 결과 총 1,019만 Ton·C($13.1 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)을 보유하는 것으로 나타났다. 산림 지역이 전체 탄소보유량 중 약 81.15%(약 827만 Ton·C)로 보유량이 가장 많았으며, 나지 지역이 전체 탄소보유량 중 약 0.03%(3,423 Ton·C)로 보유량이 가장 작았다. 단위면적당 탄소보유량 계산 결과 산림 지역이 약 $25 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 높았으며, 나지 지역이 $0.07 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 낮았다.

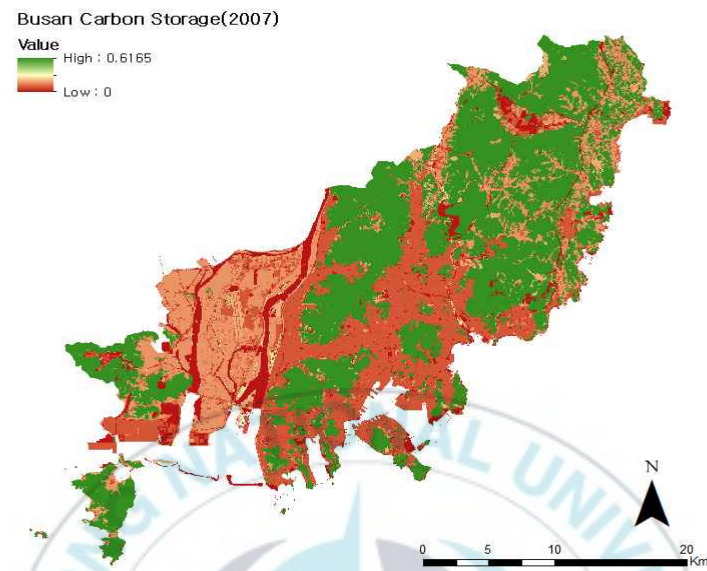
과거와 현재의 토지 피복 변화에 따른 탄소보유량을 비교하기 위해 2007년 기준 부산 육상 지역의 탄소보유량 추정 결과 약 1,040만 Ton·C($13.5 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)을 보유하는 것으로 나타났다. 2007년에 비해 2019년 평가 결과 면적의 경우 연안역의 공유수면 매립, 항만 건설 등으로 해양 일부 지역이 육상 지역으로 변경되면서 약 694만 m^2 가 증가하였지만, 약 2.01%(21만 Ton·C)의 탄소보유량이 감소한 것으로 나타났다. 특히 탄소보유량의 변화가 큰 지역 중 농업 지역의 경우 2007년 대비 2019년 약 39.8%의 면적이 감소하였으며 초지 지역의 경우 2007년 대비 2019년 약 41.9%의 면적이 증가하였다(Fig 5). 낙동강하구 수변 생태공원 사업, 주거지(명지오션시티, 명지국제신도시, 에코델타시티 등), 미음일반산업단지 등의 개발로 농업 지역이 감소하고 시가지, 나지, 초지 지역이 증가한 것으로 나타났다. 초지 지역이 증가하면서 해당 토지 피복의 탄소보유량은 증가하였지만 농업 지역과 산림 감소 및 시가지와 나지의 증가로 총 탄소보유량이 감소하였다. 탄소를 고려하지 않은 개발 행위는 탄소를 보유하는 생태계를 훼손하고,

탄소보유 뿐만 아니라 잠재적인 탄소흡수원의 파괴로 이어짐을 인식해야 한다.

Table 4. Area and Carbon Storage of Terrestrial Area in Busan

LULC	C Storage (2007)		C Storage (2019)		Amount of Change (2019-2007)
	Area(m ²)	C Storage (Ton · C)	Area(m ²)	C Storage (Ton · C)	C Storage (Ton · C)
Urban	199,889,375 (25.95%)	675,426 (6.50%)	202,612,150 (26.07%)	684,626 (6.72%)	(+) 9,200 (1.36%)
Farmland	127,108,350 (16.50%)	861,668 (8.29%)	76,543,050 (9.85%)	518,885 (5.09%)	(-) 342,782 (39.78%)
Forest	349,186,325 (45.33%)	8,610,935 (82.81%)	335,297,975 (43.14%)	8,268,448 (81.15%)	(-) 342,487 (3.98%)
Grassland	22,340,650 (2.90%)	183,059 (1.76%)	75,636,300 (9.73%)	619,764 (6.08%)	(+) 436,705 (238.56%)
Wetland	4,466,750 (0.58%)	64,469 (0.62%)	6,483,800 (0.83%)	93,581 (0.92%)	(+) 29,112 (45.16%)
Barren	39,772,775 (5.16%)	2,625 (0.03%)	51,862,125 (6.67%)	3,423 (0.03%)	(+) 798 (30.40%)
Water	27,505,800 (3.57%)	0 (0%)	28,774,875 (3.70%)	0 (0%)	0
Total	770,270,025	10,398,182	777,210,275	10,188,728	(-) 209,454 (2.01%)

(a)



(b)

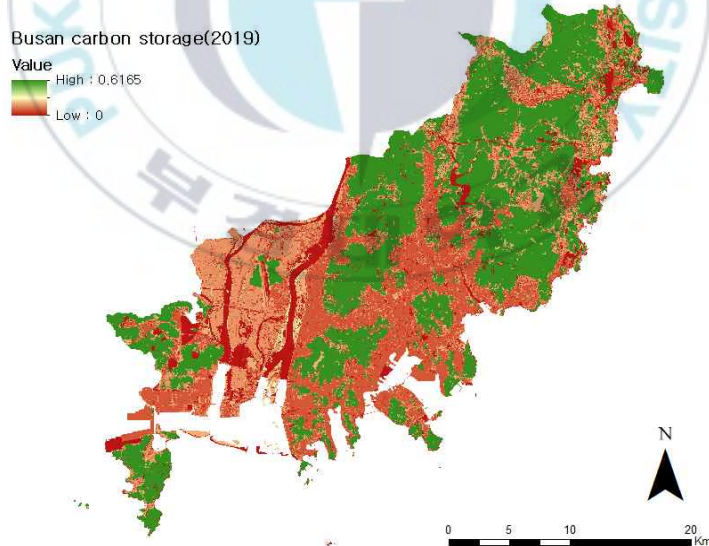


Fig 4. Carbon Storage of Terrestrial Area in Busan.
(a) 2007, (b) 2019

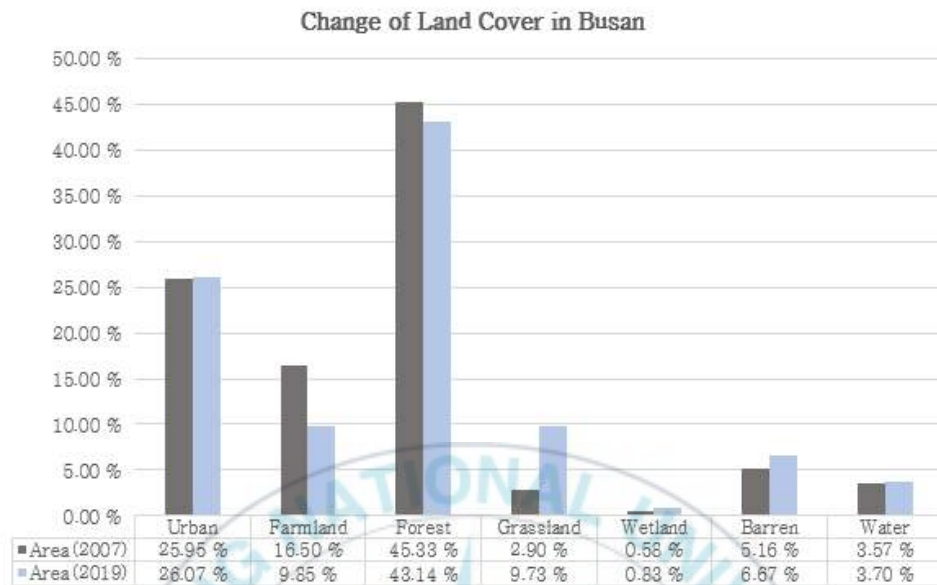


Fig 5. Change of Land Cover in Busan(Area, %)

나. 행정구역별 탄소보유량

행정구역별 탄소보유량 평가 결과를 Table 5, Fig 6, 7, 8에 제시하였다. 16개의 구, 군을 3개의 권역으로 구분하여 비교한 결과 동부산이 2007년 총 탄소보유량 약 646만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ ($16.0 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$), 2019년 총 탄소보유량 약 631만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ ($15.6 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)로 탄소보유능이 가장 높은 권역으로 추정되었다. 2007년 기준 동부산 전체의 약 88.5%, 2019년 기준 약 87.0%가 산림 지역으로 구성되어 있어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다 (Fig 9). 중부산의 경우 탄소보유량이 작은 동구(전체의 약 0.87%), 중구(전체의 약 0.14%)를 포함하고 있어 권역 중 가장 낮게 나타난 것으로 판단된다.

2007년 행정구역별 총 탄소보유량 평가 결과 면적이 가장 큰 기장군이 약 396만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ ($18.1 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)로 가장 많았으며, 면적이 가장 작은 중구가 약 1.5만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ ($5.1 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)로 가장 적은 것으로 나타났다. 단위면적당 탄소보유량은 기장군, 금정구, 북구 순으로 높았으며, 중구, 수영구, 연제구 순으로 낮았다. 2019년 행정구역별 총 탄소보유량을 비교하였을 때 기장군이 약 377만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ ($17.1 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)로 가장 많았으며, 중구가 약 1.4만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ ($4.8 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$)로 가장 적은 것으로 나타났다. 기장군의 경우 2007년보다 4.87%(약 19만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$) 정도의 탄소보유량이 줄었으며 가장 큰 감소율을 보였다. 행정구역별 단위면적당 탄소보유량을 계산하였을 때 기장군, 금정구, 해운대구 순으로 높았으며, 중구, 부산진구, 수영구 순으로 낮았다. 총 탄소보유량에 비해 단위면적당 탄소보유량이 낮은 것으로 나타난 강서구는 행정구역 중 2번째로 면적이 크지만 토지 피복 중 탄소보유능이 비교적 낮은 시가지, 농업지역, 나지의 비율이 26.5%로 행정구역 중 두 번째로 높아 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

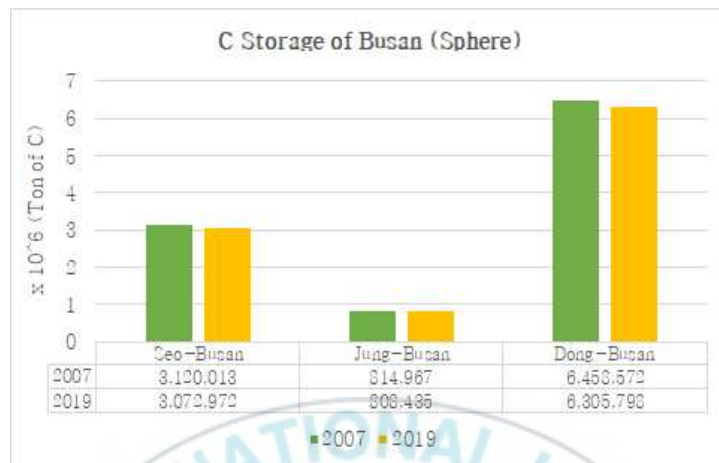


Fig. 6. Carbon Storage in Busan(Sphere)

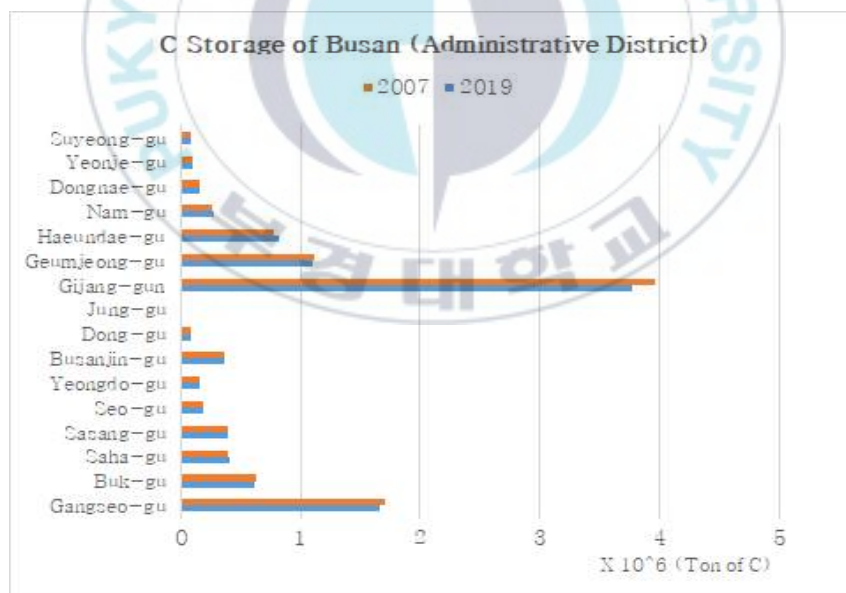
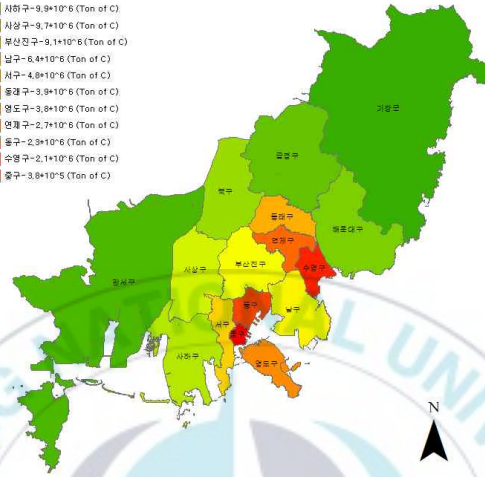


Fig. 7. Carbon Storage in Busan(Administrative District)

(a)

Carbon Storage of Administrative Districts(2007)

carbon



(b)

Carbon Storage of Administrative Districts(2019)

Carbon

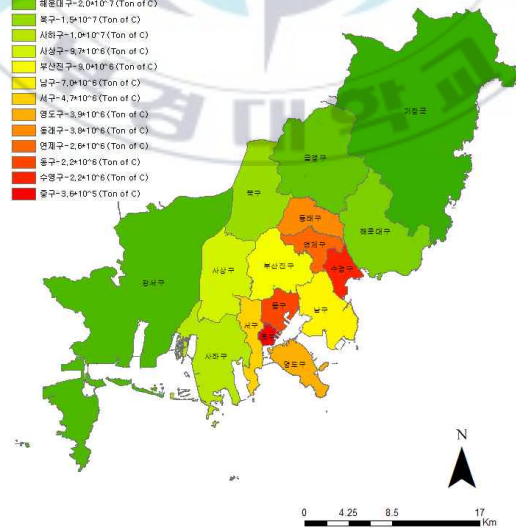
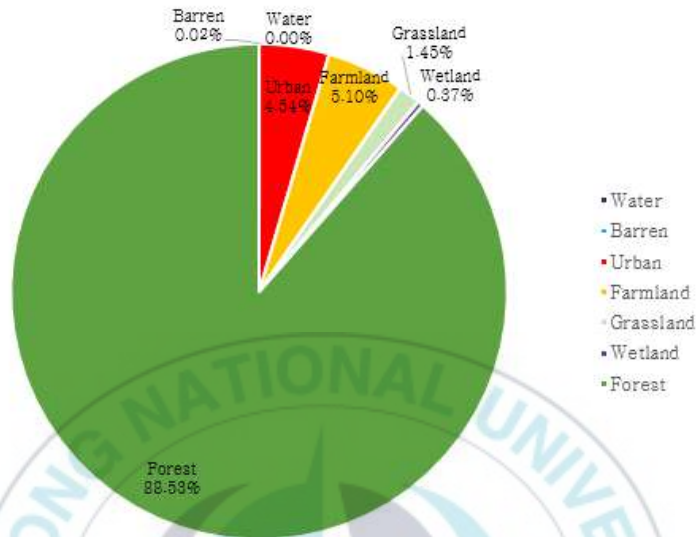


Fig 8. Carbon Storage of Administrative District.

(a) 2007, (b) 2019

(a)

Carbon Storage in Dong-Busan (2007)



(b)

Carbon Storage in Dong-Busan (2019)

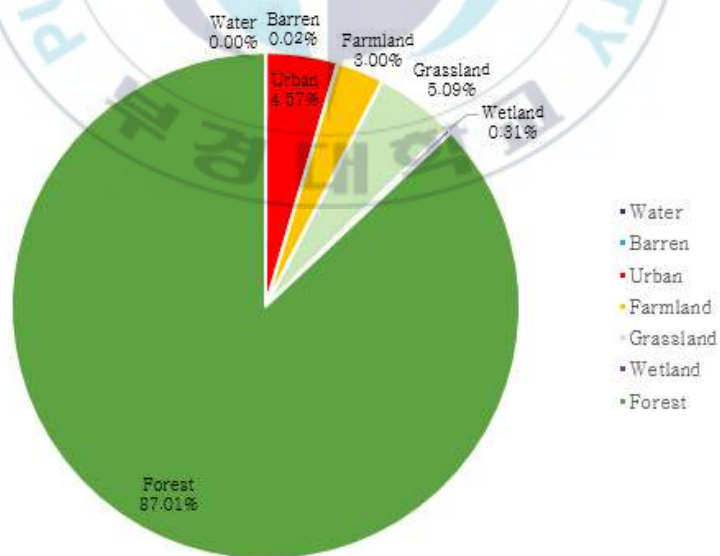


Fig 9. Carbon Storage in Dong-Busan. (a) 2007, (b) 2019

Table 5. Carbon Storage by Administrative District

Sphere	Administrative District	2007 C Storage (Ton · C)		2007 C Storage (kg · C/m ²)	
Seo -Busan	Gangseo-gu	3,120,013	1,702,283	10.5	9.5
	Buk-gu		634,471		15.9
	Saha-gu		394,715		9.7
	Sasang-gu		388,544		10.7
Jung -Busan	Seo-gu	814,967	193,861	11.6	13.9
	Yeongdo-gu		152,221		10.4
	Busanjin-gu		363,847		12.2
	Dong-gu		90,011		9.4
	Jung-gu		15,028		5.1
Dong -Busan	Gijang-gun	6,458,572	3,963,018	16.0	18.1
	Geumjeong-gu		1,118,669		17.0
	Haeundae-gu		773,497		14.8
	Nam-gu		256,639		9.6
	Dongnae-gu		154,930		9.3
	Yeonje-gu		106,070		8.7
	Suyeong-gu		85,747		8.3
Sphere	Administrative District	2019 C Storage (Ton · C)		2019 C Storage (kg · C/m ²)	
Seo -Busan	Gangseo-gu	3,072,972	1,667,742	10.2	9.1
	Buk-gu		611,101		15.3
	Saha-gu		404,201		9.8
	Sasang-gu		389,928		10.8
Jung -Busan	Seo-gu	808,435	188,772	11.4	13.5
	Yeongdo-gu		154,437		10.7
	Busanjin-gu		361,572		12.1
	Dong-gu		89,267		8.8
	Jung-gu		14,386		4.8
Dong -Busan	Gijang-gun	6,305,798	3,770,060	15.6	17.2
	Geumjeong-gu		1,095,232		16.7
	Haeundae-gu		814,918		15.6
	Nam-gu		281,443		10.4
	Dongnae-gu		152,798		9.2
	Yeonje-gu		104,328		8.6
	Suyeong-gu		87,020		8.4

다. 경제적 가치

부산 육상 지역에 보유된 탄소의 경제적 가치를 시장 가격으로 추정한 결과 2007년 1,220원/m², 2019년 1,185원/m²로 2007년보다 약 35원/m²(2.9%) 감소한 것을 알 수 있다. 권역별 탄소보유량을 경제적 가치로 환산하였을 때 보유량이 가장 많은 동부산은 2007년 1,447원/m², 2019년 1,411원/m²로 약 36원/m²(2.5%) 감소한 것으로 나타났다. 서부산은 2007년 953원/m², 2019년 920원/m²로 경제적 가치가 약 32.34원/m²(3.4%) 감소하였으며, 권역 중 보유량이 가장 작은 중부산은 2007년 1,046원/m², 2019년 1,025원/m²로 경제적 가치가 약 20.73원/m²(2.0%) 감소한 것으로 추정된다. 행정구역 중 보유량이 가장 많은 기장군의 경제적 가치는 2007년 1,631원/m², 2019년 1,550원/m²로 약 80.85원/m²(5.0%) 감소하였으며, 보유량이 가장 작은 중구의 경제적 가치는 2007년 462원/m², 2019년 434원/m²로 28.19원/m²(6.1%) 감소한 것으로 추정된다.

탄소의 사회적 비용으로 경제적 가치를 추정한 결과 2007년 2,982원/m², 2019년 2,895원/m²로 2007년보다 약 86원/m² 감소한 것으로 도출되었다. 동부산은 2007년 3,536원/m², 2019년 3,449원/m²로 88원/m² 감소한 것으로 나타났다. 서부산은 2007년 2,329원/m², 2019년 2,250원/m²로 경제적 가치가 약 79원/m² 감소하였으며, 중부산은 2007년 2,557원/m², 2019년 2,506원/m²로 경제적 가치가 약 51원/m² 감소한 것으로 추정된다. 행정구역 중 기장군의 경우 2007년 3,987원/m², 2019년 3,789원/m²로 2007년보다 198원/m² 감소하였으며, 중구는 2007년 1,129원/m², 2019년 1,060원/m²로 69원/m² 감소한 것으로 추정된다. 전체적으로 2007년 대비 2019년 도심지 개발로 인해 탄소보유능이 낮은 토지피복 유형으로 전용되면서 탄소보유량 감소 및 경제적 손실이 발생한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부산 육상 지역의 탄소보유량 및 경제적 가치를 추정하기 위해 생태계서비스 평가 모델인 InVEST Carbon 모델을 이용하여 평가를 실시하였으며, 과거 시점과 현재 시점의 탄소보유량 변화를 분석하였다.

평가 결과 권역별 및 행정구역별 단위면적당 탄소보유량은 동부산 및 기장군, 금정구 등이 높은 것으로 나타났으며, 중부산 및 중구, 부산진구, 수영구 등이 낮은 것으로 나타났다. 탄소보유량이 낮은 구역은 시가지와 나지의 비율이 높아 부산의 다른 행정구역보다 탄소보유 기능이 높은 생태계가 적고 개발이 많이 진행된 것으로 추정할 수 있다. 또한 과거 부산 육상 지역의 탄소보유량 평가 결과와 비교하였을 때 과거에 비해 면적은 증가하였지만 개발로 인해 총 탄소보유량은 감소한 것으로 나타났다. 이는 탄소보유 기능이 높은 중요 생태계가 훼손되거나 사라졌을 가능성이 높은 것을 의미하며, 탄소보유량 뿐만 아니라 탄소흡수원이 제거되는 것이기 때문에 잠재적인 탄소 가치를 고려하여 토지를 이용할 필요가 있다. 또한 본 연구에서 사용된 탄소보유계수는 시간 경과에 따른 탄소보유의 변화를 고려하지 못하기 때문에 현재 추정된 보유량보다 더 많이 보유했을 가능성이 있어 향후 탄소 보유 변화를 나타낼 수 있는 탄소보유계수의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 향후 부산시 탄소중립 실현을 위한 전략 수립 시 부산 육상 지역 전체와 구·군별 탄소보유량 현황 및 개발 전-후 변화량을 비교하여 개발규제지역 선정 및 중요 생태계의 탄소보유능에 대한 영향 최소화 방안을 제시하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

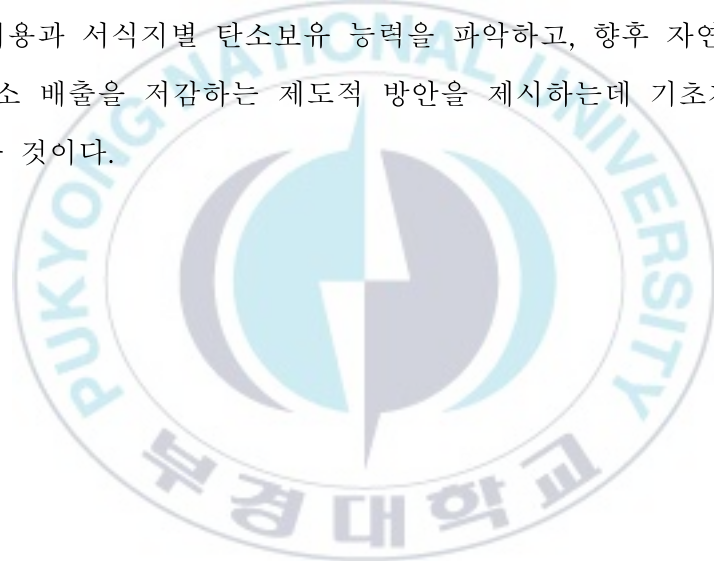
IV. 부산 연안역 탄소보유량 및 경제적 가치 평가

1. 서론

인류의 생존을 위협하는 기후변화에 대응하기 위하여 제48차 IPCC 총회에서는 2050년까지 전 지구 이산화탄소 총 배출량이 제로를 달성해야 함을 제시하였다(IPCC, 2018). 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 탄소배출량을 감축하기 위하여 장기저탄소발전전략(LEDs) 수립 등 탄소중립 목표를 이루기 위해 노력하고 있다(환경부, 2021a). 탄소배출량을 줄이기 위해 탈탄소 산업구조 형성, 대체에너지 개발 등 여러 정책의 추진과 더불어 생태계의 탄소 흡수 기능을 활용하여 탄소를 저감하는 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(국립공원연구원, 2019; Tomasso and Leighton, 2014).

생태계서비스 기반의 의사결정 지원 평가 모델인 InVEST는 기후조절과 관련된 생태계서비스 평가가 가능하며, 육상 생태계의 탄소보유량을 평가하는 Carbon과 해양 생태계의 탄소보유량을 평가하는 Coastal Blue Carbon이 있다. 선행연구들에 따르면 InVEST 모델은 사용자가 쉽게 접근해 사용할 수 있고, 결과의 오차율이 적은 것으로 알려져 의사결정의 기초 자료로 사용될 수 있다(노영희, 2016; 최지영 외, 2019). 국내에서는 국립공원, 습지 생태계, 도시개발지역 등 육상 지역을 대상으로 InVEST Carbon 모델을 적용한 탄소보유량 추정 및 가치 평가 연구들이 진행된 바 있다(최지영 외, 2021; 김종성 외, 2017; 국립공원연구원, 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 탄소보유 기작이 다소 다른 두 생태계를 동시에 고려한 탄소보유 평가 연구는 많이 연구되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 생태계서비스 평가 모델인 InVEST를 이용해 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량을 추정하고 이들의 가치를 평가하고자 한다. 또한 다양한 개발 시나리오 분석을 통해 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량 변화를 파악하고자 한다. 본 연구 결과를 통해 부산 연안역의 토지 이용과 서식지별 탄소보유 능력을 파악하고, 향후 자연기반해법을 이용한 탄소 배출을 저감하는 제도적 방안을 제시하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.



2. 연구 방법

가. 연구 범위

본 연구에서는 2019년을 기준으로 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량을 추정하고 경제적 가치 평가를 진행하였다. 연안관리법에 따라 연안 육역의 범위는 해안선 기준 육지 방향으로 500m 이내로 설정하였으며, 항만, 국가 어항 혹은 산업단지의 경우 1,000m 이내의 육지 지역으로 설정하였다. 연안 해역은 해안선 기준 해양 방향으로 500m 이내의 지역으로 설정하였다(Fig 10). 연구 범위에 해당하는 연안 육역 면적은 143,609,300m², 연안 해역 면적은 133,152,600m²이다.

부산 연안 육역은 토지 이용에 따라 시가지, 농업지역, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역으로 분류하여 탄소보유량 평가를 시행하였으며, 연안 해역은 해수의 물리화학적 탄소흡수 기작을 제외한 생물학적 탄소흡수 기작을 고려하여 갈피, 갈대, 새섬매자기, 갯벌, 양식장(해조류, 패류, 복합)등의 지역을 대상으로 탄소보유량 평가를 실시하였다.

또한 2019년 기준 부산 전체 육상 지역의 탄소보유량 평가 결과와 비교하였으며, 현재 추진 중이거나 개발 계획이 있을 지역을 고려하여 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량 변화를 추정하였다. 연안 육역의 경우 오시리아 관광단지 일부 지역, 에코델타시티 일부 지역을 포함하였으며, 연안 해역의 경우 공유수면 매립 계획 일부 지역과 신항만 건설 예정 일부 지역을 포함하여 평가를 진행하였다.

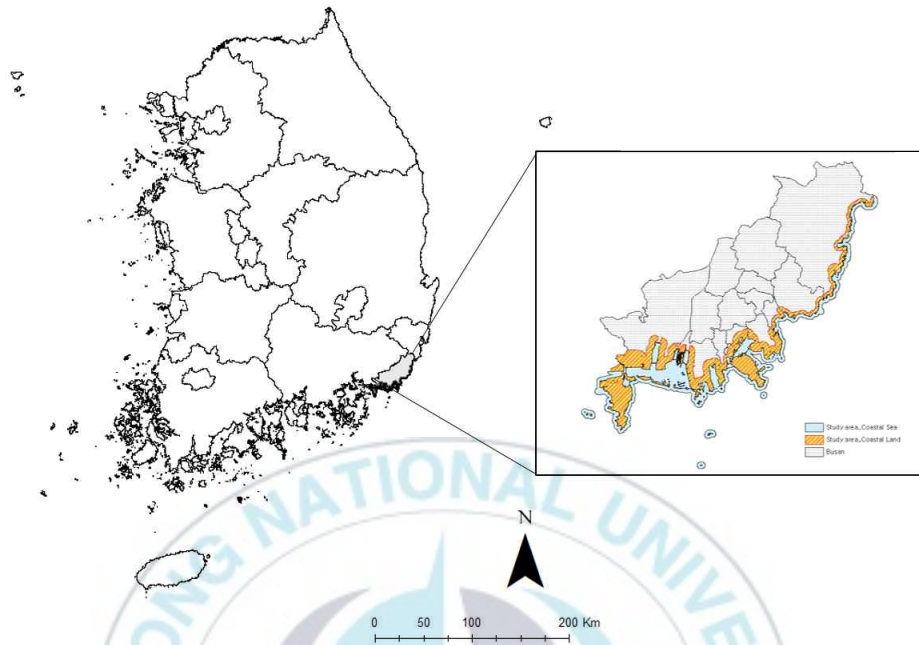


Fig 10. Study Area (Coastal Land and Sea in Busan)

나. 지도 구축

지도는 Arc GIS MAP 10.5.1 프로그램을 사용하여 구축하였다. 연안 육역의 경우 환경부에서 제공된 2019년 대분류, 세분류 토지피복도를 활용해 해상도 5m의 raster 형태로 구축하였다(환경부, 2020). 연안 해역의 경우 국립해양조사원의 재질분포도와 2019년 세분류 토지피복도를 활용해 구축하였으며, 탄소가 보유되는 서식지로 선정한 양식장, 잡피, 새섬매자기, 갈대 등의 지도는 낙동강관리본부 낙동강하구에코센터, 국가공간정보포털, 국가해양정보마켓센터에서 제공되는 자료를 이용하였다(국가해양조사원, 2021; 환경부, 2020; 국토교통부, 2021).

다. InVEST Carbon 모델

연안 육역의 탄소보유량 평가에 사용된 Carbon 모델은 토지피복도와 토지 이용별 탄소 보유계수를 기반으로 탄소보유량을 평가하는 모델로, 토지 이용별 면적과 단위면적당 탄소 보유계수 값을 통해 연안 육역의 총 탄소 보유량을 계산하게 된다(Sharp et al., 2020). C_{Land} 는 총 탄소보유량을 나타내며, i 는 토지 이용유형, C_i 는 토지 이용별 탄소보유량, A_i 는 토지 이용별 면적을 나타낸다(Eq. 1). 탄소 보유계수는 토지 이용에 따라 각 토지의 지상부, 지하부 생체량(C_{above} , C_{below}), 토양(C_{soil}), 고사목(C_{dead})에 보유되는 탄소량을 나타낸다(Eq. 2).

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

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

라. InVEST Coastal Blue Carbon 모델

연안 해역의 탄소보유량 평가에 사용된 Coastal Blue Carbon 모델은 해양 지역의 생물학적 탄소보유 기작을 바탕으로 탄소보유량을 추정하는 모델로, 초기 탄소량, 반감기, 연간 탄소 축적량 등을 고려하여 생체량(Biomass), 토양(Soil), 사체(Litter)에 보유되는 탄소를 합산해 평가한다(Fig 11).

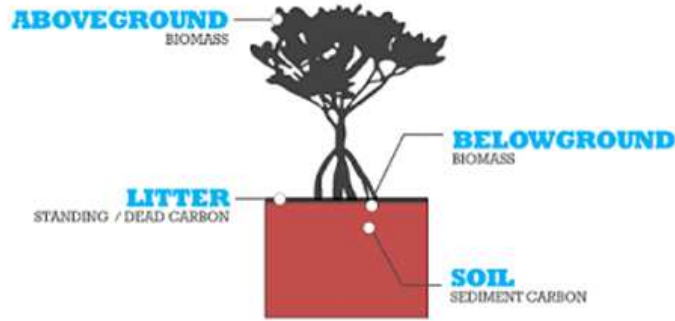


Fig 11. InVEST Coastal Blue Carbon Model Process

(Sharp et al., 2020)

연안 해역의 탄소보유량 평가에 이용되는 수식은 Eq. 3과 같다. 여기서 $C_{s,t}$ (MegaTon)는 연안 해역의 총 탄소저장량을 나타내며, p 는 서식지 유형, t 는 시점, $C_{p,t}$ 는 연구 시점의 서식지 유형별 탄소저장량, $N_{p,t}$ 는 연구 시점의 서식지 유형별 순 탄소저장 증가량을 나타낸다(Sharp et al., 2020).

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

$$C_{p,t} = C_{psoil,t} + C_{pbiomass,t} + C_{plitter,t} \quad (4)$$

Eq. 4의 $C_{psoil,t}$, $C_{pbiomass,t}$, $C_{plitter,t}$ 는 퇴적물과 생체 및 사체에 저장된 탄소량을 나타내며, 선행연구 자료가 부족하여 참고문헌 외 부족한 자료는 국내·외 선행연구에서 생물량 데이터를 활용하여 사용하였다(안순모 외, 2006; Byun et al., 2019; Choi et al., 2016b; 충남연구원, 2018; Dong et al., 2012; 김보라, 성기준, 2010; 김태환 외, 2008; Mok, 2019; Wahyundi et al., 2020; Yuan et al., 2020; 정승욱, 2021).

Coastal Blue Carbon 모델에 필요한 입력 자료는 Table 6에 제시하였다.

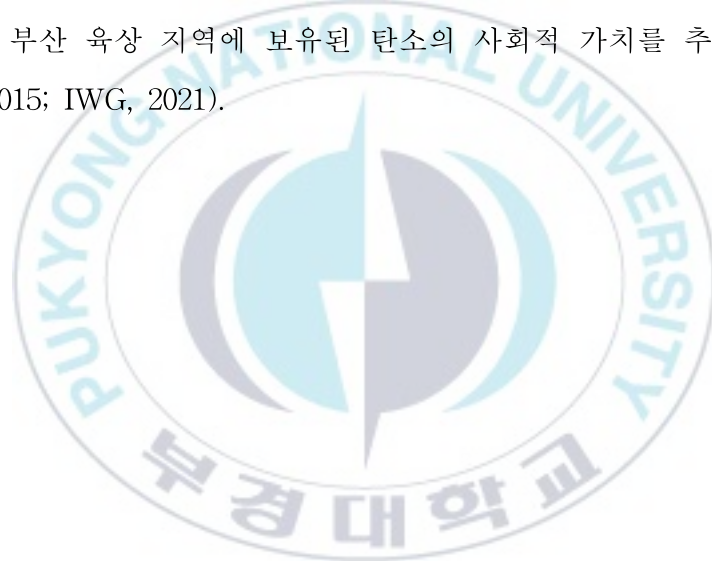
Table 6. Input Data of InVEST Coastal Blue Carbon Model

(Sharp et al., 2020 참고)

Required Input Data	Explanation	Format	Reference
Habitat Cover Map	A Habitat Cover Map Containing Codes for Each Habitat	Raster (.tif)	Ministry of Environment, KHOA
LULC Lookup Table	A Table of Habitat Name, Code, Value that Distinguishes whether It Is habitat or Not	Table (.csv)	
Biophysical Table	Carbon Retention Coefficient per Unit Area held by Habitat	Table (.csv)	Wahyundi et al., 2020; Choi et al., 2016b; Kim et al., 2008; Kim and Sung, 2010; Byun et al., 2019; Dong et al., 2012; Yuan et al., 2020; Ahn et al., 2006; Mok, 2019; CNI, 2018; Jung, 2021
Landcover Transitions Table	Table Showing Changes in Habitat Status according to Land Type Conversion	Table (.csv)	Sharp et al., 2020

마. 경제적 가치 평가

본 연구에서는 시장 가격과 탄소의 사회적 비용을 이용하여 부산 연안역에 보유한 탄소의 경제적 가치를 추정하였다. 시장 가격의 경우 2019년 전체 배출권의 평균 탄소 거래가격인 28,440원/Ton·CO₂를 적용하여 추정하였다(온실가스종합정보센터, 2021). 탄소의 사회적 비용은 선행연구에서 우리나라에 적합하다고 제시한 할인율 3% 기준 미국의 2020년 탄소의 사회적 비용인 \$51/Ton·CO₂(2020년 평균 환율 \$1=1,180.05원)을 우리나라 환율로 전환해 부산 육상 지역에 보유한 탄소의 사회적 가치를 추정하였다(이지웅 외, 2015; IWG, 2021).



3. 결과 및 고찰

가. 2019년 연안 육역 탄소보유량 및 경제적 가치

부산 연안 육역의 탄소보유량 평가 결과를 Table 7, 8, Fig 12에 제시하였다. 초록색에 가까울수록 탄소보유량이 많은 것을 의미한다. 2019년 연안 육역의 총 탄소보유량은 144만 Ton · C로 나타났다. 산림 지역이 전체 탄소보유량 중 약 71.8%를 차지해 보유량이 가장 많았으며, 나지 지역은 전체 탄소보유량 중 0.07%를 차지해 보유량이 가장 작았다. 또한 단위면적당 탄소보유량도 산림 지역이 $25 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 높았으며, 나지 지역이 $0.07 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 낮은 값을 나타냈다. 2019년 부산 연안 육역의 탄소보유량을 경제적 가치로 환산하였을 때 약 1,298억원으로 추정된다. 2019년 부산 연안 육역에 보유한 탄소에 대한 경제적 가치를 시장 가격 적용 시 약 1,044원/ m^2 (1,499억원)으로 추정되며, 탄소의 사회적 비용 적용 시 2,210원/ m^2 (3,173억원)으로 추정된다.

부산 육상 전체의 탄소보유량 추정 결과와 비교하였을 때 연안 육역의 총 탄소보유량은 부산 육상 전체의 약 14.1%만큼 저장하는 것으로 나타났다. 단위면적당 탄소저장량은 연안 육역의 경우 $10.0 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로, $13.1 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 인 부산 육상 전체와 비교할 때 전체의 약 76.3%로 연안 육역에서 탄소를 보유하는 기능이 더 낮은 것을 알 수 있다. 연안 육역의 시가지, 나지 지역의 비율이 더 높아 부산 육상 전체보다 개발이 많이 진행된 것으로 추정할 수 있으며, 개발로 인하여 탄소보유 기능을 하는 생태계가 감소해 탄소보유 능력도 낮은 것으로 판단된다.

현재 추진 중이거나 계획 중인 개발 지구의 일부인 $2,747,425 \text{ m}^2$ 를 개발할 경우 총 탄소보유량은 약 $9 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (143만 Ton · C)로, 개발로 인해 기존

의 나지, 산림, 초지 지역이 시가지로 조성되면서 현재 탄소보유량보다 $0.024 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 감소한 것을 알 수 있다. 개발 후 연안 육역의 탄소보유량을 경제적 가치로 환산하였을 때 시장 가격 적용 시 약 $1,042\text{원}/\text{m}^2$ (1,496억원), 사회적 비용 적용 시 $2,204\text{원}/\text{m}^2$ (3,166억원)으로 개발 전보다 0.25% 감소하는 것으로 도출되었다.

본 연구에서는 부산 연안 육역의 범위를 연안관리법에 따라 500m 이내, 일부 지역 1,000m 이내로 설정하였기 때문에 개발 지구의 일부만 포함하여 평가한 결과이며, 개발 지구 전체를 포함하게 될 경우 탄소보유량의 감소로 인한 경제적 가치의 손실은 더욱 높아질 것으로 판단된다.



Table 7. Area and Carbon Storage of Coastal Land in Busan(2019)

LULC	Coastal Land		Development Scenario	
	Area(m ²)	C Storage (Ton)	Area(m ²)	C Storage (Ton)
Urban	60,772,675 (42.3%)	205,351 (14.3%)	63,141,850 (42.1%)	213,356 (14.9%)
Farmland	7,264,425 (5.1%)	49,246 (3.4%)	7,205,225 (5.0%)	48,844 (3.4%)
Forest	41,814,675 (29.1%)	1,031,150 (71.8%)	41,581,975 (29.0%)	1,025,412 (71.5%)
Grassland	17,201,825 (12.0%)	140,952 (9.8%)	16,573,850 (11.5%)	135,806 (9.5%)
Wetland	629,675 (0.4%)	9,088 (0.6%)	614,400 (0.4%)	8,997 (0.6%)
Barren	14,644,475 (10.2%)	967 (0.1%)	13,268,900 (11.2%)	876 (0.1%)
Water	1,281,550 (0.9%)	0 (0%)	1,223,075 (0.9%)	0 (0%)
Total	143,609,300 (100%)	1,436,753 (100%)	143,609,275 (100%)	1,433,291 (100%)

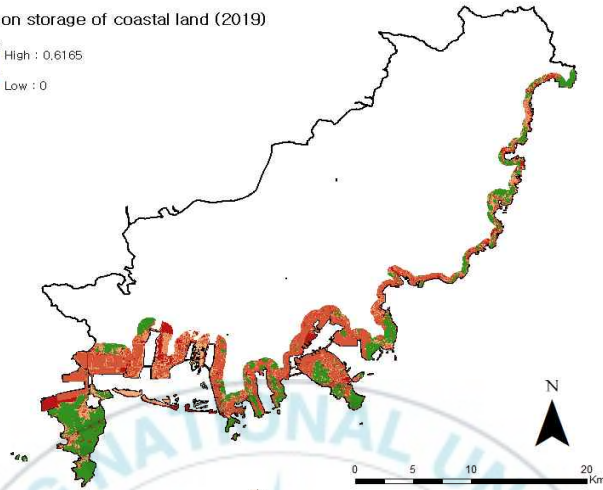
Table 8. Economic Value of Coastal Land in Busan(2019)

	Coastal Land	Development Scenario
Market Price	149,960,807,024 won (1,044 won/m ²)	149,599,461,467 won (1,042 won/m ²)
Social Cost of Carbon	317,335,575,485 won (2,210 won/m ²)	316,570,923,688 won (2,204 won/m ²)

(a)

Carbon storage of coastal land (2019)

Value
High : 0,6165
Low : 0



(b)

Carbon storage of development scenario

Value
High : 0,6165
Low : 0

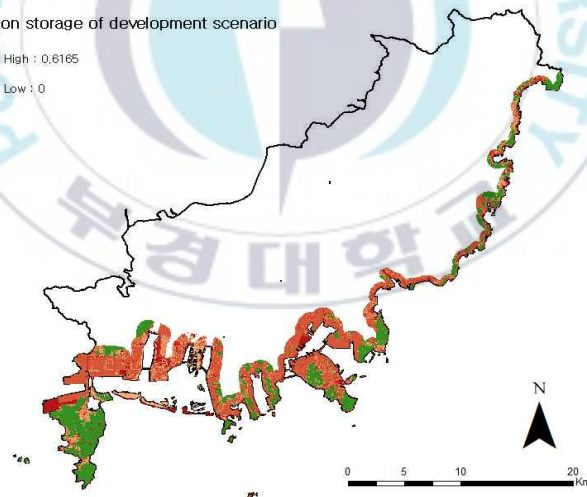


Fig 12. Carbon Storage of Coastal Land in Busan(2019)

나. 2019년 연안 해역 탄소보유량 및 경제적 가치

부산 연안 해역의 탄소보유량 평가 결과를 Table 9, 10, Fig. 13에 제시하였다. 파란색에 가까울수록 탄소보유량이 많은 것으로 해석한다. 본 연구에서는 해양의 물리화학적 탄소보유 기작을 고려하지 않아 해양의 탄소보유량은 0으로 가정하였다.

2019년 기준 부산 연안 해역에 보유된 총 탄소량은 약 $2.9 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (38만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$)로 나타났다. 갈대 서식지가 전체 탄소보유량 중 약 48.2%를 차지해 보유량이 가장 많았으며, 갈피 서식지는 전체 탄소보유량 중 약 3.62%로 가장 작았는데, 이는 분포 면적이 가장 작아 이와 같은 결과가 도출되었다. 단위면적당 탄소보유량을 비교하였을 때 갈대 서식지가 $102.5 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 높았다. 갯벌은 $6.3 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 갯벌 토양에 보유되는 탄소량만 포함하고 플랑크톤에 의한 탄소보유 기작을 고려하지 않았기 때문이다. 2019년 부산 연안 해역의 탄소보유량을 경제적 가치로 환산한 결과 시장 가격 적용 시 약 301원/ m^2 (400.6억원), 탄소의 사회적 비용 적용 시 약 637원/ m^2 (847.8억원)으로 추정된다.

부산 육상 전체 지역의 총 탄소보유량과 비교하였을 때 연안 해역은 육상 전체의 약 3.8%만큼 탄소를 보유하는 것으로 나타났다. 단위면적당 탄소보유량은 연안 해역의 경우 $2.9 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 나타났는데, 이는 연안 해역 전체 중 가장 넓은 면적을 차지하는 해양의 탄소보유량을 0으로 가정했기 때문이다. 자료의 한계로 포함하지 않은 서식지들의 정확한 분포 지도 및 해양과 갯벌의 탄소보유 기작을 포함한다면 더 많은 탄소가 보유되는 것으로 도출될 것이다.

부산 연안 해역에서 현재 추진 중이거나 계획 중인 $17,530,550\text{m}^2$ 를 개발

하게 될 경우 총 탄소보유량은 약 $3.1 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (36만 $\text{Ton} \cdot \text{C}$)로 나타났다. 실제 부산 연안 해역의 탄소 서식지 분포를 나타낸 지도가 제한적이고 갯벌과 해양의 탄소보유 기작을 고려하지 않아 감소된 면적에 비해 탄소보유 변화량이 작은 것으로 나타났으며, 그 결과 개발 전보다 단위면적당 보유량이 다소 높게 나타난 것으로 판단된다. 공유수면 매립과 신항만 건설 등의 개발 행위로 인해 일부 해양 지역이 육지 지역으로 변경되고, 잡피를 제외한 갈대, 새섬매자기 서식지와 갯벌의 면적이 감소하였다. 이는 탄소를 보유하는 생태자원의 감소를 의미하며, 탄소보유 능력의 저감으로 이어짐을 알 수 있다. 육지로 전환된 지역의 경우 토지 이용 용도에 따라 연안 육역의 탄소보유량에 변화를 줄 수 있다. 개발이 완료되었을 경우의 탄소보유량을 경제적 가치로 환산하였을 때 시장 가격 적용 시 약 328원/ m^2 (379.9억원), 사회적 비용 적용 시 694원/ m^2 (803.8억원)으로 추정되며, 개발 시나리오 적용 전보다 약 5.2% 감소되는 것으로 나타났다.

Table 9. Area and Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2019)

Habitat	Coastal Sea		Development Scenario	
	Area(m ²)	C Storage (Ton)	Area(m ²)	C Storage (Ton)
Sea and Aquaculture	107,983,725 (81.1%)	0 (0%)	93,023,875 (80.3%)	0 (0%)
Tidal Flat	22,205,675 (16.7%)	139,164 (36.3%)	19,909,825 (17.2%)	124,775 (34.3%)
Scirpus	331,350 (0.3%)	13,877 (3.6%)	331,350 (0.3%)	13,877 (3.8%)
Seagrass	826,400 (0.6%)	45,699 (11.9%)	811,225 (0.7%)	44,860 (12.3%)
Reed	1,805,450 (1.4%)	185,091 (48.2%)	1,759,875 (1.5%)	180,418 (49.6%)
Total	133,152,600 (100%)	383,830 (100%)	115,836,150 (100%)	363,930 (100%)

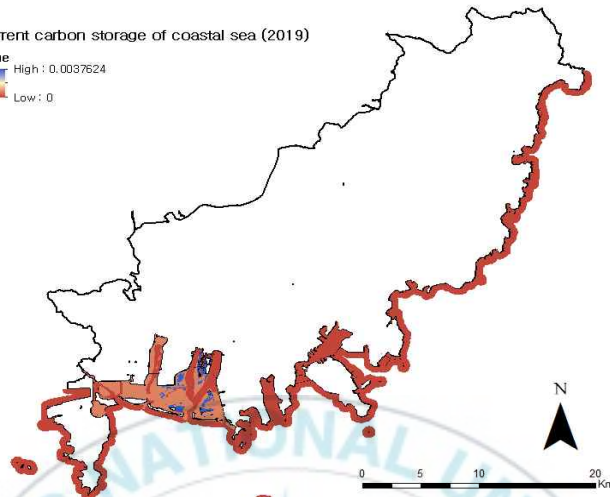
Table 10. Economic Value of Busan Coastal Sea in Busan(2019)

	Coastal Sea	Development Scenario
Market Price	40,062,179,484 won (301 won/m ²)	37,985,120,964 won (328 won/m ²)
Social Cost of Carbon	84,776,516,171 won (637 won/m ²)	80,381,203,997 won (694 won/m ²)

(a)

Current carbon storage of coastal sea (2019)

Value
High : 0.0037624
Low : 0



(b)

Development scenario of coastal sea (2019)

Value
High : 0.0037624
Low : 0

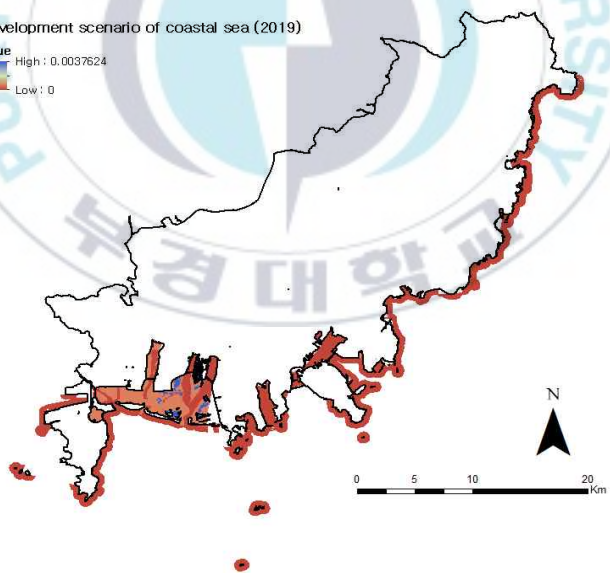


Fig 13. Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2019)

다. 2050년 연안 해역 탄소보유량 및 경제적 가치

부산 연안 해역의 2050년 기준 탄소보유량 평가 결과를 Table 11, 12, Fig 14에 제시하였다. 2050년 기준 부산 연안 해역의 총 탄소보유량은 $6.8 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (90만 Ton · C)로 나타났다. 갈대 서식지가 전체 탄소보유량 중 약 52.8%를 차지해 가장 높은 보유량을 나타냈으며, 본 연구에서 평가된 서식지 중 면적이 가장 작은 패류 양식장이 전체 탄소보유량 중 0.08%로 나타나 가장 낮은 보유량을 나타냈다. 패류 양식장의 경우 난분해성 및 이분해성 탄소량을 합산해 추정하였으며, 부산 지역의 데이터가 부족해 충남 지역 선행연구 참고하여 평가했기 때문에 과소 혹은 과대평가됐을 가능성이 있다. 단위면적당 탄소보유량을 비교하였을 때 갈대 서식지가 $264.7 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 높았으며, 해조류 양식장이 $0.58 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 로 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 양식장의 경우 현 시점(2019년)을 기준으로 새롭게 추정되는 탄소량만을 고려하였으며, 해조류 바이오매스에 저장되는 탄소는 해조류가 수확되면서 제거되기 때문에 탄소보유량 계산에서는 고려하지 않고 양식장 바닥에 퇴적되는 탄소량만을 계산했기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 2050년 부산 연안 해역의 탄소보유량을 경제적 가치로 환산한 결과 시장 가격 적용 시 약 709원/ m^2 (944.5억원), 탄소의 사회적 비용 적용 시 1,501원/ m^2 (1,999억원)로 추정된다.

2050년 기준 부산 연안 해역의 공유수면 매립, 신항만 건설 등 개발이 완료된 경우 탄소보유량은 약 $7.4 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (85만 Ton · C)로 나타났으며, 이를 경제적 가치로 환산한 결과 시장 가격 적용 시 약 769원/ m^2 (891.0억원), 사회적 비용 적용 시 1,628원/ m^2 (1,885억원)인 것으로 추정된다. 이는 2050년 개발하지 않은 탄소보유량 결과 값과 비교했을 때 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (51,241 Ton · C)의 탄소보유량과 경제적 가치 전체의 5.7% 감소된 것

으로 나타나 개발로 인한 생태자원의 감소는 연안 해역의 탄소보유에 부정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 11. Area and Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2050)

Habitat	Coastal Sea		Development Scenario	
	Area(m ²)	C Storage (Ton)	Area(m ²)	C Storage (Ton)
Sea	95,282,925 (71.6%)	0 (0%)	82,769,350 (71.5%)	0 (0%)
Aquaculture (Seaweed)	2,699,750 (2.0%)	1,574 (0.2%)	2,399,425 (2.1%)	1,398 (0.2%)
Aquaculture (Complex)	9,900,850 (7.4%)	37,592 (4.2%)	7,754,900 (6.7%)	29,444 (3.5%)
Aquaculture (Shell)	100,200 (0.1%)	702 (0.1%)	100,200 (0.1%)	702 (0.1%)
Tidal Flat	22,205,675 (16.7%)	289,218 (32.0%)	19,909,825 (17.2%)	259,316 (30.4%)
Scirpus	826,400 (0.6%)	51,849 (5.7%)	811,225 (0.7%)	50,897 (6.0%)
Seagrass	331,350 (0.3%)	46,064 (5.1%)	331,350 (0.3%)	46,064 (5.4%)
Reed	1,805,450 (1.4%)	477,898 (52.8%)	1,759,875 (1.5%)	465,835 (54.6%)
Total	133,152,600 (100%)	904,898 (100%)	115,836,150 (100%)	853,657 (100%)

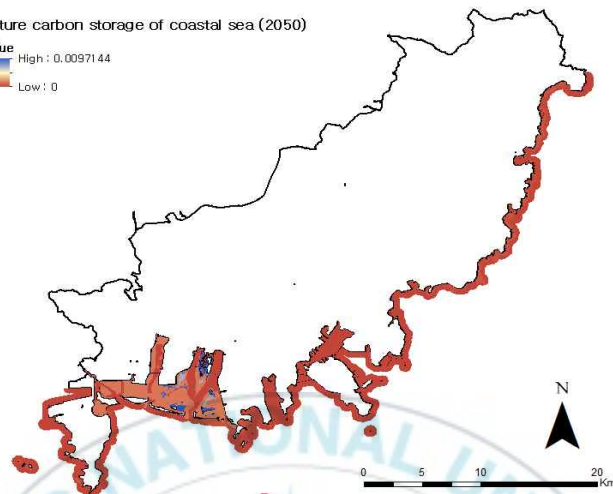
Table 12. Economic Value of Coastal Sea in Busan(2050)

	Coastal Sea	Development Scenario
Market Price	94,448,547,770 won (709 won/m ²)	89,100,278,644 won (769 won/m ²)
Social Cost of Carbon	199,864,783,707 won (1,501 won/m ²)	188,547,186,163 won (1,628 won/m ²)

(a)

Future carbon storage of coastal sea (2050)

Value
High : 0.0097144
Low : 0



(b)

Development scenario of coastal sea (2050)

Value
High : 0.0097144
Low : 0

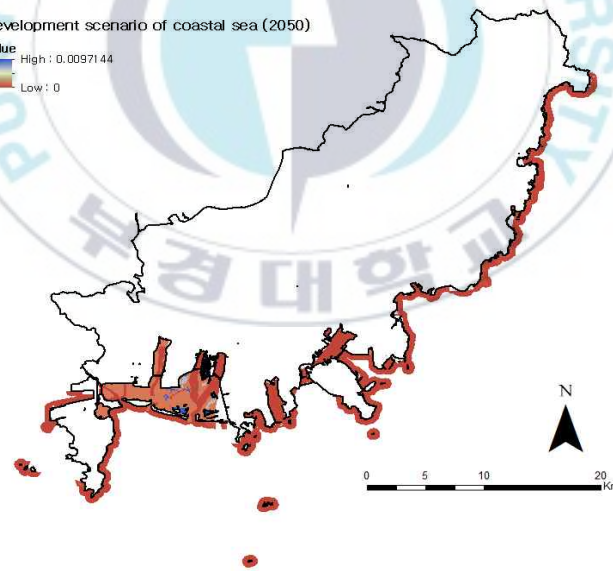


Fig 14. Carbon Storage of Coastal Sea in Busan(2050)

라. 연안 육역 및 연안 해역 개발 시 탄소보유 변화량

공유수면 매립 등 현재 계획된 개발이 완료되면 약 1,730만 m^2 의 해양 지역이 육상 지역으로 전용되면서 연구 범위인 연안 육역의 면적은 12% 증가하고, 탄소보유량은 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (3,550 $\text{Ton} \cdot \text{C}$)로 개발 전보다 0.25% 증가하는 것으로 나타났다. 반면 연구 범위인 연안 해역의 면적은 13% 감소하고, 탄소보유량은 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (19,900 $\text{Ton} \cdot \text{C}$)로 개발 전보다 5.2% 감소하는 것으로 나타났다(Fig 15). 연안 해역의 탄소보유 감소율(5.2%)은 연안 육역 탄소보유 증가율(0.25%)의 약 20.8배인 것으로 나타났으며, 총 16,350 $\text{Ton} \cdot \text{C}$ 만큼의 손실이 발생하는 것으로 추정되었다. 이는 연안 해역의 탄소를 보유하고 있는 서식지인 갈대, 새섬매자기, 갯벌 등과 개발 지역이 일부 중첩되면서 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 향후 연안역 개발 시 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유 변화량을 고려하여 보유량의 손실을 최소화할 수 있도록 해야 하며, 개발 시 탄소 보유에 중요한 서식지를 보전할 수 있는 규제 및 탄소보유능을 회복할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

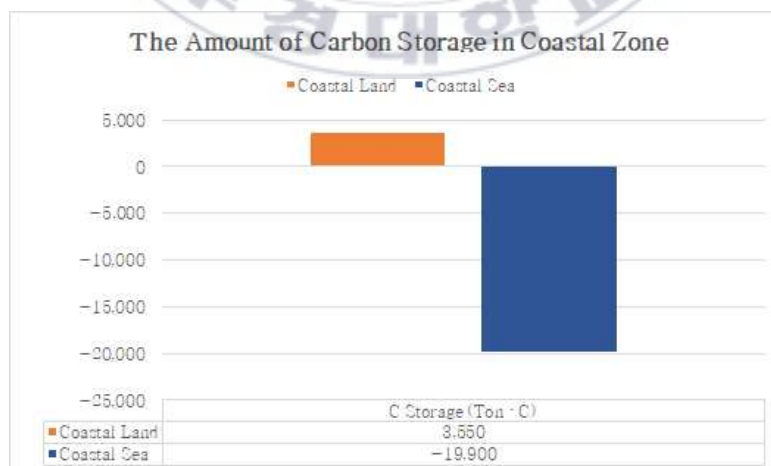


Fig 15. The Amount of Carbon Storage of Coastal Zone

4. 결론

본 연구에서는 InVEST Carbon, Coastal Blue Carbon 모델을 이용하여 부산 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량 및 경제적 가치를 평가하였으며, 개발 시나리오를 적용하여 이들 지역의 탄소보유 변화량을 분석하였다. 평가 결과 부산 연안 육역의 단위면적당 탄소보유량은 부산 전체 육상 지역에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 이는 연안 지역이 다른 육상 지역과 비교했을 때 시가지, 나지 비율이 높아 다른 지역에 비해 개발이 많이 진행된 것을 알 수 있다. 현재 추진 중이거나 계획 중인 개발이 완료될 경우 탄소보유량이 더 감소될 것으로 예측되었으며, 향후 연안 육역을 개발하게 될 경우 개발 전, 후의 탄소보유 변화량을 고려해야 한다. 또한 기존의 개발 지역에 녹지를 회복, 확보하는 등 도시 지역의 탄소보유량을 늘릴 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 부산 연안 해역의 경우 육역에 비해 탄소보유량이 작은 것으로 나타났다. 공유수면 매립과 신항만 건설 개발이 현재 탄소보유량이 많은 중요 서식지를 훼손할 가능성이 높으며, 연안 해역의 전체 탄소보유량이 감소될 것으로 예측되었다. 미래 시나리오 분석 결과 2050년까지도 이전의 탄소보유량을 회복하기 어려울 것으로 나타났다. 본 연구에서 고려하지 않은 탄소보유 기작을 규명할 연구가 진행되어야 할 것이며, 이들 지역의 보유량을 늘리기 위한 중요 서식지 보전 및 해양생태계 복원이 필요할 것이다. 탄소보유에 대한 경제적 가치 평가 결과 개발 전과 후의 차이가 크지 않은 것으로 나타나 저평가된 것으로 판단되며, 금전적 가치 이외의 다른 가치 평가 방안이 필요할 것으로 사료된다. 또한 탄소보유 뿐만 아니라 잠재적인 탄소 흡수능을 고려한다면 탄소보유에 대한 가치는 높아질 것이다. 본 연구는 탄소보유량을 고려한 생태계서비스 기반의 부산 연안역 관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 부산 연안역 서식지 질 및 위험도 평가

1. 서론

육상과 해양생태계가 공존하는 부산은 지리적 특성상 연안 지역의 이용을 위해 지속적인 개발 압력을 받고 있는 실정이다. 과도한 개발 행위는 연안 생태계를 훼손하여 생물들의 서식지 감소 및 생물다양성의 저해로 이어질 가능성이 높아지며, 연안 도시의 건강성을 위협하는 요인으로 작용하게 된다. 연안 생태계의 지속가능한 이용과 생태계 보전을 위해서는 인간과 자연환경을 함께 고려한 생태계 기반 관리(Ecosystem-based Management)를 통해 도시와 생태계 모두의 건강성을 증진해야 할 필요가 있다.

생태계 기반 관리란 인간에 의해 발생하는 활동을 고려하여 누적되는 위험 영향을 파악하고, 공존하는 여러 생태계를 함께 관리할 수 있는 방안 제시를 목적으로 하며, 이를 실천하기 위해서는 우선 생태계의 상태를 파악해야 한다(Ansong et al., 2017; Harvey et al., 2018; Goulding et al., 2018; NOAA, 2021). 이에 서식지를 중심으로 생태계 현황을 파악하고 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이 중 생태계서비스 기반의 평가 모델인 InVEST의 육상 서식지 질을 평가하는 Habitat Quality(HQ)나 해양 서식지 위험도를 평가하는 Habitat Risk Assessment(HRA)를 적용한 연구가 진행된 바 있는데, 국내·외에서 InVEST HQ 모델을 이용하여 국립공원, 개발에 따른 도시 지역 및 유역과 습지 지역 등을 대상으로 육상 서식지의 상태를 파악하기 위한 연구가 진행되었으며(서새별, 2017; 최지영 외, 2019; 국립공원연구원, 2019; Zhai et al., 2020; Zhang et al., 2020b), 바다새 보전을 위해 인간 활동을 고려한 해양 서식지 평가, 해양공간계획 수립을 위한

연안·해양생태계의 생태계서비스 평가를 위해 InVEST HRA 모델을 이용하여 서식지 위험도를 평가하였다(Guerry et al., 2012; Studwell et al., 2021).

하지만 대부분 육상생태계와 해양생태계를 분리하여 각 지역의 보전·관리를 위한 연구를 진행한 것으로, 서로 다른 특성을 가진 두 생태계를 함께 고려한 연구는 거의 수행되지 않았다. 연안역은 육상과 해양이 만나는 곳으로 어느 한 지역의 변화가 다른 지역 생태계에 중요한 영향을 미칠 수 있으므로, 인접한 육상과 해양생태계를 함께 고려하여 관리하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 부산 연안역의 서식지를 고려한 생태계 기반 관리를 위해 InVEST HQ 모델을 이용한 연안 육역의 서식지 질 평가와 InVEST HRA 모델을 이용한 연안 해역의 서식지 위험도를 함께 고려하여 부산 연안역의 서식지 상태를 평가하고자 한다. 또한 연안 육역과 연안 해역 서식지에 영향을 미칠 수 있는 위협 인자와 영향 정도를 파악하여 향후 부산 연안역의 생태계 기반 관리 방안 수립에 필요한 기초자료로 사용될 수 있다.

2. 연구 방법

가. 연구 범위 및 지도 구축

본 연구는 모델 수행을 위한 기초 자료 획득이 가능한 2019년을 기준으로 수행하였다. 2019년의 연안 지역 서식지 평가는 연안 육역의 서식지 질과 연안 해역의 서식지 위험도를 진행하였다. 연안관리법에 따라 연안 육역의 경우 해안선 기준 육지 방향 500m 이내로 설정하였으며, 항만, 국가 어항 혹은 산업단지의 경우 1,000m 이내 육지 지역으로 설정하였다. 연안 해역의 경우 가용할 수 있는 자료의 한계로 해안선 기준 해양 방향 500m로 설정하였다(Fig 10 참고). 연구 범위에 해당하는 연안 육역의 면적은 143,609,300m², 연안 해역의 면적은 133,152,600m²이다.

모델에서 사용된 자료는 Arc GIS MAP 10.5.1 프로그램을 사용하여 해상도 5m의 raster 형태로 구축하였다. 연안 육역의 경우 환경부에서 제공된 2019년 세분류 토지피복도를 활용하였으며, 연안 해역의 경우 국립해양조사원에서 제공 받은 재질분포도와 세분류 토지피복도를 이용하였다(환경부, 2020). 서식지 및 위험요인의 자료는 낙동강관리본부 낙동강하구에코센터, 국가공간정보포털, 국가해양정보마켓센터에서 제공되는 자료를 활용하였다(국가해양조사원, 2021; 국토교통부, 2021).

나. InVEST Habitat Quality(HQ) 모델

HQ 모델은 생물다양성과 관련된 육상 서식지의 가치를 평가하며, 토지 이용에 따라 서식지에 미치는 영향을 정성적인 값으로 나타낸다. 평가 결과는 0~1 사이 값으로 나타나며, 1에 가까울수록 서식지 질이 우수한 것을 의미한다. 서식지 질(Q_{xj})은 서식지에 미치는 위협요인과 그 위협요인의 영향 정도를 나타내는 4가지 인자를 고려하여 다음의 식 Eqs. (5)~(8)를 이용하여 계산한다(Sharp et al., 2020). 위협요인은 서식지 주변의 토지 이용에 따라 결정되는데, 본 연구에서는 거주지역, 상업지역, 산업단지, 교통지역, 환경기초시설, 농업지역, 인공나지로 구성되어있다. 4가지 인자는 위협요인에 대한 상대적 영향력, 서식지 유형별 상대적 민감도, 위협요인이 서식지에 미치는 영향 거리, 토지의 법적·제도적·사회적·물리적 보호수준이며, 본 연구에서는 국내·외 선행연구를 참고하여 사용하였다(Table 13).

Table 13. Input Data of InVEST Habitat Quality Model

(Sharp et al., 2020 참고)

Required Input Data	Explanation	Format	Reference
Current Land Cover Map	A Land Cover Map Containing Codes for Each Land Use	Raster (.tif)	Ministry of Environment
Threats Data	Threatening Factors to Biological Habitats	Table (.csv)	Kim et al, 2015; KNPRI, 2019; Lee et al, 2015;
Sensitivity of Land Cover Types to Each Threat	Sensitivity to the Effect of Each Threat Factor on the Type of Land Use	Table (.csv)	Choi, 2020; Kim, 2018; Seo, 2017; Sallustio et al., 2017; Xu et al., 2019
Half-Saturation Constant	Value of the Parameter k in Equation	Number (Default Value:0.5)	Sharp et al., 2020

서식지 질은 서식지에 미치는 위협 영향에 관한 4가지 요소를 통해 Eqs. 5, 6, 7, 8 수식에 따라 계산된다(Sharp et al., 2020). 4가지 요소에는 위협 요인(r)에 대한 상대적 영향력(i_{rxy}), 위협요인에 대한 서식지 유형별 상대적 민감도(S_{jr}), 서식지와 위협요인의 거리(d_{xy} (km)) 및 위협요인이 서식지에 미치는 최대 영향거리(d_{rmax} (km)), 위협영향에 대한 토지의 법적 · 제도적 · 사회적 · 물리적 보호수준(β_x)이 있다.

총 위협수준은 다음의 식 Eq. 5로 계산한다. 여기서 D_{xj} 는 위협요인 x와 서식지 j에 따른 총 위협수준을 의미하며, Y_r 은 위협요인으로 입력된 래스터 픽셀의 합, w_r 은 위협요인에 대한 가중치, r_y 은 감소 요인, i_{rxy} 은 상대적 영향력, β_x 는 보호 수준, S_{jr} 는 상대적 민감도이다.

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (5)$$

위협요인에 대한 상대적 영향력인 i_{rxy} 은 서식지-위협요인 간의 거리가 멀어질수록 위협요인의 영향이 일정하게 감소하며, Eqs. (6), (7)로 계산한다.

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \text{if } linear \quad (6)$$

$$i_{rxy} = \exp \left(- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right) \text{if } exponential \quad (7)$$

위협요인의 영향이 일정한 선형 감소(linear) 모형 혹은 기하급수적인 감소(exponential) 모형을 선택하여 위협요인에 대한 상대적 영향력을 계산한다. 이 때 d_{xy} 는 서식지와 위협요인의 거리, d_{rmax} 는 위협요인이 서식지에

미치는 최대 영향 거리를 의미한다.

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right) \quad (8)$$

최종적으로 서식지 적합성(H_j)과 {1-총 위협수준(D_{xj})}을 곱하여 위협요인 x 의 영향을 받는 서식지 유형 j 에 대한 서식지 질인 Q_{xj} 을 0~1 사이의 값으로 산출하게 된다(Eq. 8). 총 위협수준에 포함된 k 는 반포화상수로, 디폴트 값인 0.5를 입력하였다(Sharp et al. 2020).

다. InVEST Habitat Risk Assessment(HRA) 모델

HRA는 해양 서식지에 대한 위험도를 평가하는 모델로, 인간 활동이 서식지에 미치는 누적 위험을 나타낸다. 위협요인에 많이 노출될수록 서식지의 위험도가 높게 나타나는데, 이는 서식지가 훼손되거나 나빠질 가능성이 높은 것으로 판단한다(Fig. 16). 본 연구 대상지에서 위협요인으로 고려되는 인간 활동은 양식장, 어업 활동, 레크레이션, 항만 활동, 발전소, 산업단지로 설정하였으며, 각 위협요인에 대한 영향 정도는 선행연구를 참고하여 설정하였다(Table 14). 위협요인에 대한 영향 정도는 다음의 식 Eqs. (9)~(13)에 의해 계산된다.

Table 14. Input Data of InVEST Habitat Risk Assessment Model

(Sharp et al., 2020 참고)

Required Input Data	Explanation	Format	Reference
Habitat Stressor Information	Table including Habitat, Stressor Information, and File Location	Table (.csv)	KOMC, 2021; ME, 2020; MOLIT, 2021; KHOA; Nakdonggang Estuary Eco Center
Criteria Scores	A Table that Scores the Effect of Stressors on Habitats in Numbers from 1 to 3	Table (.csv)	Sharp et al., 2020; Claudai Caro et al., 2020
Resolution of Analysis (meter)	The Resolution of the Map Entered in the Model	Number (Value:5)	
Maximum Criteria Score	The Maximum Scores in the Stress Impact Score Table	Number (Value:3)	
Risk Equation	Options for Risk Calculation (Euclidean and Multiplication Equations)	Euclidean	Sharp et al., 2020
Decay Equation	Options of a Decay Equation for the Buffered Stressors(Exponential, Linear, None)	Linear	Sharp et al., 2020
Area of Interest	Containing Feature One or More Planning Regions or Subregions	Vector (.shp)	KOMC, 2021; ME, 2020; MOLIT, 2021; KHOA; Nakdonggang Estuary Eco Center

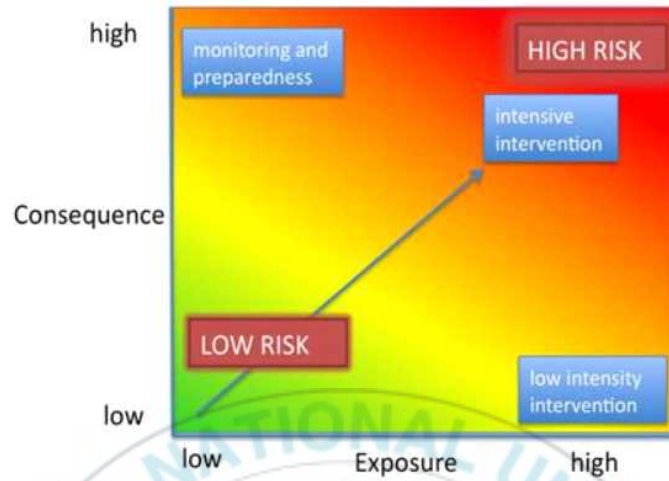


Fig 16. Relation Between Exposure and Consequence in Habitat Risk Assessment
(Sharp et al., 2020)

노출 인자(E_i)는 서식지와 위협요인 간의 공간적·시간적 중첩 기간, 위협요인 강도 등의 영향을 고려한 노출 정도(e_i), 입력된 데이터의 과학적 객관성(d_i), 위협요인에 따른 가중치(w_i)로 계산하게 된다. 결과 인자(C_i)는 위협요인에 노출되면서 나타나는 서식지 훼손·변화 정도, 자연재해 발생 빈도, 회복 능력 등을 고려한 반응 정도(c_i), 데이터의 과학적 객관성, 가중치를 통해 계산되며, 노출 및 결과 인자는 일반적으로 1~3의 값으로 입력된다.

$$E_i = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{d_i \times w_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \times w_i}} \quad (9)$$

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{d_i \times w_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \times w_i}} \quad (10)$$

Eqs. (11)~(12)을 통해 계산된 노출 및 반응 인자의 결과 값을 결합하여 서식지에 영향을 미치는 각 위협요인별 위험도(R_i)를 계산하는데, 이 때 유클리드 수식(Euclidean) 혹은 곱셈 수식(Multiplicative)을 이용한다. 선행연구에서는 유클리드 수식을 적용한 서식지 위험도 평가 결과와 서식지 단편화, 생태계 건강성 평가 결과와 긍정적으로 일치하는 것으로 나타나 본 연구에서도 유클리드 수식을 적용하였다(Sharp et al., 2020).

$$R_i = \sqrt{(E_i - 1)^2 + (C_i - 1)^2} \quad (11)$$

$$R_i = E_i \times C_i \quad (12)$$

마지막으로 연구 대상 지역 내 모든 위협요인의 영향을 받아 서식지에 누적된 위험도(R)를 계산하게 된다.

$$R = \sum_{k=1}^K R_k \quad (13)$$

3. 결과 및 고찰

가. 부산 연안 육역의 서식지 질

2019년 부산 연안 육역의 서식지 질 평가 결과를 Table 15, Fig 17에 제시하였다. 서식지 질 평가 결과의 범위는 0에서 1로, 평균값은 약 0.415로 나타났다. 녹색에 가까울수록 서식지의 질이 높고 자주색에 가까울수록 질이 낮은 것으로 해석한다. 전반적으로 연안 육역에서 산림과 초지가 많은 지역의 서식지 질이 높았으며, 서식지 질이 높은 지역의 경우에도 서식지에 부정적인 영향을 미치는 시가지, 나지와 같은 위협인자에 인접할수록 서식지 질이 점차 감소하는 것으로 나타났다.

0-1의 범위로 나타난 서식지 질을 5등급으로 분류하였을 때 대상 지역 중 상대적으로 서식지 질이 높은 것으로 구분할 수 있는 Group 1(0.8-1)의 지역은 전체의 약 291.1. .6%로 나타났으며, 강서구 가덕도, 남구 이기대·신선대, 사하구 유원지, 영도구 산지, 기장군 일대 지역 등이 해당하는 것을 알 수 있다. 반면 서식지 질이 상대적으로 낮은 것으로 구분할 수 있는 Group 5(0-0.2) 지역은 전체의 약 50%로, 기장군과 강서구 가덕도를 제외한 지역 대부분 혹은 일부가 포함되는 것으로 나타났다. 특히 서구, 중구, 동구, 수영구 일대 연안 육역의 서식지 질이 대부분 낮은 것으로 나타났는데, 대부분 인간 활동이 많은 시가지, 나지 등으로 이미 연안 육역에서 개발이 진행되어 서식지 질이 많이 감소한 지역임을 알 수 있다.

이에 연안 지역의 지속가능한 이용 및 서식지 보전을 위해서는 서식지 상태가 우수한 지역의 경우 악화되지 않도록 해당 서식지는 물론이고 서식지 주변 지역의 지속적인 모니터링과 관리가 필요할 것이며, 서식지 상태가 좋지 못한 지역의 경우 서식지 가치를 높이고 위협도를 낮출 수 있는 친환경

경적인 기술 개발 및 법적 규제를 통해 서식지를 회복하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

Table 15. Habitat Quality Value by Range and Average Value

Group	Range	Habitat Quality of Coastal Land
1	0-0.2	49.61%
2	0.2-0.4	2.53%
3	0.4-0.6	4.49%
4	0.6-0.8	13.80%
5	0.8-1.0	29.56%
Average		0.415241

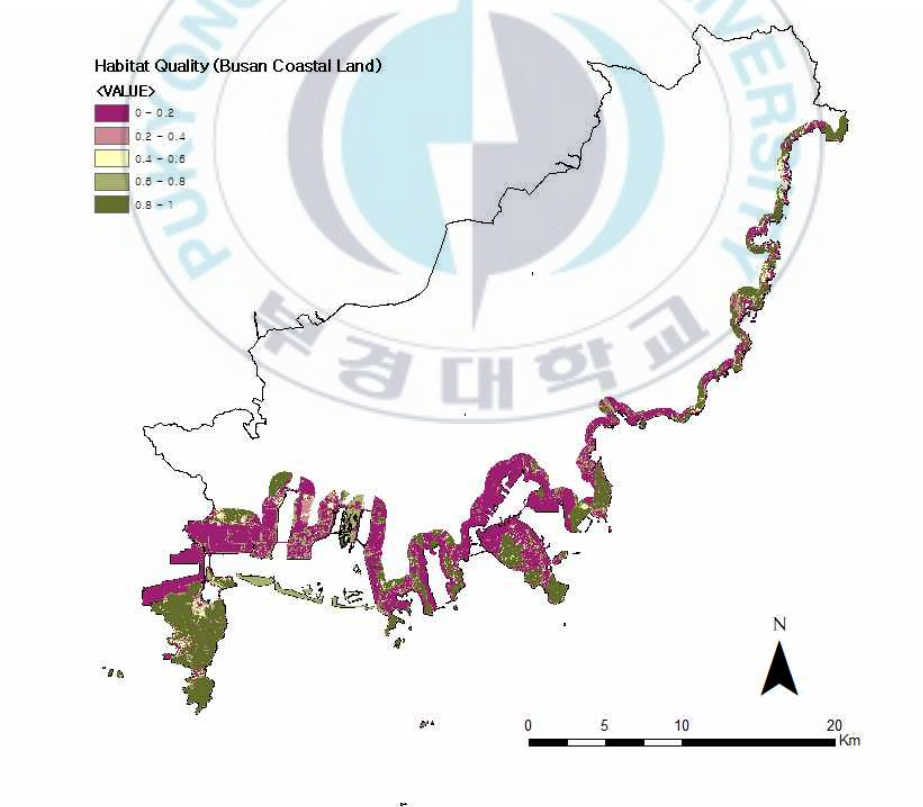


Fig 17. Habitat Quality of Busan Coastal Land

나. 부산 연안 해역의 서식지 위험도

2019년 부산 연안 해역의 서식지 위험도 평가 결과를 Table 16, Fig 18에 제시하였다. 평가 결과 서식지 위험도 값의 범위는 0에서 0.773으로, 평균 값은 약 0.421로 나타났다. 위험도 값을 5등급으로 분류하였을 때 대상 지역 중 상대적으로 서식지 위험도가 높은 Group 5(0.618-0.773)의 지역은 전체의 약 5.56%, 위험도가 비교적 높은 Group 4(0.464-0.618) 지역은 약 50.40%로 나타났으며, 영도구, 사하구 다대포, 강서구 명지신도시·산업단지 주변 연안 해역이 해당하는 것으로 나타났다. 해당 지역들은 양식장, 어업 활동, 레크레이션 활동, 항만 이용 등의 인간 활동으로 인해 서식지 위험도가 높았으며, 이로 인해 서식지가 훼손되거나 나빠질 가능성이 높은 것으로 판단된다. 반면 서식지 위험도가 상대적으로 낮은 Group 1(0-0.155) 지역은 전체의 약 0.56%, 위험도가 비교적 낮은 Group 2(0.155-0.309)인 지역은 약 23.70%로 나타났으며, 연구 대상지 중 낙동강 하굿둑 하부 지역이 이에 해당한다. 대상 지역 중 상대적으로 위험도가 낮은 서식지보다 위험도가 높은 서식지의 면적이 약 2.3배 더 큰 것으로 나타났으며, 이에 위험도를 낮출 수 있도록 중요 서식지의 훼손을 최소화하는 방향으로 해역을 이용하고 서식지를 보전하는 관리 방안이 필요할 것으로 판단된다.

아울러 연안 육역의 개발과 이용이 연안 해역 서식지에 위험요인으로 작용할 수 있기 때문에 연안 육역의 개발과 이용에 있어 이러한 행위가 연안 해역에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 충분히 고려하여야 한다. 연안 해역의 중요 서식지의 경우에는 완충 지역 및 보호구역 확대를 통해 각 서식지에 미칠 수 있는 부정적인 영향을 최소화해야 한다.

Table 16. Habitat Risk Value by Range and Average Value

Group	Range	Habitat Risk of Coastal Sea
1	0-0.155	0.56%
2	0.155-0.309	23.70%
3	0.309-0.464	19.79%
4	0.464-0.618	50.40%
5	0.618-0.773	5.56%
Average		0.421

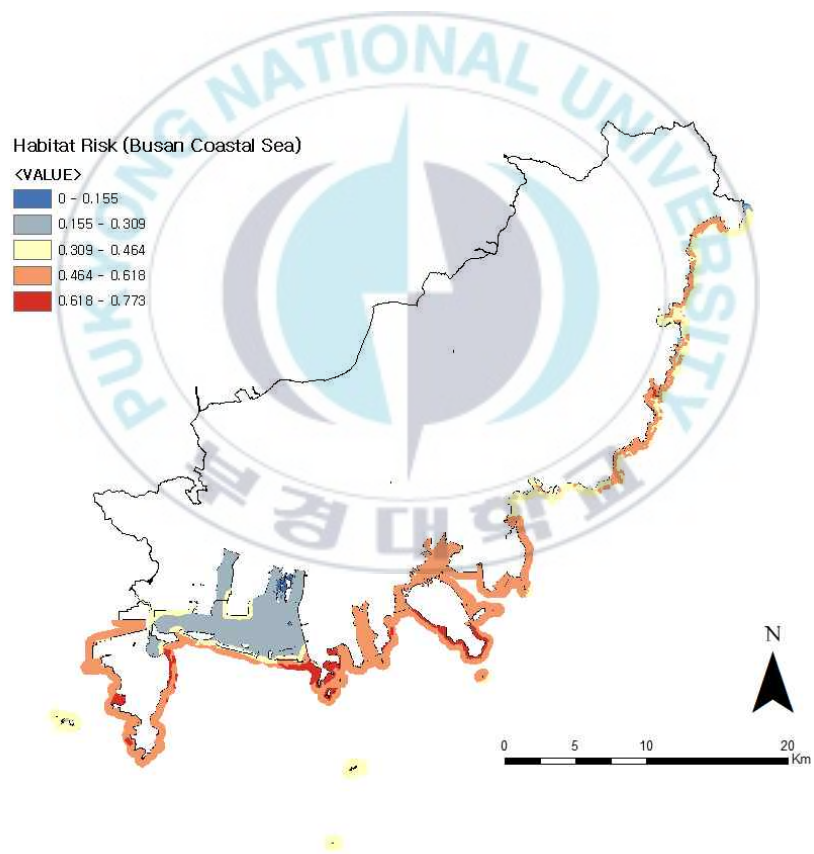


Fig 18. Habitat Risk Assessment of Busan Coastal Sea

4. 결론

본 연구에서는 연안 지역의 서식지를 중심으로 한 생태계 기반 관리를 위해 연안 육역의 경우 InVEST HQ, 연안 해역의 경우 HRA 모델을 적용하여 부산 연안역에 위치한 서식지의 상태를 평가하였다. 연안 육역의 경우 강서구 가덕도, 남구 이기대·신선대, 기장군 일대 지역 등에서 서식지 질이 높은 것으로 나타나 이들 지역의 토지 이용 규제 등 적절한 관리를 통해 서식지 가치를 지속적으로 보전해야 할 것으로 판단된다. 반면 연구 대상지 중 연안 육역의 약 50%의 지역에서 서식지 질이 이미 낮아 서식지가 훼손되거나 나빠진 것으로 나타났다. 전반적으로 서식지 질이 낮은 서구, 중구, 동구, 수영구 지역은 대부분 시가지와 나지로, 이용과 개발이 활발하기 때문에 향후 이용·개발 시 훼손을 최소화하거나 이미 훼손된 지역의 복원을 통해 서식지 개선이 필요할 것으로 판단된다. 연안 해역의 경우 연구대상지 중 낙동강 하굿둑 하부 지역의 서식지 위험도가 낮은 것으로 나타난 반면, 양식장, 어업 활동, 항만 이용, 레크레이션 활동 등 서식지 주변의 과다 이용 혹은 서식지 지역의 직접적인 이용으로 인해 서식지 위험도가 상대적으로 높은 것으로 나타났으며 영도구, 사하구 다대포, 강서구 신도시·산업단지 주변의 연안 해역이 해당하는 것으로 나타났다.

연안 지역의 지속가능한 이용 및 서식지의 가치를 증진시키기 위해서는 서식지 상태가 우수한 지역은 물론이고 주요 서식지에 잠재적인 영향 범위 내에 있는 지역들을 포함하여 지속적인 모니터링과 관리가 필요할 것이다. 아울러 연안 육역의 개발이나 이용이 연안 해역 서식지에 위험요인으로 작용할 수 있기 때문에 연안 육역에서 개발사업을 계획할 경우 연안 해역에 미치는 영향을 충분히 고려하여야 할 것이다.

VI. 종합 분석

1. 연안역의 서식지와 탄소보유능 종합 분석

2019년 부산 연안 육역의 서식지 질-탄소보유량, 연안 해역의 서식지 위험도-탄소보유량의 지도를 중첩하여 종합 분석하였다. 값이 높게 나타난 지역은 탄소보유량이 많고 서식지 질이 높으며 서식지 위험도가 낮은 지역으로 해석할 수 있으며, 생태적 중요도가 높은 것으로 판단할 수 있다. 반면 값이 낮게 나타난 지역은 보유량이 작고 서식지 질이 낮으며 위험도가 높은 지역으로, 개발이 많이 이루어지고 건강성이 저하된 상태로 해석할 수 있다. 연안 육역의 경우 산림이 많은 가덕도, 영도 일부 지역, 이기대 일대의 값이 높게 나타났으며, 시가지, 산업단지, 부두, 항만 지역과 그 주변의 값이 낮은 것으로 나타났다. 연안 해역의 경우 낙동강 하굿둑 하부 지역의 값이 높게 나타났으며, 다대포 부근, 가덕도 주변 일부 지역, 영도 해안선 주변 지역의 값이 낮은 것으로 나타났다.

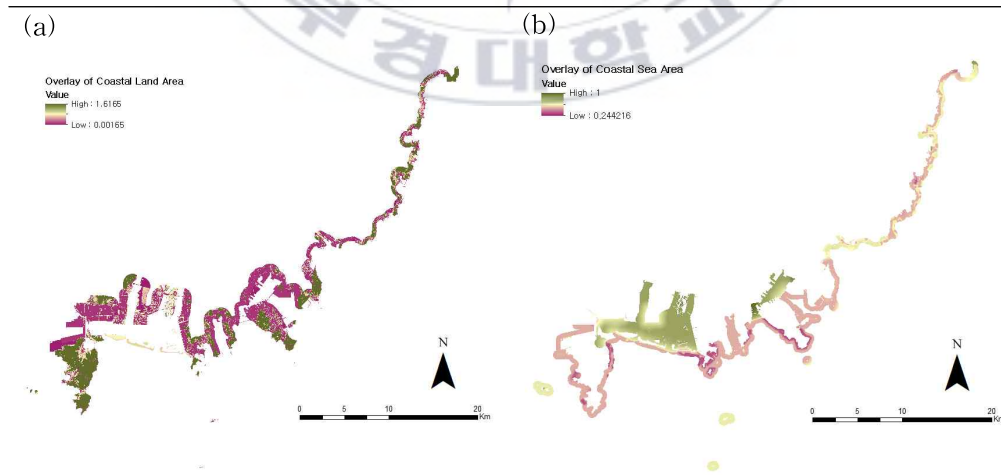


Fig 19. Overlay of Carbon Storage and Habitat in Coastal Area

2. 종합 분석-생태자연도 비교

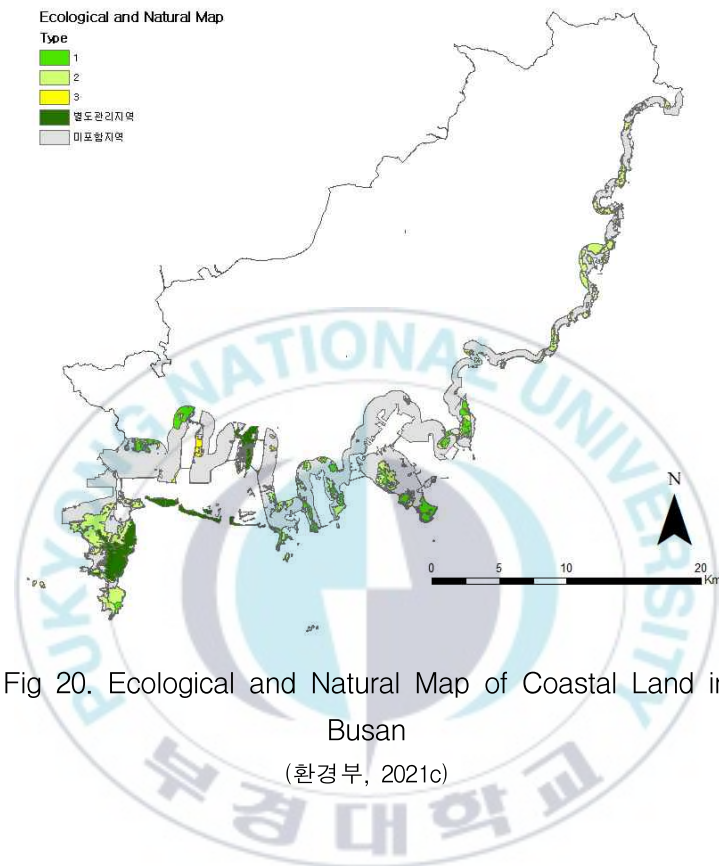


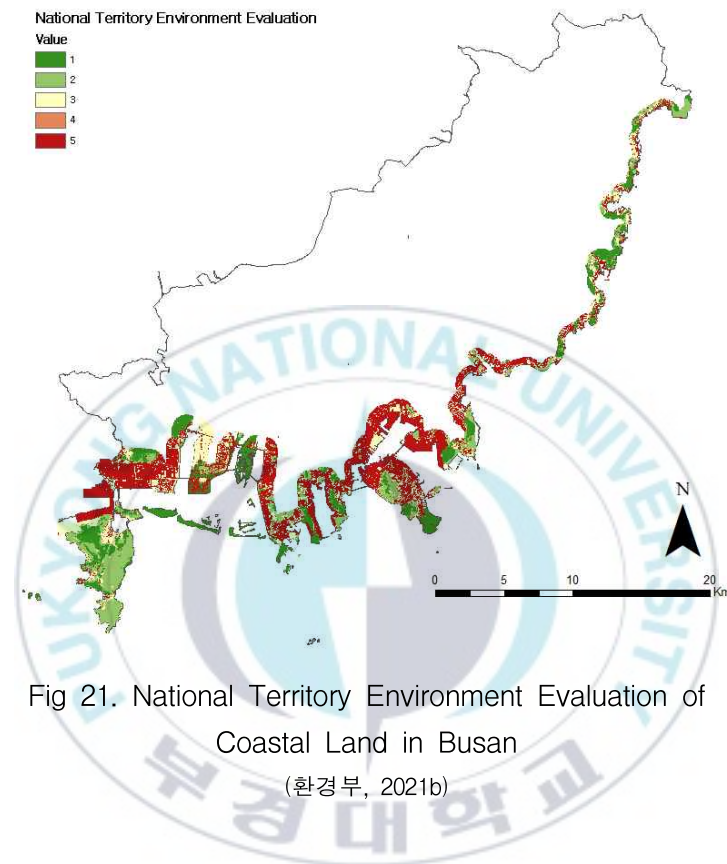
Fig 20. Ecological and Natural Map of Coastal Land in Busan
(환경부, 2021c)

연안 육역의 종합 평가 결과와 생태자연도를 비교하였다. 생태자연도는 환경부에서 자연환경보전법에 따라 자연환경을 식생, 멸종위기야생동·식물, 습지, 자연경관의 4가지 항목으로 평가해 3개의 등급 및 별도관리지역으로 등급화하여 작성한 지도이다(환경부, 2021c). 1등급에 가까울수록 자연환경의 보전 가치가 높은 것으로 해석할 수 있다. 연안 육역과 중첩되는 일부 지역의 생태자연도 분석 결과 2등급(51.66%), 별도관리지역(26.27%), 1등급(19.90%), 3등급(2.17%) 순으로 구성되어 있는 것을 알 수 있으며, 종합 분석 결과에서 생태적 중요도가 높은 것으로 나타난 지역과 생태자연도

평가 지역과 유사한 분포 양상을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 생태자
연도에서 별도관리지역으로 지정된 구역이더라도, InVEST 평가는 주변의
영향을 고려하기 때문에 위협요인의 영향을 많이 받는 지역일 경우 종합
분석 결과에서는 값이 낮게 나타날 수 있다.



3. 종합 분석-국토환경성평가 비교



연안 육역의 종합 평가 결과와 국토환경성평가지도를 비교하였다. 국토환경성평가는 환경부에서 환경정책기본법에 따라 3개 부문 62개 항목의 법제적 평가 기준과 8개 부문의 환경·생태적 평가 기준을 바탕으로 국토의 보전 및 환경 가치를 5개의 등급으로 나타낸 지도이다(환경부, 2021b). 1등급에 가까울수록 환경적 중요도가 높은 것으로 해석할 수 있다. 국토환경성평가 중 연안 육역에 해당하는 지역의 분석 결과 5등급(41.94%), 2등급(20.19%), 1등급(20.16%), 3등급(16.99%), 4등급(0.72%) 순으로 구성되어 있는 것을 알 수 있었다. 부산 전체 지역의 국토환경성평가에서는 1등급인

지역의 비율이 40.83%로 가장 높게 나타났지만(환경부, 2021b), 연안 육역 범위에서는 5등급인 지역의 비율이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 평가 항목 중 하나인 허약성(인간생활로 인한 토지 이용에 의해 영향을 받는 것으로 예상되는 지역)이 부산 내 다른 지역보다 높고 그로 인해 보전 가치가 저하되어 연안 육역의 건강성이 낮은 것으로 해석할 수 있다(환경부, 2021b). 연안 육역의 탄소보유량 및 서식지 질 종합 분석 결과에서 생태적 중요도가 상대적으로 낮은 지역과 국토환경성평가의 5등급 지역이 유사하게 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 강서구 가덕도, 기장군, 남구 일부 지역, 연안 육역의 산림 지역을 제외한 나머지 지역이 이에 해당하는 것으로 나타났다. 국토환경성평가에서 산림 지역은 1, 2등급으로 세분화되어 평가된 반면 종합 분석 결과에서는 대부분 생태적 중요도가 가장 높은 것으로 나타났지만, 1, 2등급의 지역의 면적 비와 종합 분석 결과에서 생태적 중요도가 상대적으로 높은 지역의 면적 비는 근사한 값으로 나타났고 분포하는 지역 또한 유사한 것으로 나타났다.

이를 통해 InVEST 모델을 적용한 평가와 국토환경성평가 두 지도는 유사한 경향을 가지는 것을 알 수 있으며, 서식지 질 평가에서 포함하지 않은 위협 영향에 대한 토지의 법적·제도적·사회적·물리적 보호수준을 고려한다면 보다 정확한 생태계서비스 평가 도구로 사용될 수 있을 것이다.

4. 종합 분석-해양생태도 비교

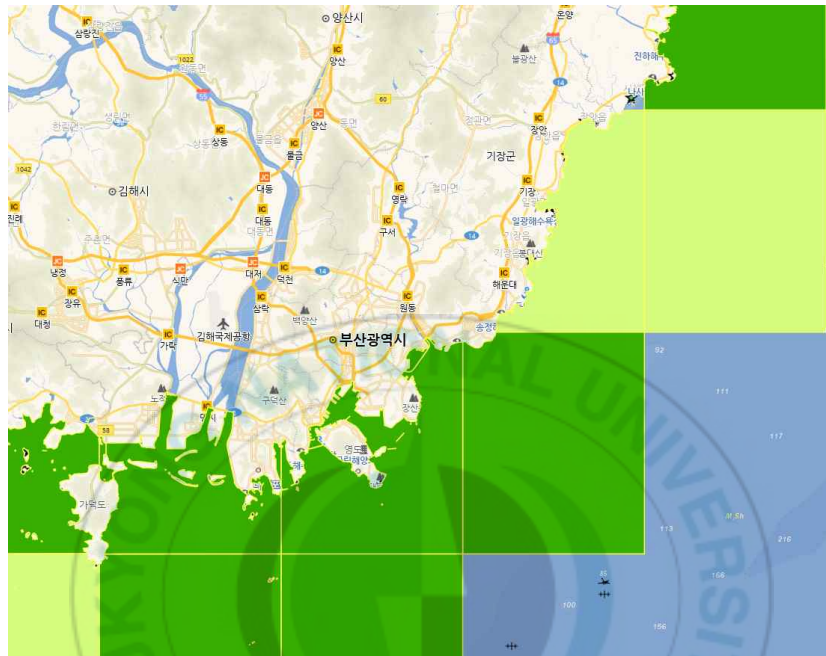


Fig 22. Marine Ecological Map in Busan
(해양수산부, 2021)

연안 해역의 종합 평가 결과와 해양생태도 비교를 진행하였다. 해양생태도는 해양수산부에서 해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률 제 12조에 따라 해양생태계를 생태적·경관적 가치에 따라 등급화한 지도로, 2006년부터 2013년까지의 해양생태계 기본조사를 활용하여 제작되었다(해양수산부, 2021). 해양생태도에서는 해양보호생물의 서식지와 산란지, 해양생태계 우수성, 해양생물다양성, 해양보호구역 포함 유무를 통해 평가하는 반면, 종합 평가는 인간 활동과 탄소에 의한 기후조절 능력을 고려한 생태계 평가이기 때문에 두 평가 모두 생태계의 상태를 나타내지만 목적이 다소 다른 것을 알 수 있다. 해양생태도 평가 결과 대부분 1등급으로 나타났으며,

동부산 권역의 해양생태계는 2등급인 것으로 나타났다. 종합 분석 결과에서도 동부산 권역의 건강성이 낮은 것으로 나타났지만, 서식지를 위협하는 여러 활동들이 중첩되는 구역의 건강성이 더욱 낮은 것으로 나타났다. 정량적으로 평가되는 연안 해역 탄소보유량 평가와 인간 활동이 중첩되는 지도의 픽셀별 위험도 값을 알 수 있는 서식지 위험도 평가는 1~3등급으로 구분하는 해양생태도와 다르게 생태계의 상태를 보다 자세하게 확인할 수 있어 해양생태계 평가 시 활용성이 높을 것으로 판단된다.



VI. 결론

본 연구에서는 생태계서비스 평가 모델인 InVEST를 적용하여 인간 활동과 기후변화의 영향을 받는 부산 육상과 연안역의 탄소보유능 및 서식지 상태를 파악하고자 하였다.

평가 결과 첫 번째, 기후 위기에 대응하기 위한 자연기반해법 활용을 위해 부산 육상 지역과 연안 육역을 대상으로 InVEST Carbon 모델 적용 결과 토지 피복을 기반으로 평가되기 때문에 국내에서 주어진 여건으로 적용이 가능함을 확인하였다. 도심지 개발로 인해 과거(2007년) 대비 탄소보유량이 점차 감소하는 것을 알 수 있었으며, 행정구역 중 보유량이 가장 많은 기장군의 탄소보유량 감소율이 가장 높은 것으로 나타났다. 부산시가 탄소중립 실현에 기여하려면 탄소보유능이 높은 지역의 손실을 최소화하기 위해 개발 규제를 강화하고 보전하는 방안이 필요할 것이며, 탄소보유능이 낮은 지역은 개발을 지양하고 녹지를 확대할 수 있는 대안을 제시하고 탄소보유를 늘릴 수 있는 기술 개발이 필요할 것으로 보인다. 연안 육역의 경우 개발 지구 전체를 포함하여 평가하게 될 경우 더 많은 탄소보유량이 감소할 것이며, 탄소보유량 손실뿐만 아니라 탄소흡수원이 제거되므로 잠재적인 탄소 가치까지 고려한 후 개발이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

두 번째, 본 연구에서는 연안 육역과 연안 해역을 동시에 고려한 연구가 많이 진행되지 않아서 환경 특성이 다른 두 지역을 동시에 비교하고자 하였다. Carbon, Coastal Blue Carbon 모델을 적용하여 연안 육역과 연안 해역의 탄소보유량 평가 결과 공유수면 매립, 항만 건설 등으로 연안 해역의 면적이 감소하는 반면 연안 육역의 면적은 증가하지만, 연안 육역에서 증가되는 탄소보유량의 약 21배가 연안 해역에서 손실되기 때문에 연안역 개

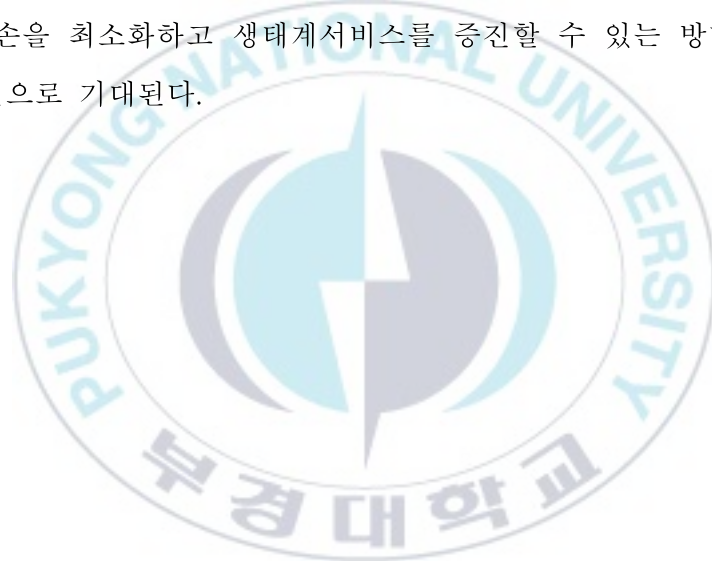
발 시 탄소보유에 중요한 서식지를 포함하지 않도록 하여 탄소보유 뿐만 아니라 잠재적인 탄소 흡수 가치의 손실을 최소화해야 할 필요가 있다. 연안 육역의 서식지 질(Habitat Quality) 및 연안 해역의 서식지 위험도 평가(Habitat Risk Assessment) 결과 두 연안역 모두 절반 혹은 절반 이상의 지역이 질이 낮거나 위험도가 높은 것으로 나타났기 때문에 서식지가 훼손될 가능성이 높은 것을 의미하며, 서식지 보전 및 지속가능한 이용을 위해 관리가 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로 탄소보유량과 서식지 상태를 종합하여 연안 육역과 연안 해역을 분석하였다. 연안 육역의 경우 가덕도, 이기대, 영도 일부 지역의 생태적 중요도가 높은 것으로 추정되며, 시가지, 산업단지, 부두, 항만 지역과 그 주변 일대는 건강성이 낮은 상태인 것으로 추정된다. 연안 해역의 경우 낙동강 하굿둑 하부 지역의 생태적 중요도가 높으며, 다대포 주변, 가덕도와 영도 해안선 주변 일부 지역의 건강성이 다소 낮은 것으로 추정되었다. 생태자연도, 국토환경성평가, 해양생태도의 선행연구들과 비교한 결과 경향성은 유사한 것으로 나타났지만 선행연구에서는 인간의 영향 혹은 탄소보유를 고려하지 않으며, 탄소보유량이 많거나 서식지 가치가 높더라도 선행연구에서 가치가 낮은 등급으로 분류될 경우 개발될 가능성이 있으므로 이를 종합적으로 고려해야 할 것이다.

본 연구에 적용된 InVEST 모델은 다른 복잡한 모델의 평가에 비해 간소하게 평가될 수 있지만, 다양한 생태계서비스 평가가 가능하고 오픈소스이기 때문에 전 세계적으로 유용하게 사용되고 있다. 또한 입력 자료가 비교적 단순하고 모델 구동 시간이 길지 않아 지역의 특성에 따라 값을 달리 입력하고 여러 시나리오 평가를 실시할 수 있다. 다만 Carbon 모델에 필요한 탄소보유 계수의 경우 시간 경과에 따른 탄소보유량의 변화를 나타내지 않기 때문에 우리나라 특성을 반영한 탄소 저장고별 탄소보유 계수의 개발

이 필요할 것이다. 연안 해역 탄소보유량 및 서식지 위험도 평가에서는 선행연구와 관련 자료 부재 및 모델 특성상 해양 수심을 고려하지 않기 때문에 과소 평가됐을 가능성이 높으며, 향후 탄소보유 기능을 하는 해양 서식지를 식별하고 분포 현황을 조사하여 각 서식지의 탄소보유능을 규명하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 향후 탄소중립, 생물다양성 및 생태계 보전, 개발 행위 및 환경영향평가 등 목적에 따라 InVEST 모델을 선정하여 탄소보유와 서식지를 고려한 평가를 실시하고, 개발 규제 혹은 우선 관리 지역을 선정하여 생태계 훼손을 최소화하고 생태계서비스를 증진할 수 있는 방향을 제언할 수 있을 것으로 기대된다.



참 고 문 헌

[한글 문헌]

- 광주혁신추진위원회. 2020. 제13차 시정혁신권고문 - 기후위기대응을 선도하여 2050 탄소중립도시 달성.
- 국립공원연구원. 2019. 국립공원 생태계서비스 가치평가 연구 - 설악산·덕유산·무등산·변산반도국립공원을 대상으로 -. 국립공원공단.
- 국립생태원. 2019. 습지보호지역 생태자산·생태계서비스 평가를 위한 가이드라인.
- 김나영. 2018. 서울시 내 고립된 녹지패치의 서식지 잠재성 평가. 서울대학교 환경대학원. 조경학 석사학위논문.
- 김보라, 성기준. 2010. 비점오염저감 및 탄소축적을 고려한 적정 수변지역 설계방법. 대한환경공학회지. 32(11): 1,030-1,037.
- 김종성, 김충기, 유근제, 황상일. 2017. 개발사업 환경영향평가 시 토양중점관리지역 선정을 위한 예비연구. 환경영향평가. 26(6): 457-469.
- 김충기, 홍현정, 이현우, 주우영. 2017. 생태계서비스 기반의 자연자본 지속가능성 지수 개발 연구(Ⅱ). 한국환경정책평가연구원.
- 김태연, 송철호, 이우균, 김문일, 임철희, 전성우, 김준순. 2015. InVEST 모델을 이용한 서식처 가치 평가 - 제주도를 중심으로 -. 환경복원녹화. 18(5): 1-11.
- 김태환, 박상률, 김영균, 김종협, 김승현, 김정하, 정익교, 이근섭. 2008. 23(3): 241-250.
- 노영희. 2016. 탄소저장량 및 공간분포 추정 기법 소개 - 기후변화 정책 지원을 위한 기반 자료의 구축. Science & Technology Policy. 26(5):

46-51.

- 노영희, 김충기, 홍현정. 2016. 제주 생태계 조절서비스의 시계열적 변화: 탄소고정량 추정 및 경제성 평가를 중심으로. 환경정책. 24(2): 29-44.
- 서새별. 2017. InVEST 모델을 활용한 남한강 상류 유역의 서식지 분석. 이화여자대학교 대학원. 환경공학 석사학위논문.
- 성웅기, 최재연, 유재진, 김동우, 손승우. 2020. 장기미집행공원 개발에 따른 도시 식생 탄소 흡수량에 미치는 영향 및 경제적 가치 평가. 한국산학기술학회논문지. 21(10): 361-371.
- 안소은. 2013. 의사결정지원을 위한 생태계서비스의 정의와 분류. 환경정책연구. 12(2): 3-16.
- 안소은, 주우영, 신유진, 장진, 권혁수, 김충기, 김현노, 설아라, 이홍림, 최원일, 허학영. 2020. 의사결정 지원을 위한 국가 생태계 평가체계 구축. 환경정책. 28(2): 101-129.
- 안순모, 이지영, 정신재. 2006. 한국습지학회논문집. 8(3): 39-49.
- 여운상, 오동하, 지창환, 김기욱, 정희은, 박수진, 성기준, 김영하, 정세화. 2020. 부산광역시 해양생태계 보전·관리 세부실천계획(2021~2030). 부산광역시.
- 온실가스종합정보센터. 2021. 2019 배출권거래제 운영결과보고서. 환경부
- 이지웅, 김성균. 2015. 우리나라 적정 사회적 할인율 및 탄소의 사회적 비용 추정. 에너지경제연구원. 185-193.
- 이창훈, 곽소윤, 김충기, 배현주, 서양원, 안소은, 강완모, 김지은, 신정우. 2016. 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구. 한국환경정책평가연구원.
- 이현우, 김충기, 홍현정, 노영희, 강상인, 김종호, 신상철, 이수재, 김태운, 강진영, Spencer Wood, David Fisher. 2015. 자연자본의 지속가능성

- 제고를 위한 의사결정 지원체계 개발 - 생태계서비스 분석을
중심으로. 한국환경정책평가연구원
- 이현우, 김충기, 홍현정. 2016. 생태계서비스 기반의 자연자본 지속가능성
지수 개발 연구(I). 한국환경정책평가연구원
- 장남정. 2021. 기후위기 시대, 전라북도 탄소중립 대응 기본방향.
전북연구원 이슈브리핑 vol, 247.
- 전성우, 김재욱, 정희철. 2013. 생태계 서비스 가치평가를 위한 산림 유형
분류 방안 - 임상도와 토지피복지도 활용을 중심으로 -.
환경복원녹화. 16(3): 31-39.
- 정민곤. 2013. Mapping Ecosystem Services and Statistical Analysis for
Ecosystem-Based Management of Coastal Areas. 연세대학교
대학원. 도시환경공학 석사학위논문.
- 정승욱. 2021. 바다숲 상태 및 군집 구조 평가를 위한 생태학적 모델 개발.
부경대학교 대학원. 생태공학 박사학위논문.
- 최지영, 이영수, 이상돈. 2019. 도시개발에 따른 생태계서비스 가치 평가
연구: 부산 에코델타시티 사업을 대상으로. 환경영향평가. 28(5):
427-439.
- 최지영. 2020. InVEST모델을 이용한 국내 생태계서비스 평가 및 개발정책
활용 연구. 이화여자대학교 대학원. 환경공학 박사학위논문.
- 최지영, 오종민, 이상돈. 2021. 서울시 습지지역의 탄소저장 및 경제적 가치
평가에 대한 연구. Ecology and Resilient Infrastructure. 8(2):
120-132.
- 충남연구원. 2018. 연안역 블루카본 잠재적 가치평가 연구용역.
- 환경부. 2016. 국가 생태계서비스 가이드라인.
- 환경부. 2021a. 2021년 환경부 탄소중립 이행계획.

[외국 문헌]

- Ansong J., Gissi E. and Calado H. 2017. An Approach to Ecosystem-based Management in Maritime Spatial Planning Process. *Ocean&Coastal Management*. 141: 65-81.
- Arunyawat S. and Shrestha R.P. 2016. Assessing Land Use Change and Its Impact on Ecosystem Services in Northern Thailand. *Sustainability*. 8(8): 768.
- 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*. 43:8
- Caro C., Marques J.C., Cunha P.P. and Teixeira Z. 2020. Ecosystem Services as a Resilience Descriptor in Habitat Risk Assessment Using the InVEST Model. *Ecological Indicators*. 115: 106426.
- Choi H.A., Lee W.K., Song C., Forsell N., Jeon S., Kim J.S. and Kim S.R. 2016a. Selecting and Applying Quantification Models for Ecosystems Services to Forest Ecosystems in South Korea. *Journal of Forestry Research*. 27(6): 1373-1384.
- Choi S.K., Kim S.G., Lee K.S. and Li W.T. 2016b. The Ecological Importance of the Dwarf Seagrass *Zostera japonica* in Intertidal Areas on the Southern Coast of Korea. *Ocean Science Journal*. 51(1): 1-12.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hanno B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutto P and van den Belt M. 1997. The Value of the World's Ecosystem

- Services and Natural Capital. *Nature*. 387: 253–260.
- Daily G.C. 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press.
- de Groot R.S., Wilson M.A. and Boumans R.M.J. 2002. A Typology for the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services. *Ecological Economics*. 41: 393–408.
- Delpy F. and Zari M.P. 2021. Ecosystem Services Assessment Tools for Regenerative Urban Design in Oceania. *Sustainability*. 13(5): 2825.
- Dong W., Shu J., He P., Ma G. and Dong M. 2012. Study on the Carbon Storage and Fixation of *Phragmites australis* in Beiyangdian Demonstration Area. *Procedia Environmental Sciences*. 13: 324–330.
- Ehrlich P. and Ehrlich A. 1981. *Extinction: the Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. Random House.
- Goulding M., Venticinque E., Ribeiro M.L.B., Barthem R.B., Leites R.G., Forsberg B., Petry P., Silva-Junior U.L., Ferraz P.S. and Canas C. 2018. Ecosystem-based Management of Amazon Fisheries and Wetlands. *Fish and Fisheries*. 20(1): 138–158.
- Guerry A.D., Ruckelshaus M.H., Arkema K.K., Bernhardt J.R., Guannel G., Kim C.K., Marsik M., Papenfus M., Toft J.E., Verutes G., Wood S.A., Beck M., Chan F., Chan K.M.A., Gelfenbaum G., Gold B.D., Halpern B.S., Labiosa W.B., Lester S.E., Levin P.S., McField M., Pinsky M.L., Plummer M., Polasky S., Ruggiero P., Sutherland D.A., Tallis H., Day A. and Spencer J. 2012. Modeling Benefits from Nature: Using Ecosystem Services to Inform Coastal and Marine Spatial Planning. *International Journal of Biodiversity*

- Science, Ecosystem Services & Management. 8: 107–121.
- Harvey B.J., Nash K.L., Blanchard J.L. and Edwards D.P. 2018. Ecosystem-based Management of Coral Reefs under Climate Change. *Ecology and Evolution*. 8(12): 6354–6368.
- He C., Zhang D., Huang Q. and Zhao Y. 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.
- Hou Y., Li B., Muller F. and Chen W. 2016. Ecosystem Services of Human-dominated Watersheds and Land Use Influences: A Case Study from the Dianchi Lake Watershed in China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188(11): 652.
- IPCC. 2018. GLOBAL WARMING OF 1.5 °C (Summary for Policymakers).
- IPCC. 2021. Climate Change 2021 - The Physical Science Basis (Summary for Policymakers).
- Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases(IWG). 2021. Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide. United States Government.
- Keller A.A., Fourmier E. and Fox J. 2015. Minimizing Impacts of Land Use Change on Ecosystem Services Using Multi-criteria Heuristic Analysis. *Journal of Environmental Management*. 156: 23–30.
- Lin Y.P., Lin W.C., Wang Y.C., Lien W.Y., Huang T., Hsu C.C., Schmeller D.S. and Crossman N.D. 2017. Systematically Designating Conservation Areas for Protecting Habitat Quality and

- Multiple Ecosystem Services. *Environmental Modelling & Software*. 90: 126-146.
- MA. 2005. *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press.
- Michaelowa A., Stronzik M., Eckermann F. and Hunt A. 2003. Transaction costs of the Kyoto Mechanisms. *Climate Policy*. 3: 261-278.
- Mok J.I. 2019. *Creating Added Value for Korea's tidal flats: Using Blue Carbon as an Incentive for Coastal Conservation*. Master's Thesis. Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego.
- Piyathilake I.D.U.H., Udayakumara E.P.N., Ranaweera L.V. and Gunatilake S.K. 2021. *Modeling Predictive Assessment of Carbon Storage Using InVEST Model in Uva Province, Sri Lanka*. *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Sallustio L., Toni A.D., Strollo A., Febbraro M.D., Gissi E., Casella L., Geneletti D., Munafo M., Vizzarri M. and Marchetti M. 2017. Assessing Habitat Quality in Relation to the Spatial Distribution of Protected Areas in Italy. *Journal of Environmental Management*. 201: 129-137.
- Sharp R., Douglass J. and Wolny S. 2020. *InVEST User's Guide - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Version 3.9.0.*
- Studwell A., Hines E., Nur N. and Jahncke J. 2021. *Using Habitat Risk Assessment to Assess Disturbance from Maritime Activities to Inform Seabird Conservation in a Coastal Marine Ecosystem*. *Ocean*

- and Coastal Management. 199: 105431.
- Sudirman N., Helmi M. and Susetyo A.N. 2018. Modeling Mangrove 'Blue Carbon' Ecosystem Service in Jakarta Bayas an Impact of Coastal Development. E3S Web of Conferences. 73: 04023.
- TEEB. 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations. Pushpa, Kumar(Ed). Routledge.
- 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 Environmental Protection. 5: 1572-1587.
- Vorstius A.C. and Spray C.J. 2015. A Comparison of Ecosystem Services Mapping Tools for Their Potential to Support Planning and Decision-making on a Local Scale. 2015. Ecosystem Services. 15: 75-83.
- Wahyudi A.J., Rahmawati S., Irawan A., Haditanto 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., 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. 55(1): 85-97.
- Wei F. and Zhan X. 2019. Delineating Urban Growth Boundaries with Ecosystem Service Evaluation. Sustainability. 11(19): 5390.
- Westman W.E. 1977. How Much Are Nature's Services Worth?. Science. 197(4307): 960-964.

- Xu L., Chen S.S., Xu Y., Li G. and Su W. 2019. Impacts of Land-Use Change on Habitat Quality during 1985-2015 in the Taihu Lake Basin. *Sustainability*. 11(13): 3513.
- 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*. 243: 106900.
- Zhai T., Wang J., Fang Y., Qin Y., Huang L. and Chen Y. 2020. Assessing Ecological Risks Caused by Human Activities in Rapid Urbanization Coastal Areas: Towards an Integrated Approach to Determining Key Areas of Terrestrial-Oceanic Ecosystems Preservation and Restoration. *Science of the Total Environment*. 708: 135153.
- Zhang H., Zhang C., Hu T., Zhang M., Ren X. and Hou L. 2020a. Exploration of Roadway Factors and Habitat Quality Using InVEST. *Transportation Research Part D*. 87: 102551.
- Zhang Y., Jin R., Zhu W., Zhang D. and Zhang X. 2020b. Impacts of Land Use Changes on Wetland Ecosystem Services in the Tumen River Basin. *Sustainability*. 12(23): 9821.
- Zhao Z., Liu G., Mou N., Xie Y., Xu Z. and Li Y. 2018. Assessment of Carbon Storage and Its Influencing Factors in Qinghai-Tibet Plateau. *Sustainability*. 10(6): 1864.

[인터넷]

국립해양조사원. 2021. 국가해양정보마켓센터. <http://www.khoa.go.kr/komc/>

국토교통부. 2021. 국가공간정보포털. <http://www.nsdi.go.kr/lxportal/?menuno=2679>

환경부. 2021b. 국토환경성평가지도. <https://ecvam.neins.go.kr/main.do>

환경부. 2007, 2020, 2021c. 환경공간정보서비스. <https://egis.me.go.kr/main.do>

해양수산부. 2021. 해양환경정보포털.

<https://www.meis.go.kr/portal/main.do#none>

NOAA. 2021. Ecosystem-Based Management.

<https://ecosystems.noaa.gov/EBM101/WhatIsEcosystem-BasedManagement.aspx>

[분석 프로그램]

Arc GIS MAP 10.5.1.

InVEST v.3.9.0 - Carbon, Coastal Blue Carbon, Habitat Quality,
Habitat Risk Assessment.

[지도 제공]

낙동강관리본부 낙동강하구에코센터. 낙동강하구 새섬매자기,갈피 분포 지도.

국립해양조사원. 부산광역시 재질분포도.

Appendix

a. Input Data of InVEST Model

– Habitat Quality Model

Habitat Quality: loaded from autosave

File Edit Development Help

InVEST version 3.9.0 | [Model documentation](#) | [Report an issue](#)

✗	Workspace			
✓	Results suffix (optional)			
✗	Current Land Cover (Raster)			
✓	Future Land Cover (Raster) (Optional)			
✓	Baseline Land Cover (Raster) (Optional)			
✗	Threats Data			
✓	Accessibility to Threats (Vector) (Optional)			
✗	Sensitivity of Land Cover Types to Each Threat, File (CSV)			
✓	Half-Saturation Constant	0.05		

– Habitat Risk Assessment Model

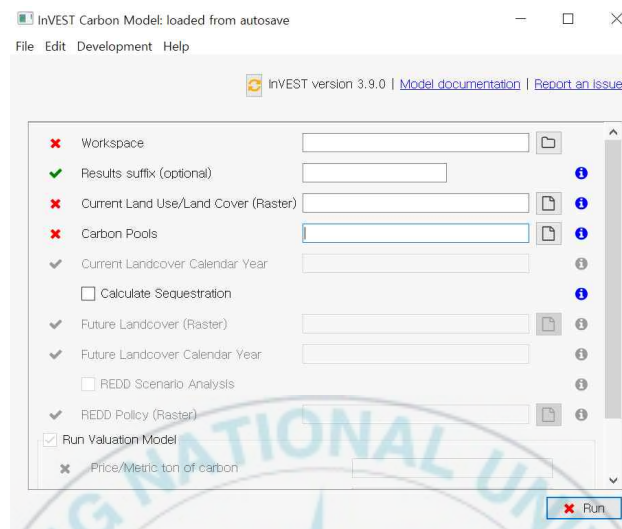
Habitat Risk Assessment: loaded from autosave

File Edit Development Help

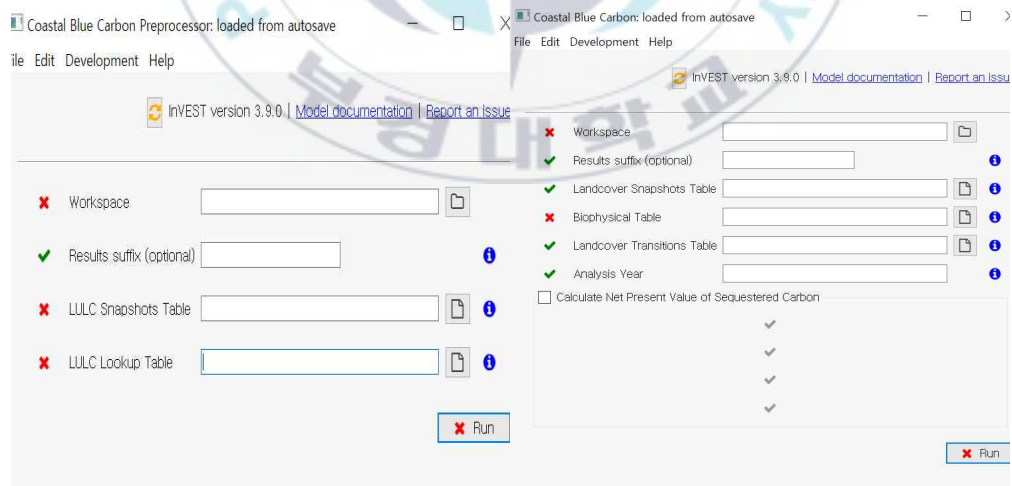
InVEST version 3.9.0 | [Model documentation](#) | [Report an issue](#)

✗	Workspace			
✓	Results suffix (optional)			
✗	Habitat Stressor Information CSV or Excel File			
✗	Criteria Scores CSV or Excel File			
✗	Resolution of Analysis (meters)			
✗	Maximum Criteria Score			
✓	Risk Equation	Euclidean		
✓	Decay Equation	Linear		
✗	Area of Interest (Vector)			
☐ Generate GeoJSONs for Web Visualization				

– Carbon Model



– Coastal Blue Carbon Model



b. Land Cover Map of Ministry of Environment

Table 17. Land Cover Map

(환경공간정보서비스 참고)

대분류 (7개)		중분류 (22개)		세분류 (41개)	
분류항목명	분류코드	분류항목명	분류코드	분류항목명	분류코드
시가화 · 건조지역	100	주거지역	110	단독주거시설	111
				공동주거시설	112
		공업지역	120	공업시설	121
		상업지역	130	상업·업무시설	131
				혼합지역	132
		문화·체육· 휴양지역	140	문화·체육·휴양 시설	141
		교통지역	150	공항	151
				항만	152
				철도	153
				도로	154
				기타	155
		공공시설지역	160	교통·통신시설	161
				환경기초시설	162
				교육·행정시설	163
농업지역	200	논	210	경지정리가 된 논	211
				경지정리가 안 된 논	212
				경지정리가 된 밭	221
		밭	220	경지정리가 안 된 밭	222
				시설재배지	231
		시설재배지	230	시설재배지	231
		과수원	240	과수원	241
		기타재배지	250	목장·양식장	251
				기타재배지	252

산림지역	300	활엽수림	310	활엽수림	311
		침엽수림	320	침엽수림	321
		혼효림	330	혼효림	331
초지	400	자연초지	410	자연초지	411
		인공초지	420	골프장	421
				묘지	422
				기타 초지	423
습지 (수변식생)	500	내륙습지 (수변식생)	510	내륙습지 (수변식생)	511
		연안습지	520	갯벌	521
				염전	522
나지	600	자연 나지	610	해변	611
				강기슭	612
				암벽·바위	613
		인공 나지	620	채광지역	621
				운동장	622
				기타 나지	623
수역	700	내륙수	710	하천	711
		해양수	720	호소	712
				해양수	721