

인위적 위험요인에 따른 생태계서비스 평가를 활용한 대응방안 제시 연구

최지영* · 이동근**†

*서울대학교 농생명과학연구원

**서울대학교 조경·지역시스템공학부

A Study on the countermeasures using ecosystem services evaluation according to artificial dangerous areas

Jiyoung Choi* · Dong kun Lee**†

*Research Institute of Agriculture and Sciences, Seoul National University, Republic of Korea 1, Department of Landscape

**Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

(Received : 10 February 2025, Revised : 21 February 2025, Accepted : 21 February 2025)

요약

2019년 제25차 IPCC 기후변화 당사국 총회에서는 모든 국가들이 2050년까지 탄소중립을 달성해야 된다고 촉구하였다. 이에 따라 2020년 환경부는 기후변화 대응을 위해 탄소중립을 발표하였으며, 2021년에는 2050 장기 저탄소 발전전략을 합의하였고, 2050 탄소중립 달성을 위한 탄소중립기본법이 국회를 통과하였다. 이에 따라 개발사업에서도 탄소중립실천을 위한 친환경 개발 전략을 수립하고 있다. 특히, 신공항 국토개발종합계획에서는 지속가능한 친환경 탄소중립 공항 조성을 위해 정책목표와 전략을 수립하고 있다.

본 연구에서는 지속가능한 탄소중립 신공항 개발계획 중 가덕 신공항을 연구대상지로 선정하여 InVEST Carbon모형을 활용하여 개발에 따라 변화되는 탄소저장량을 평가하였다.

연구결과 개발 전의 가덕도와 대안 1의 탄소고정량을 비교하였을 때, 약 7.3%가 감소한 수치인 16,580.23 Mg이 감소된 것으로 도출되었다. 그리고 대안 2의 탄소저장량은 개발 전 보다 2.69%가 감소한 수치인 6,104.08 Mg이 감소한 것으로 도출되었다. 대안 2는 대안 1보다 개발 면적이 1.92km²로 더 큰 면적을 가지고 있지만, 탄소저장량 감소 비율은 대안 1보다 약 4.6% 더 낮게 도출되었다.

본 연구는 가덕도 신공항 건설에 대한 탄소중립 목표와 탄소흡수원 보전의 중요성을 가지고 개발에 따른 탄소저장량을 평가하여 비교하였다. 자연생태분야의 평가 및 예측으로 사전 대응책 마련이 가능하다고 판단되며, 사전 인지를 통하여 자연생태 관리 정책의 방향을 사전 대응책으로 기여가 가능할 것으로 예측된다. 또한, 환경영향평가서 중 온실가스분야에서 활용될 수 있다고 판단되며, 생태계서비스 값을 통한 비교를 통해 생태계 보전 관련 의사결정과정에서 기초자료로 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 자연생태계 평가, 생태계서비스, 탄소중립, 탄소상쇄 감축제도

Abstract

In 2019, all countries participating in the IPCC at COP 25 agreed on the need to achieve carbon neutrality by 2050. Accordingly, the Ministry of Environment presented carbon neutrality plans for climate change response in 2020, and announced 2050 LEADS in 2021. In addition, the National Assembly passed the framework act on carbon neutrality to achieve carbon neutrality in 2050. Environmentally-friendly development strategies are being adopted in development projects with the goal of achieving carbon neutrality. In particular, as part of comprehensive development plans for new airports, policy goals and strategies are being established to build airports that are sustainable, environmentally-friendly and carbon neutral.

This study selected the Gadeok New Airport among new airport development plans for sustainable carbon neutrality, and analyzed Gadeok Island's carbon storage using the InVEST Carbon model. Changes in carbon storage were compared between Gadeok Island before development and two alternatives. A comparison between Alternative 1 and

† To whom correspondence should be addressed.

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

E-mail : dklee7@snu.ac.kr

• Jiyoung Choi Seoul National University, Seoul, Korea/Research Professor(jiychoi1@snu.ac.kr)

• Dong gun Lee Seoul National University, Seoul, Korea/Professor(dklee7@snu.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Gadeok Island in 2020 showed a 7.3% decrease in carbon storage, which is equivalent to 16,580.23 Mg. For the comparison between Alternative 2 and Gadeok Island, the decrease was much greater at 2.69%, or 6,104.08 Mg. Alternative 2 has a larger area than Alternative 1 by 1.92km², but the proportion of decrease in carbon storage was smaller by 4.6%. This study compared and assessed carbon storage for the Gadeok New Airport in consideration of the goal of achieving carbon neutrality and the importance of preservation of carbon sinks. Gadeok Island is rich in natural resources, including carbon sinks, leading to the issue of development versus preservation. As covered by environmental impact assessment, there is need to conduct further analytical research on carbon storage in relation to climate change response. The results can be utilized in the field of greenhouse gases, thereby serving as a basic reference for decision-making concerning ecological conservation policies in ecosystem service evaluation.

Key words : Natural ecosystem evaluation, Ecosystem service, Carbon neutral, Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation

1. 서론

전 지구적 기후변화는 21세기 후반까지 지구 온도가 최대 4.8℃까지 상승할 것으로 예측되고 있다. 이에 따른 이상기후, 자연재해 발생 증가뿐 아니라, 식량부족, 질병 등 환경·사회·경제 전반에 징후를 초래하는 것으로 보고되었다(Edenhofer, 2014). 지구 평균온도가 1850~1900년 대비 2017년 기준 1℃가 상승되었으며, 인간활동이 주요 원인인 것으로 발표되었다(Ministry of Environment, 2020). 세계이상 기후로 인한 건강과 환경에 대한 위험 문제를 범지구적인 측면에서 지속적으로 전망하고 있으며, 이에 대한 취약성 영향으로 온실가스 감축의 필요성이 제기되고 있다(Solomon et al., 2007; Edenhofer, 2014).

2019년 제25차 기후변화 당사국 총회에서는 이제는 행동해야 할 시간(Time for Action)을 강조하였으며, 2050년까지 전 세계의 탄소중립을 달성해야됨을 촉구하였다(Edenhofer, 2014). 국내에서는 2020년 12월 환경부는 기후변화 대응을 위해 탄소중립을 발표하였으며, 2021년에는 2050 장기 저탄소 발전전략(LEDS: Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategy)과 2030 국가 온실가스 감축 목표(NDC: Nationally Determined Contribution)를 합의하였다. 2021년 8월에는 2050 탄소중립 달성을 위한 탄소중립 기본법이 국회를 통과하였다.

온실가스 감축으로 인한 경제적 피해를 최소화하며, 협약을 이행하기 위해 장기 저탄소 발전전략으로 탄소중립 7개 부문

별 비전 및 전략을 발표하였다(Table 1). 이 중 산림의 탄소 흡수부문을 보면, 2009~2018년 동안 배출된 이산화탄소 중 30%는 식생에 저장되거나 지표에 흡수되어 산림을 통한 이산화탄소 저장 역할이 크다고 보고되고 있다(National Institute of Forest Science, 2012; 2015). 국내 국토면적 대비 산림비율이 OECD 국가 중 4위로, 높은 비율의 산림을 가지고 있는 만큼(National Institute of Forest Science, 2015), 탄소흡수원 큰 역할을 하고 있는 기후변화와 관련한 산림지역의 중요성이 증폭되고 있다(Park et al., 2011; National Institute of Forest Science, 2012; 2015). 산림 면적 유지를 통한 탄소흡수원 보호는 탄소저장 증가 전략을 위한 중요한 전략 방법이다. 산림 외, 주요 탄소흡수원인 습지, 연안의 자연생태계 주요 흡수원의 보호 및 확대, 도시화 따른 훼손지역과 주요 생태축에 대한 산림복원, 도시 숲 조성을 통한 산림의 탄소 흡수능력 최대 유지 방법이 있다(Ministry of Environment, 2020).

이에 따라 환경부는 건강한 자연생태계 조성 및 훼손지역에 대한 생태계 복원·관리 강화가 필요성을 말하고 있으며, 생태계와 생물다양성 보전정책을 기후위기 해결과 연계하는 전략 추진계획을 밝혔다. 탄소중립은 대기 중 온실가스 농도가 증가하지 않도록 탄소 순 배출량이 0이 되는 Net-Zero 달성 목표를 두고 있다(Ministry of Environment, 2020). 이를 위해 탄소 포집·저장·활용 기술(CCUS, Carbon Capture Utilization & Storage)을 적용한 온실가스 제거 방법이 있으며, 또한 자

Table 1. A partial vision and strategy of 2050 carbon neutral in Korea (Ministry of Environment, 2020)

| No | Part | Strategy content |
|----|---|---|
| 1 | Energy provision | <ul style="list-style-type: none"> Renewable energy, power supply transition centered green hydrogen CO₂ Capture utilization |
| 2 | Industry | <ul style="list-style-type: none"> Alternative new technologies development (petroleum coke · naphtha) Smartization of factory, industrial complex |
| 3 | Transportation | <ul style="list-style-type: none"> Expansion of clean energy transportation Realization of autonomous car |
| 4 | Construction | <ul style="list-style-type: none"> Smart city construction Big data establishment of structure energy Green structure support |
| 5 | Wastes | <ul style="list-style-type: none"> promotion of reusing the wastes (high-value-added wastes) Eco-friendly disposal of wastes |
| 6 | Agriculture, livestock and fisheries products | <ul style="list-style-type: none"> Smartization of agriculture, livestock and fisheries sector Expansion of clean energy use |
| 7 | Carbon sink | <ul style="list-style-type: none"> Expansion of natural-based carbon sink sources (forest, wetlands, and coastal ecosystem) Increase in carbon storage through forest management and damaged land restoration Maintenance and management of maximizing carbon storage capacity of forest |

연과 생태의 탄소흡수 기능 강화와 숲의 복원 및 유지를 통한 산림경영으로 탄소흡수량을 증가시키는 방법이 있다(Kim et al., 2017; Förster et al., 2015). 국제사회의 온실가스 감축을 이행하기 위한 중간단계 목표를 두어, 탄소중립 관리를 할 수 있는 정책이 수립되고 있다(Ministry of Environment, 2020; Korea Environment Institute, 2020; Choo et al., 2021).

IPCC는 기후변화 적응과 감축 역할을 하는 산림지역의 기여 측면에 대한 중요성을 말하고 있다(Edenhofer, 2014). 자연 생태계는 기후변화의 충격을 흡수하는 버퍼의 역할을 한다(The Seoul Institute, 2020). 특히 산림지역은 육상생태계의 생태계 물질순환에 의해 대기로부터 CO₂를 흡수하는 기능을 하고 있는 주요 생태계서비스 항목이다. 또한, 주요 탄소흡수원으로 탄소 저장고인 지상부와 지하부 바이오매스, 낙엽층, 고사목, 토양, 목제품 형태로 탄소를 저장함으로써 기후변화 완화에 기여한다. 개발로 인한 자연생태계 훼손으로 토지이용 변화에 따라 기후 환경 변화 취약성이 증가하고 있다(The Seoul Institute, 2020). IPCC는 육상생태계가 토양 내 CO₂를 흡수하는 역할로 토지 이용 변화에 따른 탄소저장량의 공간적 탄소 추정 방법 기법의 필요성을 제시하고 있음에 따라(Edenhofer, 2014), 정부에서도 감축목표 계획과 평가를 위해 온실가스 감축 평가에 대한 객관적이고, 다양한 과학적인 모형을 활용 계획을 제시하였다.

많은 개발계획 중 국토개발종합계획에서는 지속가능한 탄소 중립 공항개발을 위해 탄소중립 시설 및 운영 기법 개발과 환경관리 목표에 대한 계획을 가지고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021). 탄소 저감 요소로 에너지 절감, 공항 주변 환경에너지 구축, 그린 모델링, 탄소 제거 기술 도입 등을 가지고 있으며, 탄소흡수 수단 강화 항목에서는 공항 주변과 개발 예정지역의 단계별 녹지 설계 검토, 탄소 흡수 성과 검토를 반영 계획을 가지고 있다.

연구목적은 탄소흡수원 평가 및 예측을 통하여 인위적 개발 예정 지역에 생태계서비스 평가를 통해 대응방안 과정에서 방법론의 가능성을 제시하고자 하였다. 본 연구에서는 개발 대안 추가 및 보완으로 변경이 발생하고 있는 지역인 가덕 신공항 건설사업을 연구대상지로 선정하였으며, 개발 계획도는 국토교통부에서 수립한 공항 분야 법정계획인 제6차 공항개발 종합 계획(2021~2025)을 참고하였다(Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2021). 본 계획에서는 개발대안이 두 가지(안)으로 계획되어 있으며, 대안(안)별 탄소저장량을 도출하여 사회-경제-환경인 세 분야의 상호적 조화 목적으로 지속가능한 친환경 탄소중립 공항 계획 목표에 기초하여 탄소저장량 손실이 적은 계획(안)을 비교·평가하고자 하였다. 이를 통해, 생태계서비스 중 탄소저장량 분석을 통하여 국내 기후변화 대응을 위한 탄소중립 관리에 온실가스 감축 평가에 적용될 수 있는 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 연구대상지 및 연구방법

2.1 연구대상지

본 연구의 연구지역은 신공항부지 예정지인 가덕도이다(Figure

1). 본 토지이용도 지도는 환경공간정보서비스(egis.me.go.kr)의 자료를 활용하여 연구지역의 2020년 토지이용별 면적을 나타냈다. 가덕신공항 건설 환경영향평가는 2022년~2023년에 전략환경영향평가를 시행하였고, 2024년~2025년 시기에 대해 환경영향평가를 작성하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021; Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024). 평가서에서는 침엽수림과 활엽수림의 조류 서식공간의 파괴로 조류 종의 서식지 훼손은 불가피할 것으로 보고되었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021).

신공항 사업은 동남권 신공항 개발을 통한 동남권 지역의 교통 확장으로, 관광 수요의 증가, 도시화로 인한 경제적 발전을 목표로 2007년 12월 계획안이 시작되었으며, 이에 따라 신공항 추진의 계획이 추진되었다(Gyeongnam Institute, 2010; Busan Development Institute, 2016; Lee, 2012). 이후, 지리적 입지선정 갈등과 사회적 갈등으로 15년 동안 지속되었다. 2021년 2월 가덕도 신공항 건설을 위한 특별법이 제정되었지만, 가덕도 내 신공항 건설 입지선정에서 자연 생태계가 우수한 지역으로 환경단체와의 갈등이 있다. 이에 대해 사전환경영향평가가 진행되어 사회·경제 및 비용적 요인들은 분석되었으나, 자연환경분야에서는 생태계에 대한 정량적인 평가 및 예측은 시행되지 않았기 때문에 사회-경제-환경 사이에 갈등에 대한 의견을 조율할 수 있는 평가 기초자료가 필요한 개발사업이다.

본 지역에 대한 선행연구로는 해양우수보전지역으로 해양생물에 관한 다양한 연구가 진행되었다(Baek et al., 2007; Huh and An, 2002; Woo, 2008; Koh et al., 2004). 이와 함께, 해양 생태계 군집 연구 외에는 매립과 도시화로 인해 저서생물에 대한 영향 연구(Yun and Paik, 2001), 부산 신항만 건설 전과 후에 대한 가덕도의 수리환경 변화 연구(Yoon et al., 2010), 그리고 가덕도와 밀양시에 대해 생태 발자국 평가를 통한 연구(Lee et al., 2011)가 선행되었다. 대부분 해양에 대한 생태자원에 대한 중요성 연구와 해양지역으로 개발 건설에 대한 수리 환경에 대한 영향 연구가 진행되어왔음을 알 수 있다. 그리고 본 지역의 제5차 전국자연환경조사 보고서에서는 다양한 법정 보호종의 서식이 보고되었다(National Institute of Ecology, 2017). 멸종위기 야생동물인 벌매(*Pernis ptilorhynchus orientalis*), 긴꼬리딱새(*Terpsiphone atrocaudata*), 새호리기(*Falco subbuteo*), 솔개(*Milvus migrans*), 매(*Falco peregrinus*)와 천연기념물 제204호 팔색조(*Pitta nympha*), 제 447호 두견이(*Cuculus poliocephalus*)가 보고가 된 지역이다(Ministry of Environment, 2020).

위와 같이 본 지역은 면적대비 산림비율이 높은 비율을 차지하고 있으며, 환경영향평가서 조사에서 생태·자연도 1등급 지역과 문화재보호법에 따른 보호구역에 포함하여 환경적·생태적으로 보전 가치가 높은 지역이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024). 또한, 공항 건설에 따른 도시화 진행이 예상되고 있는 지역으로 인위적 개발에 따른 생태계의 평가 및 예측 연구가 필요되고 있는 지역이다.

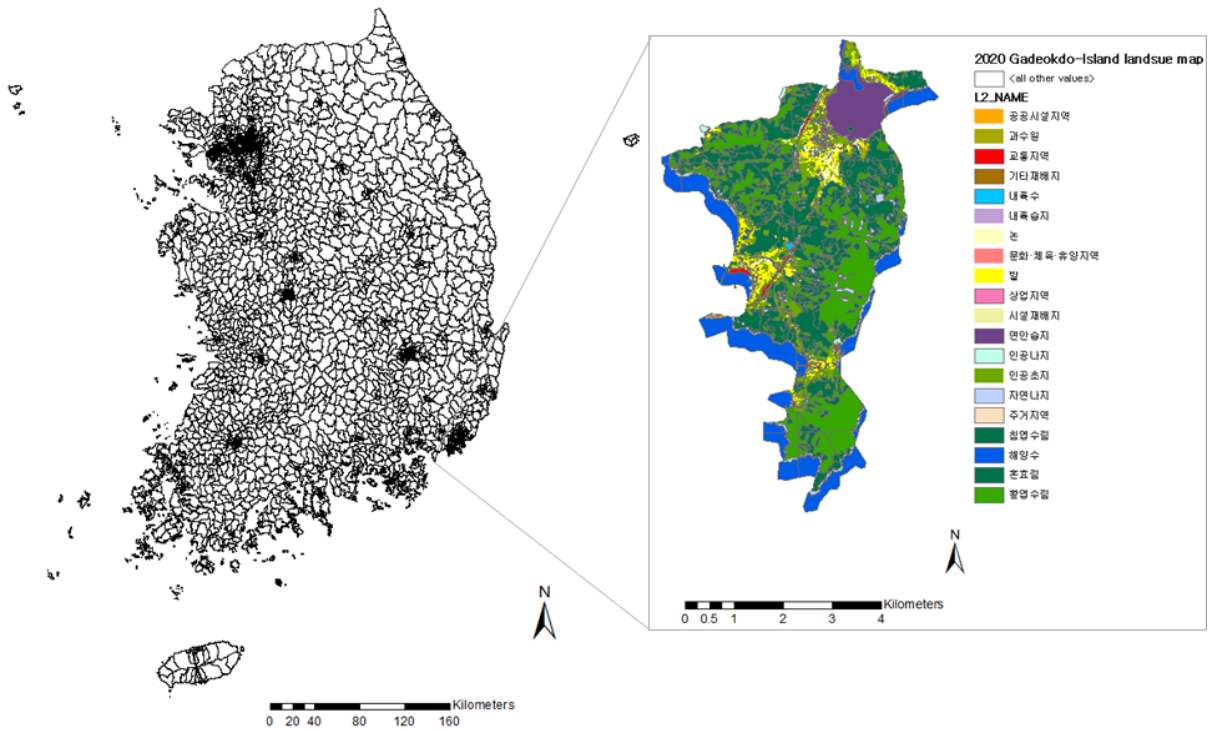


Fig. 1. Study area-2020 Gadeokdo-Island landuse map

Table 2. The area and ratio of each landuse classification in study area in 2020

| Landuse classification | Area (km ²) | Ratio (%) |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------|
| Residential area | 0.16 | 0.80 |
| Commercial area | 0.03 | 0.16 |
| Culture · athletic · recreation area | 0.00 | 0.02 |
| Traffic | 0.58 | 2.86 |
| Public facilities | 0.05 | 0.26 |
| Paddy | 0.18 | 0.88 |
| Field | 1.01 | 4.93 |
| Cultivation under structure | 0.00 | 0.01 |
| Orchard | 0.16 | 0.76 |
| Other farmland | 0.00 | 0.01 |
| Broad-leaved forest | 5.96 | 29.14 |
| Coniferous forest | 6.08 | 29.74 |
| Mixed forest | 2.23 | 10.92 |
| Artificial grassland | 1.51 | 7.39 |
| Inland wetland | 0.04 | 0.18 |
| Coastal wetland | 1.25 | 6.10 |
| Natural barren | 0.70 | 3.41 |
| Artificial barren | 0.46 | 2.26 |
| Inland water | 0.03 | 0.15 |
| Ocean water | 3.44 | - |
| Total | 20.45 | 100.00 |

2.2 연구방법

다양한 생태계서비스 평가기법들 중 본 연구에서는 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Service and Trade-off) 모델을 활용하였다. 본 모델은 National Capital Project로 스

텐포드 대학과 Natural Conservancy, WWF (World Wildlife Funds)가 공동으로 개발하였고, 자연자산과 경제적 상관관계를 분석할 수 있으며 측정된 생태계서비스 평가를 통해 정책 의사결정을 지원하는 목적으로 개발되었다(Choi et al., 2021).

전 세계적으로 각 국가에서 적용되는 모델로 2021년까지 27가지의 모듈이 개발되었다. 모델의 특징으로는 먼저 시·공간적으로 유연한 구조를 가지고 있다. 연구지역 단위부터 전 지구적 단위까지의 분석이 가능하며, 특정 시간과 과거 시간의 적용이 가능하다. 둘째, 토지이용도를 기반으로 한 모델로써 입력자료 확보가 용이하여 접근성이 높다. 셋째, 토지이용 계획과 토지이용도로 도출된 생태계서비스 결과값으로 개발정책 과정에서 자연과 환경적 가치를 고려할 수 있도록 개발되었다(Liu et al., 2017; Daily et al., 2015). 국내에서도 생태계서비스 평가 모델 중 하나로 평가되고 있으며(Kim et al., 2015; Lee et al., 2015; Kim et al., 2017), 국내에 적합한 입력자료를 통하여 지속적으로 적용되고 있다.

본 연구에서는 InVEST ver 3.9.0모델을 사용하였으며, Carbon모델을 적용하여 연구지역의 탄소저장량을 평가하였다. 입력자료 중 토지이용도는 환경공간정보서비스에서 제작된 최근 자료인 2020년 1:5,000 축척의 세분류 공간자료를 사용하였으며(egis.go.kr), 모델의 입력자료 구축은 ArcGIS ver. 10.3.1을 통해 가용 형식을 만들었다.

2.2.1 InVEST Carbon 모델

탄소저장은 생태계서비스 중 조절서비스로, 대기로부터 CO₂를 흡수하는 기능을 하고 있는 기후변화와 관련한 생태계서비스 항목이다. 다른 탄소저장 추정 모델(VISIT, CBM-CFS3,

InVEST, Forest Growth)들과 비교한 선행연구에서는 InVEST 모델은 오차율이 적고, 국내에서 적용 가능성이 높은 모델로 시사되었다(Choi et al., 2014).

본 모델의 첫 번째 입력자료는 연구지역의 토지이용도이다. 토지이용도는 ArcGIS 프로그램을 활용하여 모델에서 요구하고 있는 raster 형식으로 변환하였다. 그리고 두 번째 입력자료인 Carbon pool table은 Aboveground mass, Belowground mass, Soil carbon, Dead wood로 구성되어 있다(Table 3).

탄소 저장량자료는 Natural Capital Project 자료와 국내 선행 논문(Lee et al., 2015; Kim et al., 2017)에서 제시하고 있는 계수를 고려하여 구성하였다. 특히, 표 항목 중 Aboveground mass, Belowground mass의 탄소저장 값은 국내 임상별 단위 면적당 임목 축적량에 탄소저장계수를 곱하여 산출하여 국내 상황을 가장 잘 반영하고 있는 선행연구에서 제시한 값을 차용하였다(Kim et al., 2017). 입력자료와 공간자료 구축을 통해 탄소저장량을 산출하였고, 모델의 결과 단위는 Mg이다.

Table 3. Carbon pool table of InVEST Carbon model

| Land-use category | | Aboveground biomass | Belowground biomass | Soil carbon | Dead wood |
|------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------|
| Land cover Level I (7) | Land cover Level II (20) | | | | |
| Urban area | Residential area | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Commercial area | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Culture · athletic · recreation | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Traffic | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Public facilities | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Farmland | Paddy | 0 | 0 | 62 | 0 |
| | Field | 0 | 0 | 70 | 0 |
| | Cultivation under structure | 0 | 0 | 45.9 | 0 |
| | Orchard | 0 | 0 | 45.9 | 0 |
| | Other Farmland | 0 | 0 | 45.9 | 0 |
| Forest | Broad-leaved forest | 64.31 | 23.15 | 56 | 10 |
| | Coniferous forest | 42.9 | 11.6 | 38.8 | 13 |
| | Mixed forest | 54 | 17.36 | 47 | 12 |
| Grassland | Artificial grassland | 1.2 | 5 | 12 | 0 |
| Wetland | Inland wetland | 35.2 | 9.2 | 88 | 0 |
| | Coastal wetland | 1.3 | 1.3 | 240 | 0 |
| Barren area | Natural barren | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Artificial barren | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Water | Inland water | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Ocean water | 0 | 0 | 0 | 0 |

Table 4. Comparison between development alternative and land-use area in 2020

| Land-use category | | Development Plan 1 | | Comparison with changes in 2020 Inc/Dec(%) | Development Plan 2 | | Comparison with changes in 2020 Inc/Dec(%) |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|-------|---|-------------------------|-------|---|
| Level I | Level II | area (km ²) | % | | area (km ²) | % | |
| Urban area | Residential area | 0.14 | 0.51 | -12.50 | 0.16 | 0.54 | 0.00 |
| | Commercial area | 0.03 | 0.11 | 0.00 | 0.03 | 0.10 | 0.00 |
| | Recreational area | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Traffic | 4.64 | 16.90 | 700 | 7.13 | 24.27 | 1,1129.31 |
| | Public area | 0.05 | 0.18 | 0.00 | 0.05 | 0.17 | 0.00 |
| Farm land | Paddy | 0.18 | 0.66 | 0.00 | 0.18 | 0.61 | 0.00 |
| | Field | 0.94 | 3.42 | -6.93 | 0.95 | 3.23 | -5.94 |
| | Facility cultivation area | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Orchard | 0.16 | 0.58 | 0.00 | 0.16 | 0.54 | 0.00 |
| Forest | Other farmland | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Broad-leaf forest | 6.09 | 18.54 | -14.60 | 5.81 | 19.78 | -2.52 |
| | Coniferous forest | 5.88 | 21.41 | -3.29 | 5.86 | 19.95 | -3.62 |
| Grass land | Mixed forest | 2.13 | 7.76 | -4.48 | 2.18 | 7.42 | -2.24 |
| | Artificial grassland | 1.44 | 5.24 | -4.64 | 1.34 | 4.56 | -11.26 |
| Wet land | Inland wetland | 0.04 | 0.15 | 0.00 | 0.04 | 0.14 | 0.00 |
| | Coastal wetlands | 1.25 | 4.55 | 0.00 | 1.25 | 4.25 | 0.00 |
| Barren | Natural barren | 0.67 | 2.44 | -4.29 | 0.62 | 2.11 | -11.43 |
| | Artificial barren | 0.43 | 1.57 | -6.52 | 0.45 | 1.53 | -2.17 |
| Water | Inland water | 0.03 | 0.11 | 0.00 | 0.03 | 0.10 | 0.00 |
| | Ocean water | 3.36 | 12.24 | -2.33 | 3.15 | 10.72 | -8.43 |

3. 결과 및 고찰

3.1 2020년 토지이용도와 대안과의 변화 비교

연구지역의 신공항 건설 예정 대안 1안과 2안에 대해 개발에 따라 변화되는 토지이용도를 확인하고자 하였다. 개발 대안 1(안)에 따라 변화된 토지이용도의 증감율을 확인하였다 (Table 4). 크게 변화된 토지이용도는 교통지역이 약 700%의 증가율을 보였으며, 침엽수림(3.29%), 활엽수림(14.60%), 혼효림(4.48%)이 감소하여 산림지역은 총 22.4%의 감소율을 보였다. 그리고 개발 대안 2(안)에 토지이용도의 증감율은 교통지역이 약 1,1129%의 증가율을 보였으며, 침엽수림(3.62%), 활엽수림(2.52%), 혼효림(2.24%)이 감소하여 산림지역은 총 8.4%의 감소율을 보였다. 대안 2는 대안 1보다 교통지역이 2%가 높은 증가율을 보였으며, 산림지역은 0.1%가 낮은 감소율을 보였으며, 초지지역은 19.6%가 높은 감소율을 가진 대안으로 확인할 수 있었다. 습지의 탄소값은 가장 높았지만, 두 개발(안) 모두 습지지역의 개발은 없었다.

3.2 Carbon모델에 따른 탄소저장량 및 분석지도 결과

탄소저장량 결과 지도는 파란색으로 가까울수록 탄소저장량 높음을 나타내고, 빨간색으로 가까울수록 낮음을 나타낸다. 본 결과는 토지이용도의 입력자료를 통해 도출된 결과로 토지이용도 결과와 연계되어 설명할 수 있다. 연구결과 침엽수림 지역의 탄소저장량 보다 활엽수림 지역의 탄소저장량이 높은 것으로 시각적으로 확인할 수 있었다(Table 5). 국립산림과학원의 보고서의 내용 중 활엽수림 지역은 침엽수림 지역보다 탄소저장량이 높다는 결과와 동일한 맥락으로 보인다(National Institute of Forest Science, 2015). 그리고 도시·상업·주거 지역인 개발지역은 논·밭·채배지인 농경지지역 보다 탄소저장량은 낮게 도출되어 결과의 정확성을 확인할 수 있었다. 파란색으로 보이는 지역은 가덕도의 주요 연안습지 지역으로 연구지역에서 탄소저장량이 가장 높음을 확인할 수 있었다.

신공항예정 개발 대안 중 대안 1은 주요 산림지역에 개발 면

적이 포함되었기 때문에, 탄소저장량 감소량이 대안 2보다 큰 것으로 사료된다. 대안 2의 개발면적은 대안 1 보다 1.92km²의 면적이 더 큰 면적을 계획되어 있지만, 탄소저장량 감소 비율은 대안 1보다 약 4.6% 더 낮게 도출되었다(Table 5). 이는 토지이용도 면적 결과에서도 확인할 수 있었으며, 서쪽에 위치한 개발지역은 상업지역, 공공지역, 농경지역 있는 지역을 포함한 지역에 위치하였다.

결과적으로 탄소저장량 결과에서는 개발면적이 더 넓지만, 토지이용도에서 탄소저장량이 높은 산림지역 면적을 겹치지 않고, 개발지역과 해양지역이 포함되었던 대안 2안이 대안 1안보다 10,476.15Mg이 더 적게 감소되는 것으로 확인할 수 있었다. 개발에 따른 탄소저장량은 모두 감소하는 것으로 나타났다. 대안 1안의 탄소저장량 결과는 2020년 가덕도의 탄소저장량과 비교하였을 때, 약 7.3%가 감소하여 16,580.23Mg이 감소하였다. 그리고 대안 2의 탄소저장량은 2020년의 가덕도의 탄소저장량 보다 2.69%가 감소하였으며, 탄소저장량은 6,104.08Mg이 감소한 것으로 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 신공항 개발지역에 대해 탄소저장량 평가를 통해 개발 대안들을 예측하여 비교·평가하였다. 신공항은 국토개발종합계획에서 지속가능한 탄소중립 공항 조성 목표를 가지고 계획 수립된 개발이다. 탄소중립을 통한 환경관리 목표를 가지고 이산화탄소 저감과 탄소흡수원 보호 개발계획을 실천할 수 있도록 연구지역에 InVEST Carbon모델을 활용하여 탄소저장량을 평가하였다.

본 연구지역은 자연환경이 보전되고 있는 지역으로 개발과 환경보전 사이에서 갈등이 지속적으로 발생하고 있는 지역이다. 선행연구에서 발견된 종들은 구곡산과 응봉산의 가덕도 주요 산림 일대와 농경지 주변에 분포하는 것으로 보고되고 있는 (Ministry of Environment, 2020) 만큼 생태계 다양성이 유지되고 있는 지역임을 알 수 있다. 전략환경영향평가서에 따르면 범정보호종인 저어새(*Platalea minor*), 쇠제비갈매기(*Sterna*

Table 5. Carbon storage result of study areas according to the new airport development plan

| | 2020 Gadeokdo-Island | Development plan 1 | Development plan 2 |
|-------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Map of Carbon storage result | | | |
| Amount of carbon storage (Mg) | 227,244.55 | 210,664.32 | 221,140.47 |

albifrons), 검은머리갈매기(*Chroicocephalus saundersi*)가 발견되었고, 천연기념물 두견(*Cuculus poliocephalus*), 피꼬리(*Oriolus chinensis*), 말뚝가리(*Buteo buteo*)가 발견되었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021). 이중 두견은 주로 높은 산림지역에서 서식 및 번식하며, 먹이가 있는 농경지 주변의 산림에서도 서식하는 특성으로 영향을 크게 받는 종으로 사료된다. 또한, 말뚝가리는 개발에 따른 서식처 파괴로 도래수가 감소하는 것으로 보고되어, 연구지역의 공항부지로 인해 영향을 받을 수 있는 주요 종으로 판단된다. 이에 따라, 탄소저장량 평가뿐만 아니라, 생물다양성은 중요한 지표로 향후 연구로 서식처 질의 평가를 통한 중첩 분석이 필요하다고 판단된다. 또한, 생물 종 위치 포인트를 활용하여 종 분포 예측모델을 활용하여 인위적 위험에 따른 연구대상지의 주요 종의 대응방안 및 사후모니터링 등의 수립 과정에도 활용될 수 있다고 생각된다. 이를 통해 향후 개발정책 결정 과정에 있어 토지이용도 위치별 탄소저장량 비교 분석, 생물다양성 평가, 종 분포 예측 결과를 중첩하여 개발에 따른 생물 종의 보전적 대응방안 제시과정에도 도움을 줄 수 있다고 생각된다.

InVEST carbon모델 구동 과정에서 한계점은 존재한다. 모델은 탄소 순환 과정에서 토지이용도별 탄소량의 추가량과 손실량이 없다는 가정으로 구동된다. 탄소 순환은 해양, 대기, 육상의 상호작용이 일어나며, 본 Carbon모델은 육상 생태계 평가에 효과적인 모델로, 해양의 탄소량을 고려하지 않고 있어 이에 대한 오차는 발생할 수 있다고 사료된다. 본 연구대상지는 해양지역을 일부 포함하고 있어, 해양지역 부분의 재분리를 통해 해양 탄소모델인 Coastal blue carbon 모델을 활용한다면 이에 대한 오차를 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 모델의 입력자료인 carbon table과 토지이용도와의 영향으로 분석하는 모델로 일정 시기의 탄소량의 변화를 입력하지 못해 이에 대한 오차는 있을 것이다. 탄소로정량 추정으로 토지이용도의 자연적 천이, 미시적 변화에 대해서는 입력자료의 시간적 세분화 분석을 통한 분석이 가능하다면 보다 연구지역 결과에 대한 정확성이 높아질 것으로 사료된다. 또한, 산림별 영급에 따른 탄소저장량 차이가 있을 것으로 사료된다. 환경부 산림경영 전략에서도 영급에 따른 탄소저장량의 평가가 필요함을 제시함에 따라 추후 연구에서는 산림의 영급을 반영한 탄소저장평가를 추가적으로 시행한다면 보다 정확성이 높을 것으로 판단한다.

전 지구적 환경변화에 따라 다양한 자연 생태계분야에서의 관련 연구는 지속적으로 연구되어야 한다. 자연 생태분야의 평가 및 예측을 통해 사전적 대응책 기여가 가능할 것으로 판단된다. 이와 함께, 개발과 보전 사이에서 갈등이 있는 지역에서는 환경영향평가서 중 자연환경생태분야에서 활용도 가능하다고 보이며, 개발 예정지역에 대한 생태계 정량적 평가 방법론을 적용하여 의미 있는 연구가 될 것으로 판단된다. 이는 토지 관리 및 탄소저장 지역의 보호를 위해 개발로 변화되는 토지 이용도를 적용하여 탄소저장량 평가와 예측을 통해 탄소저장 관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다(Kocacs et al., 2013; Dennedy-Frank et al., 2016). 생태계서비스 값을 통한

비교를 통해 생태계 보전정책을 위한 의사결정의 기초자료로 도움을 줄 수 방법론이 될 것으로 판단된다.

본 연구는 인위적 개발에 따른 훼손 지역에 대한 평가를 통해 정량적인 자연 생태계 평가의 필요성을 제시하고자 하였다. 본 연구지역은 자연적으로 우수하게 보전되고 있는 만큼 개발대안(안)들의 비교·평가를 통해서 의견수렴과정에 평가 모델 중 한 가지로 활용될 수 있음을 제시하고자 하였다. 자연 생태계의 회복 탄력성의 중요함에 대한 인식 증진 목적을 가지고, 다양한 위험요인에 따라 변화되는 자연 생태계에 대해 통합적으로 평가 적용 연구는 지속적으로 필요하다.

사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00338529).

References

- Baek, G. W., Huh, S. H., Park, J. M., and Park, S. C. (2007). "Feeding habits of Pacific Cod (*Gadus macrocephalus*) in the coastal waters off gadeok-do, Korea". *Journal of Korean Ichthyol.* Vol. 19(4), pp. 318-323.
- Busan Development Institute. (2010). *Basic research for location and feasibility study of new airport in the south-eastern region*. Busan Development Institute Report. Busan, Korea.
- Busan Development Institute. (2016). *Basic research for location and feasibility study of new airport in the south-eastern region*. Busan Development Institute Report. Busan, Korea.
- Choo, I. K., Seong, Y. J., Bastola, Shiksha., and Jung, Y. H. (2021). "Calculation of soil carbon changes by administrative district with regard to land cover changes". *Journal of the Korean Geo-Environmental Society.* Vol. 22(3), pp. 37-43.
- Choi, H. A., Lee, W. K., Jeon, S. W., Kim, J. S., Kwak, H. B., Kim, M. N., Kim, J. U. and Kim, J. T. (2014). "Quantifying climate change regulating service of forest ecosystem - focus on quantifying carbon storage and sequestration". *The Korean Society of Climate Change Research.* Vol. 5(1), pp. 21-36.
- 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(2), pp. 120-132.
- Cong, W., Sun, X., Guo, H., and Shan, R. (2020). "Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial

- patterns, priorities and trade-offs in a complex basin". *Ecological Indicators*. Vol. 112.
- Dennedy-Frank, P.J., Muenich, R.L., Chaubey, I., and Ziv, G. (2016). "Comparing two tools for ecosystem service assessments regarding water resources decisions". *Journal of Environmental Management*. Vol. 177(2-4), pp. 331-340.
- Förster, o., Barkmann, J., Fricke, R., Hotes, S., Kleyer, M., Kobbe, S., Kübler, D., Rumbaur, D., Siegmund-Schultze, M., Seppelt, R., Settele, J., Joachim H. Tekken, S.V., Václavík, T., and Wittmer, H. (2015). "Assessing ecosystem services for informing land-use decisions: a problem-oriented approach". *Ecology and Society*. Vol. 20(3), pp. 31-50.
- Government of the Republic of Korea. (2020). *2050 Korea Carbon Neutral Strategy Report*. Government of the Republic of Korea Report.
- Huh, S. H., and An, Y. R. (2002). "Species composition and seasonal variation of fish assemblage in the coastal water off gadeok-do, Korea". *Journal of Korean Fish Society*. Vol. 35(4), pp. 366-379.
- Hwang, I.C., Kim, K.E., and Paik, J.R. (2020). Seoul City's '2050 Carbon Neutral' Strategy to Implement the Paris Agreement. Seoul Institute Report.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., and Miller, H. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report(AR4.) Climate Change*. Vol. 374. pp. 1-450.
- Edenhofer, O. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report. Cambridge University Press. UK. pp. 1-116.
- Kim, M. I., Yoo, S. M., Kim, N. H., Lee, W. A., Ham, B. Y., Song, C. H., and Lee, W. K. (2017). "Climate change impact on korean forest and forest management strategies". *Korean Journal of Environment Biology*. Vol. 35(3), pp. 413-425.
- 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 Environment Impact Assessment*. Vol. 26(6), pp. 457-469.
- Koh, J. S., Kim, E. H., and Yun, S.H., (2004). "Petrology of the cretaceous igneous rocks in gadeok Island, Busan, Korea". *The Journal of the petrological society of korea*. Vol. 13(2), pp. 47-63.
- Kim, T. Y., Song, C. H., Lee, W. K., Kim, M. I., Lim, C. H. Jeon, S. W, and Kim JS. (2015). "Habitat quality valuation using InVEST model in Jeju Island". *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. Vol. 18(5), pp. 1-11.
- KEI (Korea Environment Institute). (2020). *Main contents of the 2050 Low Carbon Society Vision Forum review plan*. Korea Environment Institute Focus. Vol. 62. Sejong, Korea
- Kovacs, K., Polasky, S., Nelson, E., Keeler, B. L., Pennington, D., Plantinga, A. J., and Taff, S. J. (2013). "Evaluating the return in ecosystem services from investment in public land acquisitions". *PloS one*. Vol. 8(6), e62202.
- Liu, J., Zhang, G., Zhuang, Z., Cheng, Q., Gao, Y., Chen, T., Huang, Q., Xu, L., and Chen, D. (2017). A new perspective for urban development boundary delineation based on SLEUTH-InVEST model. *Habitat International*. Vol. 70, pp. 13-23.
- Lee, H. S., Park, J. C., Kim, H. S., and Jang, C. H. (2011). Application of Inclusive Environmental Impact Assessment for NewlyProposed Airport in Korea. *The korean society of ocean engineers*. Vol. 25(4), pp. 54-58.
- Lee, H. W., Kim, C. K., Hong, H. J., Roh, Y. H., Kang, S. I., Kim, J. H., Shin, S. C., Lee, S. J., Spencer, W., and David, F. (2015). *Development of decision supporting framework to enhance natural capital sustainability: focusing on ecosystem service analysis*. Vol. 2015, pp. 3479-3651. Korea Environment Institute, Sejong, Korea.
- MOE (Ministry of the Environment). (2016). *Guide to the new climate regime after the Kyoto Protocol and the Paris Agreement*. Ministry of the Environment Report. Seoul. Korea.
- MOE (Ministry of the Environment). (2020). *The 5th National Natural Environment Survey-Flora in Gimhae*. Ministry of the Environment Report. Seoul. Korea.
- MOE (Ministry of the Environment). (2021). National natural environment survey results released in the Ministry of Environment's digital library. Ministry of the Environment Report. , assess 22 July 2021, <<http://m.me.go.kr/m/mob/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=5&searchKey=&searchValue=&menuId=11&orgCd=&boardMasterId=1&boardId=1446430>>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2021). *The 6th comprehensive airport development plan (2021-2025)*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport Report. Sejong, Korea.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2024). Evaluation of the Environmental Impact of Gadeokdo New Airport. Sejong, Korea.
- National Institute of Ecology. (2017). Data Book of

- National Ecosystem Survey. Seocheon, Korea.
- National Institute of Forest Science. (2012). *Overseas forest carbon offset program operation standards*. National Institute of Forest Science Report. Seoul, Korea.
- National Institute of Forest Science. (2015). *Global forest carbon policy and market trends*. National Institute of Forest Science Report. Seoul, Korea.
- Park, T. J., Lee, W. K., Jung, R. S., Kim, M. I., and Kwon, T. H. (2011). "Application of remote sensing technology for developing REDD+ monitoring systems". *Journal of korean forest society*. Vol. 100(3), pp. 315-326.
- Yoo, S. M., Lim, C. H., Kim, M. I., Song, C. H., Kim, S. J., and Kim, W. K. (2020). "Potential distribution of endangered coniferous tree species under climate change". *Journal of climate change research*. Vol. 9(3), pp. 223-234.
- Woo, Y. H. (2008). "Analysis of the success and failure of institutional arrangements for common-pool resource management: the cases of three fishing villages on gaduk Island, Busan". *Korean institute of public affairs*. Vol. 46(3), pp. 173-205.
- Yoon, H. S., Park, J. H., Jung, H. D., and Kim, B. S. (2010). "Hydraulic environments in the neighborhood of the Gaduk-do before/after the construction of Busan new-port". *The korean society of marine environment & safety*. Vol. 2010, pp. 1-6.
- Yun, S. G., and Paik, S. G. (2001). "Community structure of macrobenthos around Kadugdo, a South coast of Korea". *Journal of Korean society of fisheries and ocean*. Vol. 34(5), pp. 493-501.