

Research Paper

공공 데이터를 활용한 전국 내륙습지 감소 지역 시계열 분석 및 복원대상지 발굴 연구

이승원*** · 서현진* · 조광진* · 김응삼***

국립생태원 복원생태팀*, 전남대학교 생물과학·생명기술학과**, 전남대학교 지속가능생태환경 연구소***

Time-Series Analysis of Inland Wetland Reduction and Selection of Restoration Sites Based on Public Data in South Korea

SeungWon Lee*** · HyunJin Seo* · KwangJin Cho* · EungSam Kim***

Ecological Restoration Team, National Institute of Ecology*

Department of Biological Sciences and Biotechnology, Chonnam National University**

Institute of Sustainable Ecological Environment, Chonnam National University***

요약: 본 연구는 내륙습지 감소 지역을 대상으로 토지피복 시계열 분석을 통해 습지 면적 변화의 추세와 주요 원인을 규명하고, 토지피복지도와 InVEST 모델을 활용해 복원대상지 발굴 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 공공데이터인 제4차 전국 내륙습지 기초조사 자료(2016-2021)와 환경부 토지피복지도(1980-2022)를 활용하였다. 시계열 분석 결과, 1980-2000년 시기에 습지의 주요 변화 요인은 농경지로 나타났으며, 2000-2022년 시기에는 초지화가 주요 변화 요인으로 분석되었다. 복원대상지를 발굴하기 위해 습지 면적과 탄소 저장량이 모두 감소한 지역을 선별하였으며 그중 국·공유지가 50% 이상인 지역을 추출하여 현장검증을 실시하였다. 검증 결과 선별된 10개의 지역 중 8개 지역에서 실제로 습지 면적감소가 확인되었다. 해당 연구 결과는 내륙습지 보전 및 모니터링 체계 구축에 실질적인 정보를 제공할 뿐만 아니라, 향후 국가 실천 목표인 전국 훼손 생태계 30% 복원에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어: 전국 내륙습지 기초조사, 토지피복지도, 시계열 분석, InVEST 모델, 복원 대상지

Abstract: This study aimed to analyze trends and key drivers of wetland area change in inland wetland loss regions using a temporal land cover analysis, and to propose a method for identifying potential restoration sites based on land cover maps and the InVEST model. Public datasets, including the 4th National Inland Wetland Survey (2016-2021) and the Ministry of Environment's Land Cover Maps (1980-2022), were utilized. The temporal analysis revealed that conversion to agricultural land was the primary driver of wetland loss between 1980 and 2000, while grassland expansion was the

First Author: SeungWon Lee, Tel: +82-41-950-5894, E-mail: isewt456@nie.re.kr, ORCID: 0000-0001-8750-0830

Corresponding Author: EungSam Kim, Tel: +82-62-530-3416, E-mail: eungsam.kim@chonnam.ac.kr, ORCID: 000-0001-7028-8001

Co-Authors: HyunJin Seo, Tel: +82-41-950-5494, E-mail: hjseo8427@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-3289-6417

KwangJin Cho, Tel: +82-41-950-5670, E-mail: kjcho@nie.re.kr, ORCID: 0000-0003-1796-7050

Received: 16 May, 2025. Revised: 9 June, 2025. Accepted: 12 June, 2025.

main factor between 2000 and 2022. Restoration candidates were selected based on areas where both wetland area and carbon storage had declined, and among them, regions with more than 50% public ownership were extracted for field verification. As a result, wetland loss was confirmed in 8 out of the 10 selected sites. The findings of this study provide practical insights for inland wetland conservation and the establishment of a national wetland monitoring framework. Furthermore, they can serve as a foundational dataset to support the national target of restoring 30% of degraded ecosystems.

Keywords: National Inland Wetland Survey, Land Cover Map, Time-Series Analysis, InVEST Model, Restoration Target Site

I. 서론

전 세계 육지 면적의 약 5-7% 차지하는 습지는 홍수 조절, 토양 안정, 오염 정화, 서식처 제공 등 다양한 생태계 서비스 기능을 수행한다(Hong & Kim, 2017). 또한, 대기 중 메탄, 이산화탄소, 이산화질소 등의 온실가스 농도를 조절함으로써 지구온난화를 억제하는 데 기여하고 있다(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). 이러한 특성 덕분에 많은 과학자들은 습지생태계가 지구의 복사 강제력 조절에 중요한 역할을 수행할 수 있다고 강조하고 있다(Lim & Rho, 2024). 또한, 최근에는 습지의 탄소 저장 및 흡수 기능이 전 세계적으로 강조되고 있다(Jung et al., 2023). 습지생태계의 탄소 저장량은 $685.7 \times 10^9 \text{ton}$ 으로, 북방 침엽수림($408.3 \times 10^9 \text{ton}$), 열대우림($243.18 \times 10^9 \text{ton}$), 열대초원($146.67 \times 10^9 \text{ton}$) 등 타 생태계보다 면적 대비 높은 수준이다(Jang et al., 2024). 이처럼 습지는 기후변화 완화, 탄소 흡수 등의 기능을 지님으로써 생태적·경제적 가치가 지속적으로 증대되고 있다.

습지는 육상생태계와 수생태계 사이의 전이지대로서 종 다양성이 높고 영양물질이 풍부한 생태계이다(An et al., 2016). 이러한 생태적 특징 덕분에 습지는 어류, 포유류, 양서류, 파충류, 조류 등 다양한 야생동물의 먹이원, 서식처, 휴식처 기능을 한다. 또한, 번식지 역할을 통해 생물다양성 유지에 기여하고 있다(An et al., 2017). 그러나 20세기 이후 농업의 발달, 도시화, 각종 개발사업이 확대되면서 습지생태계는 심각한 훼손 위기에 처하게 되었다(Chun et al., 2004). 실제로 최근 3년간 전국의 습지 실태 조사 결과에 따르면, 74곳의 습지가 소실되고, 91곳은 면적이 감소한 것으로 나타났

다(Ministry of Environment Research, 2016). 그중 경작과 개발사업 등 인위적 요인에 의한 습지 소실이 77%를 차지하였으며, 자연적 요인인 육화 및 초지화에 의한 손실은 23%로 나타났다(Kim et al., 2020).

이러한 습지 생태계의 감소와 소실을 방지하기 위해, 중앙정부는 1997년 국제 습지 보호 협약인 람사르협약에 가입하였고, 1999년에는 습지보전법을 제정하여 습지를 법적으로 관리하기 시작하였다(Kim et al., 2015). 뿐만 아니라, 국가 습지 종합관리계획과 자연환경보전법, 그리고 쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크(Global Biodiversity Framework, GBF) 실천 목표인 생태계 훼손지역 30% 복원 등을 통해, 중앙정부는 습지의 보전과 복원을 위한 정책 노력을 강화하고 있다(Lee & Son, 2024).

최근 습지 변화 연구를 살펴보면 NDVI, MNDWI 지수를 활용한 내륙습지의 육화 현상 분석(Hwang & Um, 2015), GIS와 국가기본지형도를 활용한 하구 습지의 시계열적 변화(Rho and Lee, 2007), Landsat의 Thematic Mapper(TM) 자료를 이용한 서남해 연안습지의 변화 분석(Lee et al., 1997), 모니터링 결과를 중심으로 복원대상습지 선정(Lee et al., 2019) 등 다양한 연구가 있다. 하지만 습지 변화와 관련된 연구는 대부분 인공위성 영상을 활용한 연구가 많으며, 인공위성 영상을 활용한 분석은 특정 대상지를 장기간 시계열로 관찰하기엔 유용하나, 다수의 대상으로 사용하기에는 영상 획득, 처리에 필요한 시간, 비용 등의 문제점이 있다(Park & Kim 2014). 이러한 측면에서 공공기관에서 배포하는 토지피복지도는 신뢰도, 영상 획득, 처리 시간 등 다양한 장점이 있으며, 또한 국가적 단위의 넓은 지역을 대상으로 하는 연구에도 용이하다(Park & Kim 2014). 내

륙습지 기초조사 자료는 현장 조사를 통해 직접 수집된 데이터로, 외부 조사원 의견, 대상지의 상황 등 현장성이 잘 반영되어 있다는 특징이 있다.

본 연구에서는 공공데이터인 토지피복지도와, 내륙습지 기초조사 데이터를 활용해 전국 내륙습지 감소 지역을 대상으로 시계열 분석을 수행하고, 변화 요인을 정량적으로 분석하여 복원이 필요한 대상지를 발굴하고자 하였다. 해당 연구 결과는 국가 실천 목표인 훼손지 30% 복원에 기여하고, 내륙습지 생태계 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이라 생각한다.

II. 연구방법

1. 내륙습지 감소 지역 탐색

내륙습지 감소 지역 탐색부터 최종 복원대상지 선정까지의 과정은 Figure 1에 요약되어 있다. 국립생태원은 2000년부터 「습지보전법」에 따라 전국 내륙습지 생태계 현황을 조사하고 있으며, 조사된 정보는 습지지리정보시스템을 통해 제공되고 있다(Lee et al., 2019). 본 연구에서는 내륙습지 감소 지역을 탐색하기 위해 국립

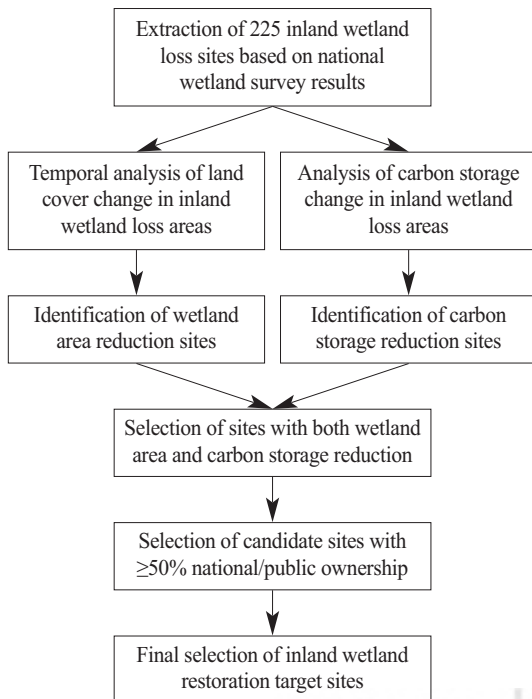


Figure 1. Research framework

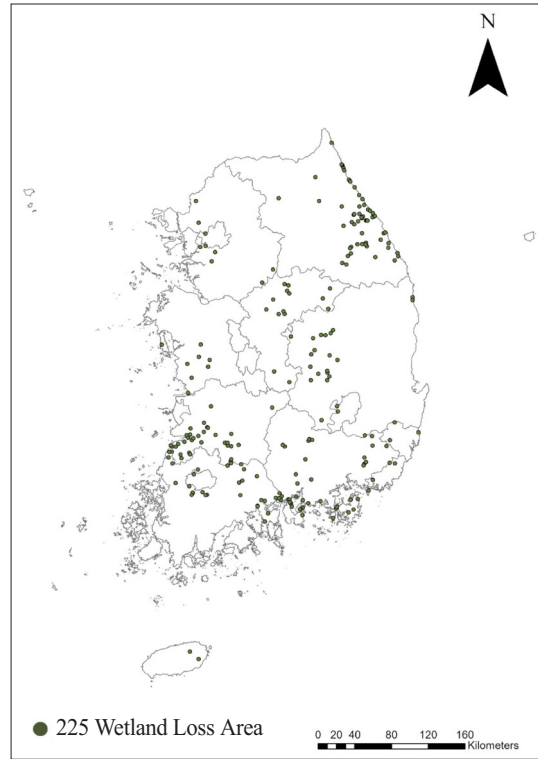


Figure 2. Nationwide distribution of 225 wetland loss areas

생태원에서 구축한 3차(2011-2015년), 4차(2016-2021년) 전국 내륙습지 기초조사 데이터를 활용하였다. 조사 결과, 제3차 조사 대비 제4차 조사에서 면적 감소로 표시된 지역을 선별하였으며, 총 225개소를 대상지로 확인되었다(Figure 2). 선별된 대상지를 바탕으로 토지피복 시계열 분석과, 복원대상지 탐색 연구를 수행하였다.

2. 토지피복 시계열 분석

토지피복지도는 지역의 공간구조 형성과 확산 과정을 파악하고, 일정 시기의 토지피복 상태 및 변화 양상을 이해하는 데 활용되는 기초 자료이다(Park & Kim, 2014). 환경부에서는 대분류, 중분류, 세분류 토지피복 지도를 배포하고 있다. 대분류 토지피복지도는 해상도 30m급의 지도로 1980년부터 2010년까지 10년 단위로 제작되었으며, 중분류 지도는 해상도 5m급으로 2000-2004년, 2007년, 2022-2024년도, 세분류 지도는 1m급으로 2019-2024년도 전국 도엽 단위 지도를 제공하고

있다.

본 연구에서는 전국 내륙습지 감소 지역의 습지 면적 변화를 과거부터 현재까지 계량적으로 분석하기 위해, 토지피복지도 중 데이터 기간이 가장 긴 대분류 지도를 활용하여 시계열 분석을 수행하였다. 시계열 분석은 10년 단위로 진행하였으며, 1980년, 1990년, 2000년, 2010년의 대분류 토지피복지도를 활용하였다. 2020년도 대분류 토지피복지도는 제작되어 있지 않으며, 세분류 토지피복지도는 데이터 용량이 크고 개수가 많아 전국 단위 지도로 제작이 불가능하였다. 이에 따라, 가장 최신 자료인 2022년도 중분류 토지피복지도 166개 도엽을 전국 단위로 통합하여 시계열 분석에 활용하였다. 분석 과정에서 해당 중분류 데이터를 대분류 체계로 단순화하여 전체 시계열 분석에 일관성을 확보하고자 하였다. 또한, 대분류 항목 중 '수역'은 위성영상으로 판독한 결과 습지의 수면부와 대부분 일치하는 것으로 확인되었다. 따라서 해당 연구에서는 '수역'을

습지로 간주하고 분석을 수행하였다. 시계열 분석은 ESRI가 개발한 Arc GIS Pro의 Change detection tool을 활용하였다.

3. 복원대상지 탐색 연구

「습지보전법」에서 '습지의 훼손'은 습지 원래의 형질을 변경하거나, 습지에 시설이나 구조물을 설치하는 등의 방법으로 습지를 보전 목적 외의 용도로 사용하는 것을 말한다. 선행연구에서는 습지의 원형이 소실되었거나 기능이 상실되었다고 판단되는 습지를 훼손습지로 정의하였다(Lee et al., 2019). 이에 본 연구에서는 전국 내륙습지 감소지역을 대상으로 복원대상지를 선별하기 위해 두 가지 분석을 독립적으로 수행하였다. 첫째, 토지피복 시계열 분석을 통해 1980년부터 2022년까지 습지가 농경지, 산림지, 초지 등으로 전환되어 면적이 감소한 지역을 선별하였다. 둘째, InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델을 활용하여 동

Table 1. Carbon pool parameters used in the InVEST model

lucode	LULC_Name	C_Above	C_Below	C_Soil	C_Dead
	110	0	0	0	0
	120	0	0	0	0
	130	0	0	0	0
	140	0	0	0	0
	150	0	0	0	0
	160	0	0	0	0
	210	14.97857	9.985714	39.94286	4.992857
	220	13.32857	8.885714	35.54286	4.442857
	230	9.835714	6.557143	26.22857	3.278571
	240	32.52033	1.300813	29.9187	0.260163
	250	6.557143	5.245714	32.78571	1.311429
	310	53.77895	10.75579	61.84579	26.88947
	320	71.52683	7.802927	24.70927	2.600976
	330	49.50857	32.18057	32.18057	16.09029
	410	19.24588	19.24588	64.15294	6.415294
	420	1.435833	1.435833	14.35833	0
	510	26.484	11.35029	94.58571	0
	520	69.51429	34.75714	139.0286	0
	610	0.055	0.055	0.55	0
	620	0.055	0.055	0.55	0
	710	0	0	0	0
	720	0	0	0	0
	Nodata	0	0	0	0

일 지역에서 과거 대비 탄소 저장량이 감소한 습지를 도출하였다. 이후 두 분석 결과의 모두 포함되는 지역을 복원 후보지로 선별하였다. 마지막으로, 이들 후보지 중 국·공유지 비율이 50% 이상인 지역을 최종 복원 대상지로 확정하였다.

InVEST 모델(naturalcapitalproject.stanford.edu)은 스탠포드 대학, The Nature Conservancy, 그리고 WWF (World Wildlife Funds)가 공동으로 개발한 프로그램으로 자연으로부터 얻는 재화와 서비스를 지도화하여 가치를 평가하기 위해 만들어진 모델이다(Kwon et al., 2022). 2008년부터 개발된 InVEST 모델은 현재까지 탄소 저장량, 작물 수분, 서식처 질 등 19개의 항목이 구축되어 있다(Jang et al., 2022). 이 가운데 Carbon Storage and Sequestration 모델은 지상부(C_Above), 지하부(C_Below), 토양(C_Soil), 고사목(C_Dead)의 탄소 저장을 고려한 생태 기반 모델로, 토지피복 정보와 탄소 저장 풀(Carbon Pool)을 결합하여 탄소 저장량을 평가한다.

본 연구에서는 InVEST Carbon Storage and Sequestration 모델을 적용하여 탄소 저장량이 감소한 습지를 선별하였다. InVEST 구동을 위하여 필요한 Carbon Pool 데이터는 국립생태원에서 국내 사항을 반영하여 구축한 데이터를 활용하였다(Table 1)(National Institute of Ecology, 2022). 토지피복 데이터는 2000년도, 2022년도 중분류 지도를 활용하였다. 그 이유는 국립생태원에서 구축한 Carbon Pool 데이터가 토지피복 중분류 지도를 토대로 만들어졌기에, 해당 시계열 범위에서 활용할 수 있는 2000년도와 2022년도의 탄소 저장량을 비교하였다.

4. 현장검증

토지피복지도와 InVEST 모델을 통해 도출된 대상지 중 국·공유지 비율이 50% 이상인 지역을 선별하기 위해, 국토교통부에서 제공하는 2022년도 토지소유관계도를 활용하였다. 해당 자료를 기반으로 국유지와 공유지의 비율이 50% 이상인 지역을 추출한 뒤, 이들 지역을 대상으로 현장 검증을 실시하였다. 현장 검증은 2023년 3월부터 10월까지 수행되었으며, 내륙습지의 변화 원인과 이용 현황을 확인하는 데 중점을 두었다.

III. 결과 및 고찰

1. 토지피복 시계열 분석 결과

습지 면적감소 지역 225개소를 대상으로 토지피복 면적 변화분석을 수행하였다. 1980-1990년 시기의 토지피복 변화를 살펴보면 주거지, 농경지, 초지, 습지의 면적은 증가하고 산림지, 나지 지역은 감소한 것으로 나타났다. 그중 나지는 전체 면적 대비 17%에서 7%로 감소하여 해당 시기 중 가장 큰 변화량을 나타내었다. 1990-2000년도 시기에는 산림지 비율은 증가하였지만, 나머지 주거지, 농경지, 초지, 습지, 나지는 감소하였다. 산림지는 전체 면적 대비 10%에서 17% 증가해 해당 시기 중 가장 큰 변화량을 보여주었다. 2000-2010년도에는 토지피복 유형 중 습지, 초지 면적은 증가하였지만, 주거지, 농경지, 산림지, 나지는 감소하였다. 그중 습지는 전체 면적 대비 44%에서 65%로 증가하였으며, 이는 해당 시계열 분석 중 가장 높은 증가율로 나타났다. 반면 농경지는 전체 면적 대비 26%에

Table 2. Changes in land cover area within wetland loss regions from 1980 to 2022

	1980		1990		2000		2010		2022	
	Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)
Settlements	2.15	2	3.54	4	3.12	4	2.24	3	1.13	1
Crop land	22.26	25	24.44	28	22.9	26	12.05	14	2.45	3
Forest	12.22	14	9.07	10	14.8	17	9.01	10	2.29	3
Grassland	3.76	4	5.52	6	3.49	4	3.99	4	11.91	13
Wetland	33.01	37	40.43	45	33.84	44	58.02	65	65.2	73
Bare land	15.31	17	5.91	7	5.56	6	3.41	4	5.74	6

Table 3. Land cover transition matrix for the period from 1980 to 2022

(unit: km²)

		Settlements	Cropland	Forest	Grassland	Wetland	Bareland
1980-1990	Settlements	-	0.64	0.18	0.16	0.72	0.19
	Crop land	1.22	-	2.61	1.70	4.15	1.66
	Forest	0.50	3.42	-	1.05	3.23	0.76
	Grassland	0.16	1.49	0.55	-	0.94	0.28
	Wetland	0.66	4.46	1.54	0.86	-	0.85
	Bare land	0.75	3.51	0.92	1.40	6.54	-
1990-2000	Settlements	-	0.80	0.30	0.15	0.54	0.37
	Crop land	0.84	-	2.84	0.64	1.53	0.88
	Forest	0.12	1.03	-	0.24	0.67	0.21
	Grassland	0.15	1.02	1.78	-	0.62	0.32
	Wetland	0.24	1.39	2.56	0.55	-	1.00
	Bare land	0.4	0.95	0.53	0.28	0.97	-
2000-2010	Settlements	-	0.04	0.25	0.13	1.10	0.06
	Crop land	0.19	-	0.18	0.84	9.79	0.30
	Forest	0.13	0.16	-	0.36	5.51	0.16
	Grassland	0.04	0.12	0.03	-	1.33	0.08
	Wetland	0.26	0.11	0.07	0.35	-	0.22
	Bare land	0.09	0.11	0.02	0.31	2.44	-
2010-2022	Settlements	-	0.07	0.02	0.38	0.15	0.29
	Crop land	0.30	-	0.08	2.14	7.55	1.18
	Forest	0.15	0.42	-	0	5.61	0.76
	Grassland	0.08	0.11	0.01	-	0.66	0.05
	Wetland	0.50	0.82	0.10	6.41	-	1.95
	Bare land	0.07	0.23	0	0.36	1.69	-

서 14% 감소하였으며, 이는 시계열분석 중 가장 높은 감소율로 나타났다. 2010-2022년 시기에는 주거지, 농경지, 산림지 면적은 감소하고, 초지, 습지, 나지 면적은 증가하였다. 그중 농경지는 14%에서 3%로 지난 시계열 분석에 이어 면적이 지속적으로 감소하였으며, 초지는 4%에서 13%로 크게 증가하였다(Table 2).

해당 시계열 변화를 세부적으로 나타내기 위해 연도별 토지피복 변화 매트릭스를 작성하였다(Table 3). 1980-1990년도 큰 감소를 보였던 나지는 전체 면적에 86% 정도가 변화하였으며, 그중 나지가 습지로 변환 비중이 약 43%로 가장 높은 것으로 나타났다. 1990-2000년도 시기 산림지의 면적이 증가한 것으로 나타났는데, 이는 농경지와 습지의 상당 부분이 산림지로 변환 것으로 확인되었다. 2000-2010년도 사이에는 습지의 면적은 급격히 증가한 반면, 농경지의 면적은 급격히

감소한 것으로 나타났다. 이런 변화가 나타난 이유는 농경지의 면적 약 43% 정도가 습지로 변환 것으로 확인되었다. 2010-2022년도 시기 농경지 면적 약 63%, 산림지 면적 약 62% 정도가 습지로 변환 것으로 확인되었다. 반면 초지의 비율은 급격히 증가한 것으로 나타났는데, 그 이유는 습지가 초지로 변환 비중이 높은 것으로 확인되었다. 해당 습지 감소 지역의 토지피복 시계열 변화 매트릭스를 시각적으로 표현하기 위해 Sankey Diagram 기법을 활용하였으며, 토지피복 변화에 따른 습지 면적의 증가, 감소량을 그래프로 표현하였다(Figure 3).

토지피복 변화분석을 바탕으로 1980-2022년까지 습지의 변화 양상을 분석해 보았다. 1980-1990년도 토지피복상 습지 면적은 약 8.37km² 감소하고, 약 15.59km² 정도가 증가한 것으로 나타났다. 감소 요인에는 습지

가 농경지로 변환 비중이 높았으며, 증가 요인으로는 나지가 습지로 변환 비중이 높은 것으로 확인되었다. 1990-2000년도 습지 면적은 약 5.74km² 감소하였고, 4.32km²가 증가한 것으로 나타났다. 그중 습지가 농경지, 산림지로 변환 비중이 높게 나타났다. 2000-2010년 시기를 살펴보면 습지 감소 비율은 작고, 증가하는 비율은 높게 나타났다. 그중 농경지, 산림지가 습지로 변환 비중이 다른 요소들에 비해 높은 것으로 확인되었다. 2010-2022년도 습지 감소는 약 9.78km², 증가는 약 16.91km²로 나타났다. 2000-2010년 시계열에 이어 농경지, 산림지가 습지로 변환 비중이 높은 반면, 습지 감

소 비율도 높게 나타났는데, 그 이유는 습지가 초지로 변환 비중이 높은 것으로 확인되었다.

습지 면적이 감소한 지역을 대상으로 토지피복 시계열 분석을 수행한 결과 습지의 면적은 1900-2000년 시기를 제외하고 전체적으로 증가한 것으로 나타났다. 그중 산림지, 농경지가 습지로 전환된 비중이 높았다. 이러한 변화는 과거 논으로 이용되던 부지가 장기간 방치되어 묵논습지로 변했거나, 별채 및 댐 건설 같은 개발 활동으로 인해 기존 산림지역이 습지로 변환 것으로 해석된다. 반면, 습지 감소 원인을 살펴보면 1980-2000년 시기에는 습지가 농경지와 산림지로 전환된 비

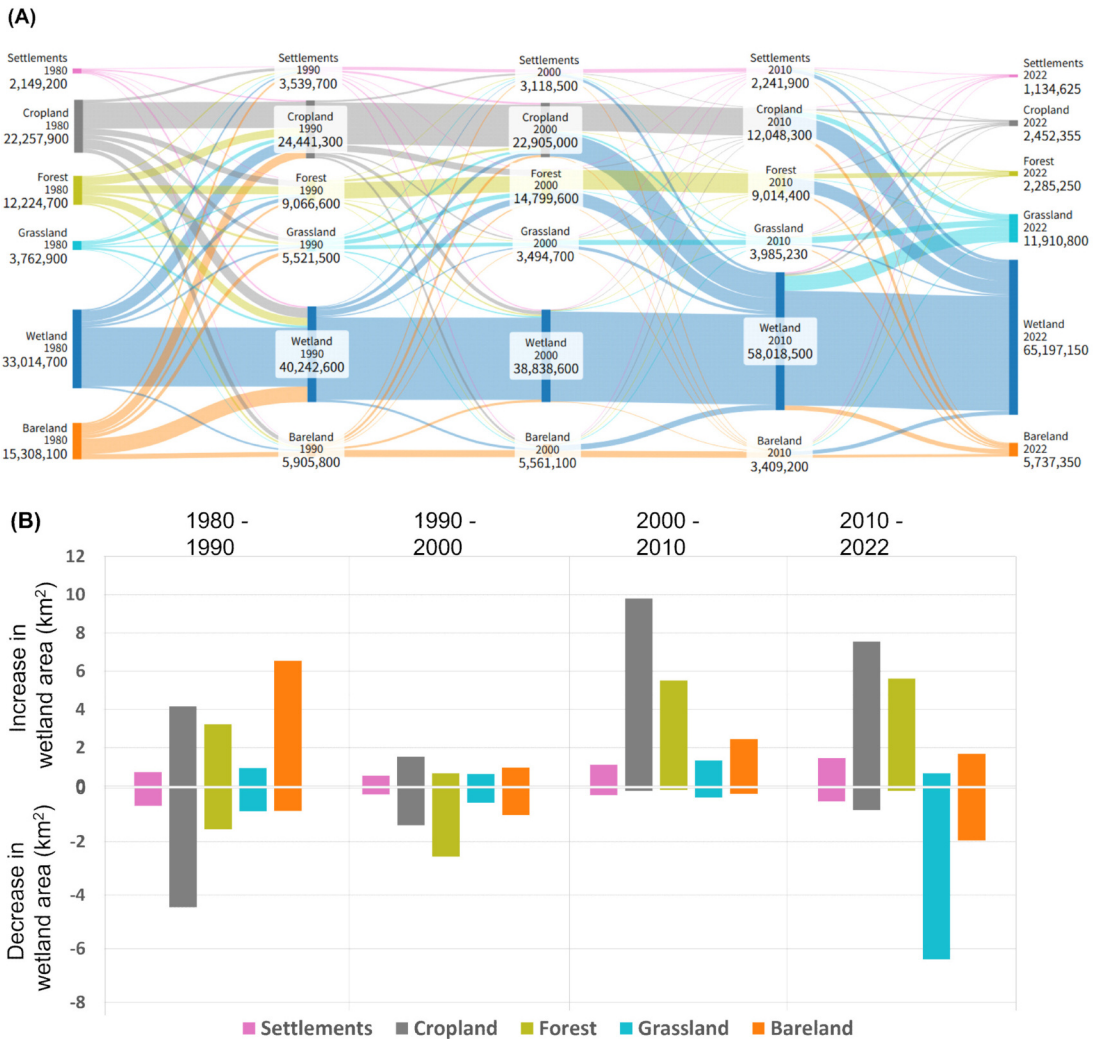


Figure 3. Land cover change matrix in wetland loss areas from 1980 to 2022: (A) Land cover change Sankey diagram (1980-2022), (B) Drivers of wetland increase and decrease (1980-2022)

율이 높았다. 이는 1960년대 이후 식량 확보 및 각종 개발사업을 위해 추진된 대규모 간척사업과 농지 우선 정책의 영향을 받은 것으로 생각된다(Lee & Lee, 1997). 한편, 2000-2022년 시기에는 습지가 초지나 나지로 전환된 비율이 높게 나타났다. 이는 1912년 이후 지속된 기온 상승과 계절별 강수량 감소로 인해 습지가 육화되거나, 수위 낮아지면서, 초본식물이 정착하여 수면 위로 노출된 것으로 해석된다(National Institute of Meteorological Sciences, 2018).

2. 복원대상지 탐색 결과

복원대상지를 선별하기 위해, 습지 면적이 감소한 지역 225개소를 대상으로 토지피복 변화와 탄소 저장 기능 저하 여부를 분석하였다. 토지피복 시계열 분석 결과, 습지 면적이 감소한 지역은 총 119개소였으며, InVEST 모델 분석 결과 탄소 저장량이 감소한 지역은 109개소로 나타났다. 이 중 습지 면적이 줄어들고 동시에 탄소 저장 기능도 저하된 지역은 총 45개소로 도출되었다(Figure 4). 이들 중 국·공유지 비율이 50% 이상인 지역을 선별한 결과, 최종적으로 10개소가 복원대

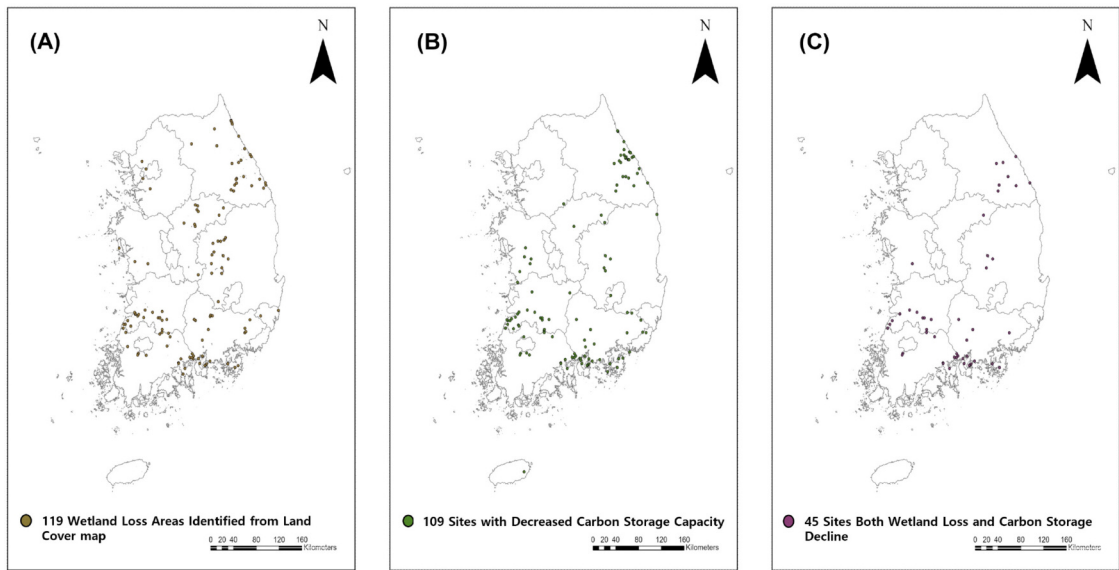


Figure 4. Selection of restoration target sites: (A) 119 sites with wetland loss, (B) 109 sites with carbon storage reduction, (C) 45 sites with both wetland and carbon storage reduction

Table 4. Wetland sites for the field survey

Wetland Name	Area of Reduction (m ²)	Carbon Storage Loss Amount (ton)	Proportion of State-owned and Public Land
Gangje	-2,125	-258.2582	99%
Gwansinhado	-657,375	-8615.076	99%
Guksa	-9,975	-1138.683	99%
Danwol	-897,400	-7674.448	73%
Daegok	-59,200	-161.7089	89%
Seongokjeong	-16,200	-6.766651	98%
Seomjingang ha-gu	-201,450	-15101.13	68%
Odaecheon	-123,075	-1201.029	96%
Jeokseong	-235,800	-4803.416	98%
Jogyocheon ha-gu	-86,875	-149.9966	98%

상지로 확정되었다(Table 4).

3. 현장검증 결과

데이터의 정확성 검증을 위해 선별된 10개의 대상지를 활용해 현장검증을 수행하였다. 현장검증 결과 2개의 대상지를 제외한 8개의 습지에서 면적감소가 나타났다(Table 5). 적성습지와 섬진강하구습지는 토지피복 변화상 습지 면적 일부가 초지로 변한 것으로 나타났다지만, 현장 조사 결과 초지로 변한 흔적은 발견되

지 않았다. 해당 오류를 확인하기 위해 항공사진 시계열로 적성습지를 확인해 본 결과 2015-2017년까지 습지 내부에 초지가 형성된 부분이 보이지만, 현재는 수위가 증가함에 따라 초지 부분이 수면 아래로 가라앉은 것으로 확인되었으며, 섬진강하구습지도 똑같은 양상이 나타났다(Figure 5). 나머지 8개의 대상지를 현장 검증한 결과 대궁교 습지는 습지 35%, 나지 30%, 수역 35%으로 구성되어 있었으며, 습지 내부에 보, 다리, 교량이 건설됨에 따라 인접한 하류 지역은 육화되고 있

Table 5. Summary of field survey results

Wetland Name	Field Survey Results	Cause of Loss
Gangje	Increase in shrub vegetation due to reduced water inflow	Natural
Gwansinhado	Part of the dried wetland converted into a public park	Anthropogenic
Guksa	Former wetland area now used as a tourist trail	Anthropogenic
Danwol	Reduction in wetland area due to an increase in shrub vegetation	Natural
Daegok	Wetland degradation due to construction activities	Anthropogenic
Seongokjeong	Area reduction caused by farming activities	Anthropogenic
Odaecheon	Former wetland area converted into a road	Anthropogenic
Jogyocheon ha-gu	Partial wetland degradation	Natural

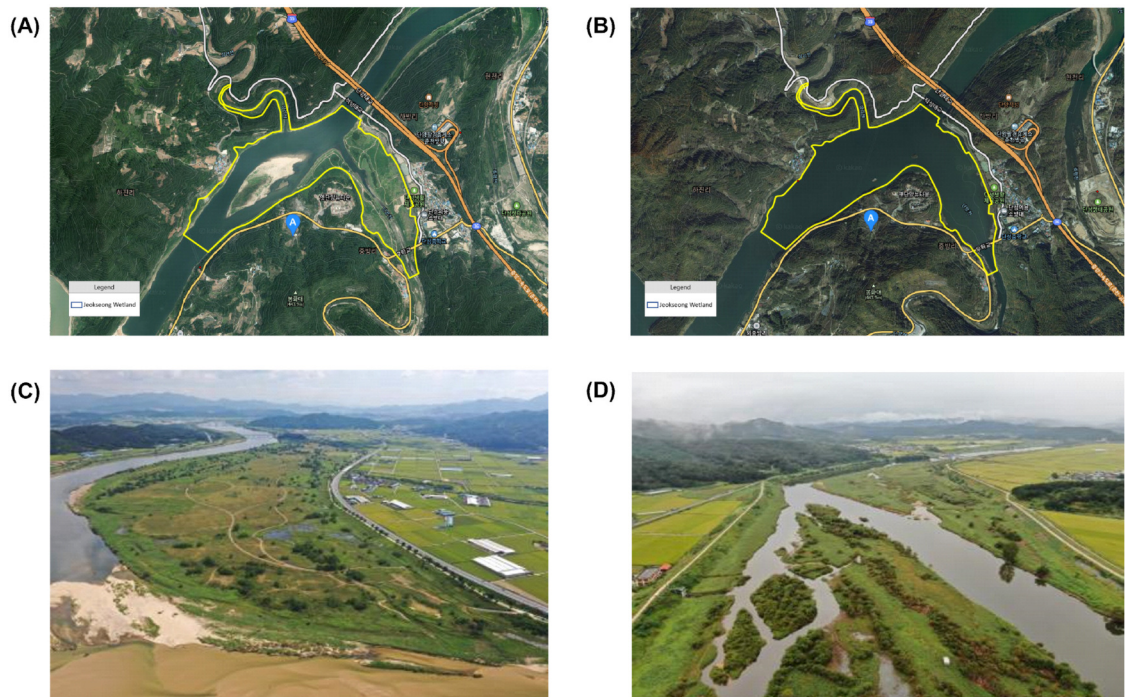


Figure 5. Field verification results: (A) Aerial photo of Jeokseong Wetland in 2017, (B) Aerial photo of Jeokseong Wetland in 2022, (C) Field photo of Gwansinhado Wetland, (D) Field photo of Danwol Wetland

는 경향을 보였다. 오대천 습지는 현장검증 결과 과거 습지의 일부분이 현재 도보로 활용되고 있었다. 궁남지 습지는 과거 논 습지였던 부분이 현재 관광객을 위한 동선으로 활용하고 있었다. 관심리하도습지는 육화된 습지의 일부분이 현재 공원으로 사용하고 있었으며 공원 내부에 산책로, 휴게시설이 건설되고 있었다. 선양제습지는 토양심도가 25cm, 유기물층 깊이 5cm, 토성은 양토였으며, 습지의 일부분이 현재 농경지로 활용되고 있었다. 강진습지는 계절적 유량변동에 따른 사력퇴증가로 습지의 면적이 감소된 것으로 나타났다. 주교천하구습지는 습지 60%, 40%수역으로 구성되어 있었으며 습지 내부에 염습지, 간석지, 육화된 지역이 혼재되어 나타나며, 하중도가 곳곳에 발견되었다. 단밀습지는 습지 내부에 사력퇴적물이 쌓여 하중도를 형성하고 있었으며, 습지 내부에 차량이 출입으로 식생 훼손이 발생하고 있었다.

IV. 결론

본 연구는 공공데이터를 활용하여 전국 내륙습지 감소 지역의 토지피복 변화 추세를 분석하고, 이 중 복원이 필요한 대상지를 선별하였다. 분석 결과, 토지피복상 농경지와 산림지는 시간이 지날수록 습지화되는 경향을 보였으며, 반대로 습지는 초지로 빠르게 전이되는 양상이 확인되었다. 복원대상지 선별 결과 총 10개소가 도출되었고, 이 중 8개소에서는 현장검증을 통해 실제 면적감소 및 형질 변형이 확인되었다. 본 연구는 전국 내륙습지의 감소 원인과 변화 양상을 정량적으로 규명하였으며, 국·공유지 비율이 50% 이상인 지역을 중심으로 복원 대상지를 도출함으로써 즉시 복원이 가능한 후보지를 제시하였다. 이는 향후 내륙습지 모니터링 및 복원 정책 수립의 기초 자료로 활용될 수 있으며, 훼손지 우선순위 설정에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 본 연구는 면적감소로 분류된 지역을 대상으로 분석을 수행하였으나 일부 지역에서는 오히려 면적이 증가한 것으로 나타났다. 이는 과거 논으로 활용되던 지역이 시간이 지나면서 습지화가 진행되었거나, 30m 해상도의 대분류 토지피복지도가 세밀한 습지 또는 선형 하천의 정확한 분류에 한계를 가지

기 때문에 판단된다. 또한, InVEST 모델은 탄소 저장량을 정량화하는 데 효과적인 도구지만, 탄소 풀 값을 고정 입력하는 방식으로 계절 변화, 식생 구조, 지역 생태 다양성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 후속 연구에서는 중분류(5m) 및 세분류(1m) 수준의 고해상도 토지피복지도를 활용한 정밀 분석이 요구되며, 선별된 복원 후보지를 대상으로 드론, LiDAR 등 고정밀 공간자료를 병행 활용함으로써 보다 실효성 높은 분석이 가능할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 국립생태원(National Institute of Ecology, NIE) 연구비(NIE-B-2025-05)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Hong, M. G., & Kim, J. G. (2017). An analysis of trends in wetland function assessments and further suggestions. *Journal of Wetlands Research*, 19(1), 1-15.
- 홍문기, 김재근. (2017). 습지 기능 평가의 동향 분석 및 제언. *한국습지학회지*, 19(1), 1-15. <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.1.001>
- Lim, J. C., & Rho, P. H. (2024). Improvement considerations for strengthening wetland policies with case studies related to climate change response strategy. *Journal of Wetlands Research*, 26(4), 356-373.
- 임정철, 노백호. (2024). 기후변화 대응과 관련된 습지 활용사례 및 정책 개선방향. *한국습지학회지*, 26(4), 356-373. <https://doi.org/10.17663/JWR.2024.26.4.373>
- Jang, I. Y., Jeong, H. M., Han, S. H., Ahn, N. H., Kim, D. Y., & Kang, S. R. (2023). Estimation of carbon storages and fluxes by ecosystem type in Korea. *Journal of Wetlands Research*, 25(4), 417-425.
- 장인영, 정현모, 항상학, 안나현, 김덕엽, 강성룡. (2023).

- 국내 생태계 유형별 탄소 저장 및 거동 산정 연구 현황 분석. *한국습지학회지*, 25(4), 417-425. <https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.4.417>
- Jang, I. Y., Jeong, H. M., Han, S. H., Lee, E. P., & Kang, S. R. (2024). Seasonal and spatial changes in carbon storage and fluxes in forested wetlands in Goheung-gun, Korea. *Journal of Wetlands Research*, 26(4), 468-477.
- 장인영, 정현모, 한상학, 이응필, 강성룡. (2024). 고흥군 산지습지에서 탄소 저장 및 플럭스의 계절·공간적 변화 연구. *한국습지학회지*, 26(4), 468-477. <https://doi.org/10.17663/JWR.2024.26.4.468>
- An, J. H., Lim, C. H., Jung, S. H., & Lee, C. S. (2017). Vegetation of Doombeong selected as a reference site for restoring wetland. *Journal of Wetlands Research*, 19(2), 193-201.
- 안지홍, 임치홍, 정성희, 이창석. (2017). 습지 복원을 위해 하나의 대조지소로 선정된 둠병의 식생. *한국습지학회지*, 19(2), 193-201. <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.2.193>
- Chun, S. H., Lee, B. H., Lee, S. D., & Lee, Y. T. (2004). Classification system of wetland ecosystem and its application. *Journal of Wetlands Research*, 6(3), 55-70.
- 전승훈, 이병희, 이상돈, 이용태. (2004). 습지생태계 분류체계의 검토 및 적용방안 연구. *한국습지학회논문집*, 6(3), 55-70.
- Kim, S. W., Jeong, A. C., Lee, D. O., & Lee, G. H. (2020). Potential damage assessment of inland wetlands by topsoil erosion. *Journal of Korea Water Resources Association*, 53(7), 521-531.
- 김성원, 정안철, 이대업, 이기하. (2020). 표토침식에 따른 내륙습지 훼손 가능성 평가. *한국수자원학회논문집*, 53(7), 521-531. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.7.521>
- Kim, J. Y., Do, Y. N., Lee, C. W., Choi, L. R., Joo, G. J., & Jo, H. B. (2015). Wetland conservation action plan of local government: Gyeongsangnam province, South Korea. *Journal of Wetlands Research*, 17(3), 245-250.
- 김지윤, 도윤호, 이찬우, 최기룡, 주기재, 조현빈. (2015). 지방정부의 습지보전실천계획 수립과 과제 현황분석: 경상남도를 대상으로. *한국습지학회지*, 17(3), 245-250. <https://doi.org/10.17663/JWR.2015.17.3.245>
- Lee, G. S., & Son, S. W. (2024). Identification of environmentally degraded areas based on land cover change: A case study of Seongnam-si, Gyeonggi-do. *Journal of Environmental Policy*, 32(2), 131-155.
- 이길상, 손승우. (2024). 토지피복 변화 기반의 자연환경 훼손지역 탐색: 경기도 성남시를 중심으로. *한국환경정책학회*, 32(2), 131-155. <https://doi.org/10.15301/jepa.2024.32.2.131>
- Lee, J. H., Lee, C. S., & Kim, M. J. (2019). A case study on selecting sites for wetland restoration - Focusing on the research survey of national inland wetlands monitoring in 2016. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(1), 71-81.
- 이정환, 이창수, 김미정. (2019). 복원대상습지 선정 사례 연구: 2016년 전국내륙습지 모니터링 결과를 중심으로. *환경영향평가*, 28(1), 71-81. <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.1.71>
- Lee, H. Y., & Lee, S. H. (1997). Impacts of large-scale reclamation on environment in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 32(4), 463-478.
- 이현영, 이승호. (1997). 한국의 대규모 간척사업의 주변의 환경 변화에 미치는 영향. *대한지리학회지*, 32(4), 463-478.
- Hwang, Y. S., & Um, J. S. (2015). Monitoring the desiccation of inland wetland by combining MNDWI and NDVI: A case study of Upo wetland in South Korea. *Journal of Spatial Information Research*, 23(6), 31-41.
- 황영석, 엄정섭. (2015). MNDWI와 NDVI의 통합을 통한 내륙습지의 육화현상 추적: 우포늪을 사례로. *공간정보시스템학회지*, 23(6), 31-41. <https://doi.org/10.12672/ksis.2015.23.6.031>
- Rho, P. H., & Lee, C. H. (2007). Using GIS to estimate estuarine wetlands in three major estuaries and

- to quantify wetland changes over the last century. *Journal of Wetlands Research*, 9(2), 21-31.
- 노백호, 이창희. (2007). GIS를 활용한 하구의 습지추정 및 변화추이 분석에 관한 연구. *한국습지학회지*, 9(2), 21-31.
- Yi, G. C., Im, B. S., Woo, C. H., & Cho, Y. H. (1997). An analysis of spatiotemporal change of southwestern coastal wetlands using Landsat Thematic Mapper data. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 6(1), 55-66.
- 이기철, 임병선, 우창호, 조영환. (1997). Landsat TM 자료를 이용한 서남해 연안 습지의 시공간 변화 분석에 관하여. *환경영향평가학회지*, 6(1), 55-66.
- Park, J. C., & Kim, J. S. (2014). Assessment of land-cover change accuracy with multi-temporal national land-cover maps: A case study on the Guryangcheon watershed, South Korea. *Journal of the Korean Cartographic Association*, 14(1), 61-75.
- 박종철, 김장수. (2014). 환경부 다중시기 토지피복도로 탐지한 토지피복 변화 지역의 정확도 평가: 구량천 유역을 사례로. *한국지도학회지*, 14(1), 61-75.
- Park, J. C., & Kim, J. S. (2014). A method for area estimation about each land-cover in the year 2000 using a national land-cover 2009 map and land category data of statistical yearbooks. *Journal of the Korean Cartographic Association*, 14(2), 27-38.
- 박종철, 김장수. (2014). 환경부 다중시기 토지피복도로 탐지한 토지피복 변화 지역의 정확도 평가: 구량천 유역을 사례로. *한국지도학회지*, 14(1), 61-75.
- Kwon, H. Y., Jang, J. E., Shin, H. S., Yu, B. H., Lee, S. C., & Choi, S. H. (2022). Habitat quality analysis and an evaluation of Gajisan Provincial Park ecosystem service using InVEST model. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 36(3), 318-326.
- 권혜연, 장정은, 신해선, 유병혁, 이상철, 최송현. (2022). InVEST 모델을 이용한 가지산도립공원의 서식지질 분석과 생태계서비스 평가. *한국환경생태학회지*, 36(3), 318-326. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2022.36.3.318>
- Jang, J. E., Kwon, H. Y., Shin, H. S., Lee, S. C., Yu, B. H., Jang, J., & Choi, S. H. (2022). Habitat quality analysis and evaluation of InVEST model using QGIS - Conducted in 21 national parks of Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 36(1), 102-111.
- 장정은, 권혜연, 신해선, 이상철, 유병혁, 장진, 최송현. (2022). QGIS를 이용한 InVEST 모델 서식지질 분석 및 평가: 21개 국립공원을 대상으로. *한국환경생태학회지*, 36(1), 102-111. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2022.36.1.102>
- National Institute of Ecology. (2022). Manual for ecosystem service assessment map. National Institute of Ecology.
- 국립생태원. (2022). 생태계서비스 평가지도 매뉴얼. 국립생태원.
- National Institute of Meteorological Sciences. (2018). 100 Years of Climate Change on the Korean Peninsula. Ministry of Environment. National Institute of Meteorological Sciences.
- 국립기상과학원. (2018). 한반도 100년의 기후변화. 국립기상과학원.
- Ministry of Environment. (2016). The 4th nationwide inland wetland survey - Wetland identification survey for understanding the current status of inland wetlands in Korea. Ministry of Environment.
- 환경부. (2016). 제4차 전국내륙습지 일반조사 - 전국내륙습지 현황 파악을 위한 습지발굴조사. 환경부.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., & Miller, H. L. (Eds.), *The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.