

연구보고서(최종)

NIE-B-2025-03

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립('25)

Development of Policy Decision Support System
based on Ecosystem Services Assessment('25)

NATIONAL
INSTITUTE OF ECOLOGY

연구진

연구책임자

연구참여자(내부)

천광일	생태계서비스팀	선임연구원
이중로	생태계서비스팀	팀장
김진희	생태계서비스팀	팀장
권혁수	생태계서비스팀	선임연구원
이태호	생태계서비스팀	전임연구원
최태영	생태계서비스팀	전임연구원
최철현	생태계서비스팀	전임연구원
정필모	생태계서비스팀	연구원
김정인	생태계서비스팀	연구원
김벼리	생태계서비스팀	연구원
정다예	생태계서비스팀	연구원
문희진	생태계서비스팀	연구원
천금성	생태계서비스팀	연구원
정유진	생태계서비스팀	연구원
이택우	생태계서비스팀	연구원
최다정	생태계서비스팀	연구원
김남신	생태평가연구실	실장
박은진	기후생태연구실	실장

연구참여자(외부)

강완모	국민대학교	교수
남희정	국민대학교	박사과정
맹아운	국민대학교	석사과정
박병주	국립백두대간수목원	박사/대리
최영순	씨엔씨바이오믹스	박사/대표
황숙영	일월초등학교	석사

본 연구진은 연구윤리를 준수하였음을 서약합니다.

〈목 차〉

요약문	i
I. 서론	1
1. 연구 배경	3
2. 연구 목적	5
3. 당해연도 목표	6
II. 생태계서비스 통합 평가 체계 구축	7
1. 생태계와 서비스의 통합 평가 체계 구축 및 PSR 평가	9
2. 생태계 계정(SEEA-EA) 도입을 위한 생태계서비스 시범 평가	87
III. 지속가능 환경계획 수립을 위한 생태계서비스 공급-수요 지표 개발	109
1. 도시 생태계서비스 균형 관리를 위한 수요 지표 개발 및 취약성 분석	111
2. 생태계서비스 국민 인식 및 만족도 분석을 통한 수요 지표 개발 및 평가 검증	130
3. 생태계서비스지불제계약 효과성 시범평가	142
참고문헌	161
위탁연구	173
부록	193

〈표 차례〉

〈표 II-1-1〉 생태계 유형별 평가 지표.....	11
〈표 II-1-2〉 글로벌, 국가 및 부처별 생태계 유형 및 생물다양성에 영향을 주는 정책(법정) 계획 검토.....	13
〈표 II-1-3〉 산림생태계 압력-상태 평가 주요 결과.....	15
〈표 II-1-4〉 농경지생태계 압력-상태 평가 주요 결과.....	17
〈표 II-1-5〉 도시 생태계 압력-상태 평가 주요 결과.....	19
〈표 II-1-6〉 담수생태계 압력-상태 평가 주요 결과.....	21
〈표 II-1-7〉 습지생태계 압력-상태 평가 주요 결과.....	23
〈표 II-1-8〉 생태계 평가 통합 결과.....	25
〈표 II-1-9〉 산림생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책.....	26
〈표 II-1-10〉 농경지생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책.....	27
〈표 II-1-11〉 도시 생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책.....	28
〈표 II-1-12〉 담수생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책.....	29
〈표 II-1-13〉 습지생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책.....	30
〈표 II-1-14〉 국가별 화분매개(수분)서비스 평가 방법론 및 주요 결과.....	33
〈표 II-1-15〉 방출 지점 고려 환경요인.....	34
〈표 II-1-16〉 양봉장 주변 생태계서비스 평가 설문 내용.....	37
〈표 II-1-17〉 재래꿀벌 귀소율에 대한 거리 및 지형요인 회귀분석.....	39
〈표 II-1-18〉 ITS 및 rbcL ASVs 기반 꿀 시료의 메타데이터 및 α -다양성 지수	42
〈표 II-1-19〉 Relative abundance based on ITS ASVs at the family, genus, species level.....	45
〈표 II-1-20〉 rbcL ASVs 기반 family, genus, species 수준 상대비율 비교.....	47
〈표 II-1-21〉 Proportion(%) of Ecosystem Types within 3 km Radius around Bee Colonies.....	50
〈표 II-1-22〉 수분서비스 평가 모형 및 특징.....	52
〈표 II-1-23〉 PollMap 구동을 위한 입력자료.....	53
〈표 II-1-24〉 InVEST 구동을 위한 길드 표(guild table).....	55
〈표 II-1-25〉 InVEST 구동을 위한 생·물리적 표.....	55
〈표 II-1-26〉 PollMap과 InVEST 모형의 토지피복유형별 평균 유사도	58
〈표 II-1-27〉 국내 주요 밀원수종의 화밀 분비량 및 꿀 생산량.....	59
〈표 II-1-28〉 수분서비스 평가를 위해 선정된 16종의 영양군 내 면적과 꿀 및 감로 생산량.....	61
〈표 II-1-29〉 영양군 내 산림수종 수준에서 InVEST 구동을 위한 길드 표.....	61
〈표 II-1-30〉 단일 토지피복도 기반의 영양군 내 InVEST 구동을 위한 생·물리적 표.....	62
〈표 II-1-31〉 통합 토지피복도 기반의 영양군 내 InVEST 구동을 위한 생·물리적 표.....	63
〈표 II-1-32〉 훼손유형별 해당 비오톱 유형.....	71
〈표 II-1-33〉 기후에너지환경부 자연환경복원 추진 지침의 7개 복원목표 유형.....	71

〈표 II-1-34〉 복원목표 유형 분류 기준	72
〈표 II-1-35〉 기능 회복형 훼손지의 취약 ES 평가 대상	73
〈표 II-1-36〉 훼손유형별 현황	74
〈표 II-1-37〉 지자체별 훼손지 현황(면적 순)	75
〈표 II-1-38〉 복원목표 유형별 현황	77
〈표 II-1-39〉 기능 회복형 훼손지별 취약 ES 식별 결과	79
〈표 II-1-40〉 복원목표 유형 및 훼손 원인별 복원 추진 전략	81
〈표 II-1-41〉 기능 회복형 훼손지의 취약 ES 항목별 세부 적용 기술	82
〈표 II-1-42〉 음향모니터링 및 온습도 자료 수집 현황	85
〈표 II-2-1〉 영국 생태계 계정 발전 과정	88
〈표 II-2-2〉 영국 생태계 계정화 로드맵에서의 향후 발전 방향	89
〈표 II-2-3〉 연도별 영국 도시 생태계 계정 발전 단계	90
〈표 II-2-4〉 영국 도시 지역 내 광활한 서식지의 범위, 2021년 예	92
〈표 II-2-5〉 영국에서 가장 가까운 기능적 녹지 공간 유형까지의 평균 거리(미터), 2021년	93
〈표 II-2-6〉 도시 생태계 계정 지표(예)	95
〈표 II-2-7〉 2020년 서비스별 영국 국가별 도시 연간 물리적 흐름 분석	98
〈표 II-2-8〉 기후에너지환경부 토지피복도와 IUCN GET 과의 분류 차이 분석 결과(농경지)	98
〈표 II-2-9〉 생태계 규모 계정표 1990-2000	99
〈표 II-2-10〉 생태계 변화 매트릭스 1990-2000	100
〈표 II-2-11〉 생태계 규모 계정표 2000-2010	101
〈표 II-2-12〉 생태계 변화 매트릭스 2000-2010	101
〈표 II-2-13〉 생태계 규모 계정표 2010-2020	102
〈표 II-2-14〉 생태계 변화 매트릭스 2010-2020	102
〈표 II-2-15〉 도시 생태계 상태 계정 지표 선정(안)	103
〈표 II-2-16〉 SEEA EA 체계 기반 도시 생태계 계정화 절차와 예시	106
〈표 III-1-1〉 분석에 활용된 자료 목록	114
〈표 III-1-2〉 전국 탄소 생태계서비스 현황(2022년)	115
〈표 III-1-3〉 전국 T-P 생태계서비스 현황(2022년)	119
〈표 III-1-4〉 전국 T-N 생태계서비스 현황(2022년)	123
〈표 III-1-5〉 시도별 생태계서비스 자급률 종합	127
〈표 III-2-1〉 2025년 설문조사 지역별 표본 수집 현황	132
〈표 III-2-2〉 2025년 생생진로톡 참여 학교	141
〈표 III-3-1〉 지불제 연도별 추진 개황	142
〈표 III-3-2〉 지불제 연도별 광역시도별 예산 현황	143

〈표 Ⅲ-3-3〉 지차체별 지방비 추가 편성 예산.....	144
〈표 Ⅲ-3-4〉 내륙 광역시도별 지불제 사업유형 현황('24년).....	145
〈표 Ⅲ-3-5〉 연도별 사업유형별 내륙 지자체 참여 현황('23~'24년).....	146
〈표 Ⅲ-3-6〉 기관별(기후에너지환경부·제주) 생태계서비스지불제 활동 유형(안) 비교.....	147
〈표 Ⅲ-3-7〉 2024년도 제주특별자치도 마을별 생태계서비스지불제 활동 유형 현황.....	148
〈표 Ⅲ-3-8〉 지불제 사업 속성정보 DB(계약 필지) 구축 현황.....	150
〈표 Ⅲ-3-9〉 지불제 사업 모니터링 이행·미이행 사업 수.....	151
〈표 Ⅲ-3-10〉 고양시 지불제 사업 모니터링 개요.....	151
〈표 Ⅲ-3-11〉 지불제 사업지역의 동시센서스 조사지점 목록	154
〈표 Ⅲ-3-12〉 벗짚존치 사업논(1), 비사업논(0) 낙곡 수 조사 결과 기술통계.....	158
〈표 Ⅲ-3-13〉 벗짚존치 사업논(1), 비사업논(0) 낙곡 수 비교 분석(Mann-Whitney U test) 결과.....	159

〈그림 차례〉

〈그림 Ⅰ-1-1〉 연구과제 로드맵	6
〈그림 Ⅱ-1-1〉 비행실험 진행사항	34
〈그림 Ⅱ-1-2〉 유전자 분석 파이프라인	35
〈그림 Ⅱ-1-3〉 반경 3 km 이내 양봉장 토지 피복	36
〈그림 Ⅱ-1-4〉 수분서비스 이해당사자 생태계서비스 정성평가 진행 과정	38
〈그림 Ⅱ-1-5〉 비행거리 측정 방출 지점 20곳	38
〈그림 Ⅱ-1-6〉 DNA 메타바코딩을 활용한 꿀 시료의 식물 및 미생물 군집 분석	40
〈그림 Ⅱ-1-7〉 꿀 및 화분 시료의 식물 분류군 조성 분석 연구 사례	41
〈그림 Ⅱ-1-8〉 ITS(A) 및 rbcL(B) ASVs 기반 Bray-Curtis 거리를 이용한 꿀 시료의 계층적 군집 분석	42
〈그림 Ⅱ-1-9〉 ITS ASVs 기반 과(A), 속(B), 종(C) 수준에서의 식물 분류군 상대 비율	46
〈그림 Ⅱ-1-10〉 rbcL ASVs 기반 과(A), 속(B), 종(C) 수준에서의 식물 분류군 상대 비율	48
〈그림 Ⅱ-1-11〉 지역별 차이(영양 5종, 군산 16종)	49
〈그림 Ⅱ-1-12〉 종별 차이(양봉꿀벌_AM 30종, 재래꿀벌_AC 12종)	49
〈그림 Ⅱ-1-13〉 이해당사자 대상 양봉장 주변 생태계서비스 정성평가 결과	51
〈그림 Ⅱ-1-14〉 수분서비스 현장 양봉 연구 대상지 PollMap 입력자료	53
〈그림 Ⅱ-1-15〉 수분서비스 현장연구 대상지 PollMap 결과	54
〈그림 Ⅱ-1-16〉 수분서비스 현장 연구 대상지 InVEST 결과	56
〈그림 Ⅱ-1-17〉 영양군 현장 연구 대상지 토지피복도	57
〈그림 Ⅱ-1-18〉 PollMap, InVEST 모형 간 공간 유사도 비교	57
〈그림 Ⅱ-1-19〉 영양군 산림 대상 단일 토지피복도 및 통합 토지피복도 InVEST 구동 결과	65
〈그림 Ⅱ-1-20〉 훼손유형별 면적 분포	75
〈그림 Ⅱ-1-21〉 경기도 시군구별 훼손지 분포 현황(개수)	76
〈그림 Ⅱ-1-22〉 경기도 시군구별 훼손지 분포 현황(면적)	77
〈그림 Ⅱ-1-23〉 복원목표 유형별 면적 분포	78
〈그림 Ⅱ-1-24〉 복원목표 유형별 훼손지 분포 지도	79
〈그림 Ⅱ-1-25〉 기능 회복형 훼손지별 취약 ES 분포 비율	80
〈그림 Ⅱ-1-26〉 생태계 내에서 다양한 핵심 기능을 담당하는 포유류들의 예	84
〈그림 Ⅱ-1-27〉 동면처 내 온습도 변화 및 음향모니터링 결과	86
〈그림 Ⅱ-2-1〉 자연 자본 계정 로드맵(2013-2020)	88
〈그림 Ⅱ-2-2〉 영국 도시 생태계 계정(생물다양성)	96
〈그림 Ⅱ-2-3〉 영국의 생물타리 면적과 길이(상태지표 예시)	96
〈그림 Ⅱ-2-4〉 영국의 도시수목 면적(상태지표 예시)	97
〈그림 Ⅱ-2-5〉 생태계 규모 계정 절차	99

<그림 Ⅲ-1-1> 생태계서비스 수요-공급 분석 프레임워크	113
<그림 Ⅲ-1-2> 기초자치단체별 탄소 공급량(LULUCF 흡수량) 분포	115
<그림 Ⅲ-1-3> 기초자치단체별 탄소 수요량(총배출량) 분포	116
<그림 Ⅲ-1-4> 기초자치단체별 탄소 수지(공급-수요) 5분위 등급	117
<그림 Ⅲ-1-5> 기초자치단체별 총인(T-P) 공급량(정화량) 분포	118
<그림 Ⅲ-1-6> 기초자치단체별 총인(T-P) 공급량(발생량) 분포	119
<그림 Ⅲ-1-7> 기초자치단체별 총인(T-P) 수지(공급-수요) 5분위 등급	120
<그림 Ⅲ-1-8> 총인(T-P) 5분위 등급별 실측 농도 비교	121
<그림 Ⅲ-1-9> 기초자치단체별 총질소(T-N) 공급량(정화량) 분포	122
<그림 Ⅲ-1-10> 기초자치단체별 총질소(T-N) 공급량(발생량) 분포	122
<그림 Ⅲ-1-11> 기초자치단체별 총질소(T-N) 수지(공급-수요) 5분위 등급	123
<그림 Ⅲ-1-12> 총질소(T-N) 5분위 등급별 실측 농도 비교	124
<그림 Ⅲ-1-13> 시도별 탄소 공급-수요 등급 분포	125
<그림 Ⅲ-1-14> 시도별 총인(T-P) 공급-수요 등급 분포	125
<그림 Ⅲ-1-15> 시도별 총질소(T-N) 공급-수요 등급 분포	126
<그림 Ⅲ-2-1> 2025년 생태계서비스 설문조사 주요 결과(1)	132
<그림 Ⅲ-2-2> 2025년 생태계서비스 설문조사 주요 결과(2)	133
<그림 Ⅲ-2-3> 생태계서비스 인지도 및 잘 이해하고 있는 개념의 연도별 변화	134
<그림 Ⅲ-2-4> 거주지 인근 자연환경 방문빈도의 연도별 변화 및 자연환경 접근 거리	135
<그림 Ⅲ-2-5> 거주지 유형별 '도보'로 접근가능한 자연환경 거리	135
<그림 Ⅲ-2-6> 광역시도 별 '도보'로 접근가능한 자연환경 거리	136
<그림 Ⅲ-2-7> 지지서비스 관련 만족도 응답 결과	137
<그림 Ⅲ-2-8> 설문조사 보도자료 기사 노출 현황	138
<그림 Ⅲ-2-9> 생태계서비스 개념과 진로 방향, 우리 학교의 생태계서비스 알아보기(2025 생생진로톡)	139
<그림 Ⅲ-2-10> 우리 학교 생태계서비스 소개하기 조별 실습(2025 생생진로톡-초등)	140
<그림 Ⅲ-2-11> 조별활동 결과 발표(2025 생생진로톡)	140
<그림 Ⅲ-2-12> 생생진로톡 이해도 및 만족도 설문조사 결과(학생)	141
<그림 Ⅲ-3-1> 지불제 사업비 총액 및 광역시도별 현황	144
<그림 Ⅲ-3-2> 내륙 지불제 사업유형별 지자체 수 현황('22~'24년도)	146
<그림 Ⅲ-3-3> 2024년 전국 생태계서비스지불제 세부 사업 유형별 비율 현황	149
<그림 Ⅲ-3-4> 연도별 지불제 계약 필지 분포 현황	150
<그림 Ⅲ-3-5> 고양시 장항습지 경작지의 벗짚초치 등 사업 분포	151
<그림 Ⅲ-3-6> 고양시 장항습지 경작지 재두루미 월동 및 이동기 개체수	152
<그림 Ⅲ-3-7> 고양시 장항습지 경작지 겨울철 재두루미 개체수 연도별 변화	152

〈그림 Ⅲ-3-8〉 모니터링 절차 강화를 위한 지불제 가이드라인 수정 방안·····	153
〈그림 Ⅲ-3-9〉 동시센서스 경계·····	154
〈그림 Ⅲ-3-10〉 새만금 지역의 '24년 기준 지불제 사업지(노란색)와 동시센서스 경계·····	155
〈그림 Ⅲ-3-11〉 새만금 지역 주요 보호종의 연도별 출현 개체수·····	155
〈그림 Ⅲ-3-12〉 DMZ 지역(빨간색 경계)의 '24년 기준 지불제 사업지(노란색)와 동시센서스 경계·····	156
〈그림 Ⅲ-3-13〉 DMZ 지역 주요 보호종의 연도별 출현 개체수·····	156
〈그림 Ⅲ-3-14〉 군산 나포면 벗짚존치 사업지의 낙곡 수 조사 지점·····	157
〈그림 Ⅲ-3-15〉 군산 나포면 벗짚존치 사업논(1)과 비사업논(2) 낙곡 수 Boxplot·····	158

요약문

I. 생태계서비스 통합 평가 체계 구축

본 연구는 생태계서비스를 정책결정 과정에 실질적으로 활용하기 위한 기반을 마련하고자, 생태계서비스 통합 평가 체계와 정책 연계 구조를 구축하고, 주요 생태계 유형 및 서비스에 대한 주제별 시범 평가를 수행하였다. 특히 IPBES 평가 개념을 바탕으로 PSR(압력-상태-대응, Pressure-State-Response) 구조를 적용하여 생태계 변화와 정책 대응 간의 인과관계를 파악하고, 국내 정책 환경과 자료 여건에 부합하는 평가 틀을 제시하는데 목적을 두었다.

가. 연구 배경 및 필요성

생태계서비스는 인간 사회가 생태계로부터 제공받는 다양한 혜택으로, 생물다양성 보전과 인간 삶의 질을 연결하는 핵심 개념이다. 국제적으로는 IPBES, SEEA-EA 등 다양한 평가·계정 체계를 통해 생태계서비스를 정책과 경제 의사결정에 통합하려는 노력이 확산되고 있다. 반면 국내에서는 생태계서비스 개념의 정책적 활용이 점진적으로 확대되고 있음에도 불구하고, 생태계서비스 간 지표 연계성, 장·단기 변화, 정책 대응과의 구조적 연결성을 종합적으로 고려한 평가 체계는 아직 미흡한 실정이다. 이에 본 연구는 생태계서비스 평가를 단순한 현황 진단을 넘어, 정책 결정 지원 도구로 기능할 수 있도록 구조화하고, 생태계 유형별·주제별 시범 평가를 통해 향후 제도화 가능성을 검토하고자 수행되었다.

나. 생태계서비스 통합 평가 체계 및 PSR 프레임워크

PSR 평가 체계는 IPBES(2018)에서 제시한 개념 틀을 기반으로 하되, 이를 국내 정책 환경에 맞게 PSR 구조로 단순화하여 적용하였다. 기후 변화, 토지 이용 변화, 오염, 과이용, 침입외래종 등 직접 요인(압력)이 생태계의 구조와 기능, 생물다양성에 영향을 미치고, 이러한 변화가 생태계서비스 제공 능력(상태)에 반영되며, 이에 대응하는 정책·관리 수단(대응)이 마련된다는 인과 구조를 전제로 한다. 지표 선정은 국가통계 및 공식 조사 자료를 우선 활용하였으며, 자료의 시계열(30년), 공간 해상도(기후에너지환경부 대분류 지도), 일관성을 검토한 후 전문가 자문을 거쳐 최종 확정하였다. 이를 통해 생태계 유형별 압력과 상태를 대표하는 지표를 구성하고, 장·단기 추세 분석과 점수화를 통해 통합 평가 결과를 도출하였다.

다. 생태계 유형 및 주제별 시범 평가

1) 수분 생태계서비스 평가

수분서비스는 작물 생산과 생물다양성 유지에 핵심적인 조절서비스로, 생태계서비스 중에서도 압력-상태-효과 간의 연결 구조가 비교적 명확한 분야이다. 본 연구에서는 InVEST Crop Pollination 모형을 활용하여 국내 주요 작물 23종을 대상으로 광역 단위 수분서비스 평가를 수행하였다. 특히 작물별 수분 의존도, 경관 구조, 화분매개자의

이동 가능성을 고려하여 공간적 분포 특성을 분석하였으며, 밀원수종 정보를 활용한 시범 분석을 통해 비농업지역의 생태적 기여도를 정량화할 수 있는 가능성을 제시하였다. 이는 향후 농업 정책뿐 아니라 도시·산림 관리 정책과의 연계 가능성을 시사한다.

2) 지표종을 활용한 생태계서비스 평가

생태계서비스 평가는 토지피복이나 원격탐사 지표에 주로 의존해 왔으나, 최근에는 생태계 기능의 행위자로서 동물군의 역할에 주목하는 연구가 증가하고 있다. 본 연구에서는 야행성 비행 포유류인 박쥐를 대상으로, 해충 조절·수분·종자 확산 등 다양한 생태계서비스를 반영할 수 있는 지표종 활용 가능성을 탐색하였다. 박쥐의 활동 자료와 미기후 정보를 결합한 분석을 통해, 환경 변화에 대한 민감성을 생태계서비스 잠재력 진단 지표로 활용할 수 있는 기초적 근거를 제시하였다. 이는 훼손지 및 복원지 평가, 동굴 생태계 관리 등 다양한 정책 분야로의 확장 가능성을 내포한다.

3) 생태계 계정(SEEA-EA) 도입을 위한 시사점

본 연구는 생태계서비스 평가 결과를 향후 생태계 계정(SEEA-EA) 도입과 연계할 수 있는 가능성도 함께 검토하였다. 영국(UK SEEA-EA)의 국가·도시 생태계 계정 사례 분석을 통해, 생태계서비스가 단순한 환경 지표를 넘어 국가 및 지역 정책, 투자 의사 결정을 지원하는 도구로 활용되고 있음을 확인하였다. 특히 도시 생태계 계정은 국가 계정의 보조적 역할을 넘어, 도시계획·기후 적응·녹지 인프라 투자 등 다양한 정책 영역에서 활용 가치가 크다는 점이 강조된다. 이러한 사례는 향후 국내에서도 도시 단위 생태계서비스 평가와 계정화 논의를 본격화할 필요성을 시사한다.

4) 연구의 의의 및 향후 과제

본 연구는 생태계서비스 평가를 정책 결정 지원 체계로 확장하기 위한 구조적 기반을 제시하였다는 점에서 의의가 있다. PSR 기반 통합 평가 체계는 생태계 변화의 원인과 결과, 그리고 정책 대응 간의 연결성을 명확히 하여, 향후 정책 설계 및 평가 과정에서 활용 가능성이 높다. 향후에는 주제별 평가 결과를 통합하는 다중 서비스 분석, 장기 모니터링을 통한 추세 검증, 사회·경제적 가치 평가와의 연계가 필요하다. 이를 통해 생태계서비스 평가는 단기적 연구 성과를 넘어, 국가 및 지방정부의 환경·공간·농업·기후 정책을 뒷받침하는 핵심 의사결정 도구로 자리매김할 수 있을 것이다. 생태계서비스를 정책 의사결정에 실질적으로 활용하기 위한 기반을 마련하고자, 생태계서비스 공급·수요 평가체계를 구축하고, 이를 토대로 도시 및 산업 지역의 취약성을 진단하며, 국민 인식 조사와 생태계서비스지불제(PES) 효과성 평가를 연계 분석하였다. 특히 탄소 및 수질(T-P, T-N) 생태계서비스를 중심으로 압력(P)-상태(S)-대응(R) 프레임워크를 적용하여, 생태계서비스의 불균형 구조를 정량적으로 제시하고 정책적 활용 가능성을 검토하였다.

II. 생태계서비스 공급-수요 지표 발굴 및 인식 증진

가. 연구 배경 및 목적

도시화와 산업화의 가속화는 생태계 구조와 기능을 약화시키며, 이에 따라 인간 사회가 생태계로부터 제공받는 서비스의 공급 능력은 감소하는 반면 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 특히 대도시와 산업단지는 탄소 배출, 수질 오염 등 생태계서비스 수요가 집중되는 지역인 반면, 산림·습지 등 공급 기반은 제한적인 구조를 보이고 있다. 이러한 공급-수요 불균형은 생태계서비스 '적자(deficit)'를 심화시키며, 장기적으로는 도시의 환경 취약성과 지속가능성 저하로 이어질 수 있다. 국내에서는 생태계서비스 평가·지도 구축을 위한 기초 연구와 시범사업이 진행되어 왔으나, 기초자치단체 단위에서 수요를 포함한 정량적 평가와 취약성 진단, 그리고 이를 정책 및 제도와 직접 연계하는 분석은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 이에 본 연구는 기초자치단체 단위 생태계서비스 수요·공급 지표를 정량화하고, 도시·산업 지역의 구조적 취약성을 진단하며, 국민 인식 조사 및 생태계서비스지불제 사례를 연계함으로써 정책 결정 지원 체계로서의 생태계서비스 평가 모델을 제시하는 것을 목적으로 한다.

나. 분석 자료 및 방법

전국 229개 기초자치단체를 대상으로 탄소 및 수질 생태계서비스의 공급과 수요를 정량적으로 분석하였다. 생태계서비스 수지는 공급(S)에서 수요(D)를 차감한 값으로 정의하였으며, 이를 통해 지역별 서비스 부족 또는 초과 여부를 평가하였다. 탄소 부문의 공급 지표는 기후에너지환경부 지역 온실가스 통계(2022년)의 LULUCF 흡수량을 활용하였고, 수요 지표는 에너지·공정·농업·폐기물 부문을 포함한 총 온실가스 배출량을 적용하였다. 수질 부문에서는 WAMIS 오염총량관리시스템 자료를 활용하여 총인(T-P)과 총질소(T-N)의 발생량을 수요로, 발생량과 배출량의 차이를 정화량(공급)으로 설정하였다. 분석 결과의 신뢰성 검증을 위해 기후에너지환경부 수질측정망의 실측 농도 자료와 수지 등급 간의 통계적 정합성을 검토하였다. 분석 결과는 기초자치단체 및 시도 단위로 집계하였으며, 면적 차이에 따른 편향을 보정하기 위해 단위면적당 수지값을 기준으로 5분위 등급화를 수행하였다.

다. 주요 분석 결과

1) 수요-공급 지표(탄소)

분석 결과, 전국 탄소 생태계서비스의 자급률은 약 5.6%에 불과한 것으로 나타났다. 이는 국내 산림의 탄소 흡수량이 전체 배출량의 극히 일부만을 상쇄하고 있음을 의미하며, 구조적으로 탄소 서비스 적자 상태에 있음을 시사한다. 229개 기초자치단체 중 약 90%가 탄소 수지 적자 지역으로 분류되었으며, 수지가 양(+)인 지역은 강원·경북 등 산림 비중이 높은 일부 지역에 국한되었다. 반면, 충남 당진, 전남 광양·여수, 경북 포항 등 대규모 산업단지가 위치한 지역은 전국 탄소 적자의 상당 부분을 차지하였다. 이는 특정 산업 거점이 국가 전체 탄소 불균형 구조에 미치는 영향이 매우 크다는 점을 보여준다.

2) 수요-공급지표(수질(T-P, T-N))

총인(T-P) 생태계서비스의 전국 자급률은 약 84.5%로 비교적 높은 수준을 보였으나, 여전히 일정 수준의 초과 부하가 존재하였다. 반면 총질소(T-N)의 자급률은 약 63.7%로, 자연 정화 기능만으로는 발생 부하를 충분히 상쇄하지 못하는 구조가 확인되었다. 수질 수지 등급과 실측 농도 간의 통계 분석 결과, T-P와 T-N 모두에서 등급이 나쁠수록 실제 수질 농도가 유의하게 증가하는 경향이 확인되어, 본 연구의 수지 기반 평가 모델이 실제 환경 상태를 적절히 반영하고 있음이 검증되었다.

3) 도시·산업 지역 취약성

종합적으로 볼 때, 수도권과 주요 광역시는 탄소와 총질소(T-N) 서비스에서 동시에 취약한 특성을 보였다. 서울, 인천, 울산 등 대도시는 탄소 자급률이 1% 내외 또는 그 이하로 나타나, 자체적인 생태계서비스 공급만으로는 환경 부담을 감당하기 어려운 구조임이 명확히 드러났다. 일부 도 단위 지역에서는 산림 중심 지역과 도시·산업 지역 간의 내부 불균형도 크게 나타났다.

4) 생태계서비스 국민 인식 조사 및 제도 연계 분석

2025년 실시한 생태계서비스 국민 인식 및 만족도 조사 결과, 생태계서비스 개념에 대한 인지도는 68.6%로 조사 시작 이후 최고 수준을 기록하였다. 특히 도보 15분 이내 자연환경 접근성, 공원·녹지 이용에 대한 만족도가 높게 나타나, 도시 생활 속에서 체감되는 생태계서비스의 중요성이 확인되었다. 또한 생태계서비스지불제(PES) 사례 분석 결과, 벗짚 존치 사업과 같은 농경지 기반 생태계서비스 제공 활동이 겨울 철새 먹이 공급 등 생태적 효과를 실질적으로 창출하고 있음이 확인되었다. 다만, 다수 지자체에서 모니터링이 충분히 수행되지 않아 제도의 효과성을 체계적으로 평가하는 데 한계가 존재하는 것으로 나타났다.

5) 정책적 시사점 및 향후 과제

본 연구는 우리나라 도시와 산업 지역이 생태계서비스의 최대 수혜자이자 최대 수요자임을 실증적으로 보여준다. 이에 따라 개별 지자체 차원의 대응을 넘어, 공급 지역과 수요 지역 간의 협력적 관리 체계가 필수적이다. 특히 탄소흡수와 수질정화를 제공하는 산림·농촌 지역에 대한 정당한 보상 체계로서 생태계서비스지불제(PES)의 제도적 정착이 요구된다. 향후, 생태계서비스 평가의 정기적 모니터링 체계 구축, 기후변화 시나리오를 반영한 미래 전망 분석, 경제적 가치 평가의 고도화가 필요하다. 이를 통해 생태계서비스 평가가 단순한 연구 성과를 넘어, 국가 및 지방정부의 환경·기후 정책을 뒷받침하는 핵심 의사결정 도구로 활용될 수 있을 것이다.

Summary

I . Establishing an Ecosystem Service–Based Policy Decision Support Framework

This study aims to establish a policy decision support framework grounded in ecosystem service (ES) assessment by developing an integrated evaluation system and conducting thematic pilot assessments across key ecosystem types and services. Building upon the conceptual framework proposed by the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), the study adopts a Pressure–State–Response (PSR) structure to clarify causal linkages between ecosystem change and policy interventions. The primary objective is to propose an assessment framework that is compatible with domestic policy contexts and data availability while enhancing the practical applicability of ecosystem service evaluations in policy decision–making processes.

A. Background and Rationale

Ecosystem services represent the diverse benefits that humans derive from ecosystems and serve as a critical linkage between biodiversity conservation and human well–being. Internationally, ecosystem service assessments and accounting frameworks—such as IPBES assessments and the System of Environmental–Economic Accounting–Ecosystem Accounting (SEEA–EA)—have increasingly been integrated into policy and economic decision–making. In contrast, while awareness and policy interest in ecosystem services have gradually expanded in Korea, comprehensive assessment systems that systematically link ecosystem change, service provision, and policy responses remain limited. In particular, existing domestic studies have largely focused on individual ecosystem components or static service supply indicators, with insufficient consideration of interactions among services, long– and short–term dynamics, and structured connections to policy instruments. This study addresses these limitations by advancing ecosystem service assessment beyond descriptive evaluation toward a policy–oriented analytical framework that can support strategic decision–making.

B. Integrated Ecosystem Service Assessment Framework and PSR Approach

The integrated assessment framework developed in this study is based on the IPBES conceptual model, restructured into a simplified Pressure–State–Response (PSR) framework to enhance policy relevance. Under this framework, direct drivers such as climate change, land–use change, pollution, overexploitation, and invasive species exert pressures on ecosystems, leading to

changes in ecosystem structure, function, and biodiversity (state). These changes, in turn, affect the capacity of ecosystems to provide services, thereby necessitating policy and management responses. Indicator selection prioritized nationally standardized statistics and official monitoring data. Each indicator was evaluated in terms of data continuity, spatial and temporal resolution, and consistency, and final selections were made through expert consultation. The resulting indicator sets represent pressures and states across major ecosystem types and were applied consistently in trend analysis, scoring, and integrated assessment. This approach provides a transparent and reproducible foundation for linking ecosystem service assessments with policy evaluation.

C. Ecosystem Types and Thematic Pilot Assessments

1) Pollination Ecosystem Services

Pollination services are a key regulating ecosystem service that directly links ecosystem integrity with agricultural productivity and biodiversity conservation. Due to their relatively clear causal structure between pressures, ecosystem condition, and service outcomes, pollination services provide a suitable entry point for policy-relevant ecosystem service assessment. In this study, the InVEST Crop Pollination model was applied to assess pollination services for 23 major crop species at the metropolitan and provincial levels. The analysis incorporated crop-specific pollination dependence, landscape composition, and potential pollinator movement to examine spatial variation in pollination service provision. Furthermore, pilot analyses utilizing nectar plant species information demonstrated the potential to quantify ecological contributions from non-agricultural areas, highlighting opportunities to integrate pollination services into broader land-use, forestry, and urban planning policies.

2) Indicator-Based Ecosystem Service Assessment

Conventional ecosystem service assessments have relied heavily on land cover and remote sensing-based indicators due to their ease of quantification. However, recent research has emphasized the role of fauna as active agents of ecosystem processes and service provision. Reflecting this shift, the present study explored the feasibility of using mammals—specifically bats—as indicator species for ecosystem service assessment. Bats provide multiple ecosystem services, including pest control, pollination, and seed dispersal, and are highly sensitive to environmental change. By integrating bat activity data with microclimatic variables, this study conducted a preliminary analysis of the potential to use bat responses as indicators of ecosystem service capacity and environmental health. The results suggest that mammal-based indicators could support assessments of disturbed and restored areas, cave ecosystems, and habitat management policies, offering a complementary perspective to existing vegetation-based indicators.

3) Implications for Ecosystem Accounting (SEEA-EA)

In addition to thematic service assessments, this study examined pathways for linking ecosystem service evaluation results with future implementation of ecosystem accounting under the SEEA-EA framework. Case studies from the United Kingdom illustrate how ecosystem service assessments and natural capital accounts have evolved from experimental evaluations into core tools supporting national and local policy decisions. In particular, urban ecosystem accounts in the UK extend beyond a supplementary role within national accounting systems, providing actionable information for urban planning, climate adaptation strategies, and green infrastructure investment. These experiences underscore the potential for ecosystem service assessments in Korea to inform spatial planning, investment prioritization, and policy evaluation, especially at the urban and regional levels.

4) Significance of the Study and Future Research Directions

This study contributes to the advancement of ecosystem service assessment by presenting a policy-oriented decision support framework that systematically links ecosystem change, service provision, and policy responses. The PSR-based integrated assessment structure enhances conceptual clarity and facilitates the translation of scientific findings into policy-relevant insights. Future research should focus on integrating multiple ecosystem services into comprehensive multi-service assessments, strengthening long-term monitoring to validate trends, and linking biophysical indicators with socio-economic valuation. Through these efforts, ecosystem service assessments can evolve from isolated analytical exercises into core decision-making tools that support environmental, spatial, agricultural, and climate policies at both national and local levels.

II. Establishing an Ecosystem Service–Based Policy Decision Support Framework

Focusing on Integrated Supply–Demand Assessment and Urban Vulnerability

This study aims to establish a policy decision support framework grounded in ecosystem service (ES) assessment by developing an integrated supply–demand evaluation system at the local government level and applying it to diagnose vulnerabilities in urban and industrial areas. The research focuses on carbon sequestration and water quality regulation services (total phosphorus, T–P; total nitrogen, T–N) and applies a Pressure–State–Response (PSR) framework to quantify ecosystem service imbalances. In addition, the study links biophysical assessment results with national perception surveys and pilot evaluations of Payment for Ecosystem Services (PES) schemes to enhance policy relevance and applicability

A. Background and Objectives

Rapid urbanization and industrial expansion have significantly altered ecosystem structures and functions, leading to a decline in ecosystem service supply while societal demand continues to increase. Urban and industrial areas are characterized by high levels of carbon emissions and pollutant generation, yet they possess limited green and blue infrastructure capable of providing regulating ecosystem services. This structural mismatch results in persistent ecosystem service deficits, which pose long–term risks to environmental sustainability and human well–being. Although ecosystem service assessment has been gradually incorporated into national policy discussions in Korea, quantitative analyses at the local government level—particularly those explicitly incorporating service demand—remain limited. Existing studies have primarily focused on service supply mapping or valuation at national or regional scales, with relatively weak integration into policy implementation frameworks.

Against this backdrop, the objectives of this study are threefold

- (1) to quantify ecosystem service supply, demand, and balance at the level of 229 local governments;
- (2) to diagnose structural vulnerabilities of urban and industrial regions based on service imbalances
- (3) to enhance policy applicability by linking biophysical assessments with public perception data and evaluations of ecosystem service payment schemes.

B. Data and Methodology

The analysis covers 229 local governments across the Republic of Korea. Ecosystem service balance was defined as the difference between service supply (S) and service demand (D), with positive values indicating surplus and negative values indicating deficit conditions. For carbon ecosystem services, supply was estimated using land use, land-use change, and forestry (LULUCF) carbon sequestration data from the Ministry of Environment’s regional greenhouse gas inventory (2022). Demand was represented by total greenhouse gas emissions, including emissions from energy, industrial processes, agriculture, and waste sectors. Water quality regulating services were assessed using data from the Water Environment Information System (WAMIS). Total phosphorus (T-P) and total nitrogen (T-N) generation loads were used as demand indicators, while purification capacity was estimated as the difference between generated and discharged loads. Model validity was examined by comparing service balance grades with observed water quality concentrations from national monitoring stations. To address spatial heterogeneity, ecosystem service balances were normalized by area and classified into quintile-based grades ranging from “very good” to “very poor.” Analyses were conducted at both local government and provincial levels.

C. Key Findings

1) Carbon Ecosystem Services

The national carbon ecosystem service self-sufficiency rate was estimated at approximately 5.6%, indicating that domestic ecosystems offset only a small fraction of total greenhouse gas emissions. Among the 229 local governments analyzed, nearly 90% exhibited carbon service deficits, while surplus conditions were limited to a small number of forest-dominated regions, primarily in Gangwon State and Gyeongsangbuk-do. Severe deficits were concentrated in industrial hubs such as Dangjin, Gwangyang, Yeosu, and Pohang, where large-scale power plants, steelworks, and petrochemical complexes are located. These regions account for a disproportionate share of national carbon deficits, highlighting the spatial concentration of emission pressures.

2) Water Quality Ecosystem Services

At the national level, the self-sufficiency rate for total phosphorus (T-P) regulating services was approximately 84.5%, suggesting that natural purification processes offset a substantial portion of phosphorus loads. However, total nitrogen (T-N) self-sufficiency was markedly lower at 63.7%, reflecting the persistence of nitrogen pollution, particularly from diffuse agricultural sources. Statistical validation showed that ecosystem service balance grades for both T-P and

T–N were significantly correlated with observed water quality concentrations. Regions with poorer balance grades consistently exhibited higher pollutant concentrations, confirming the robustness of the balance–based assessment framework.

3) Urban and Industrial Vulnerability

Major metropolitan areas, including Seoul, Incheon, and Ulsan, were identified as highly vulnerable, exhibiting simultaneous deficits in carbon and nitrogen regulating services. Carbon self–sufficiency in these cities was often below 1%, underscoring their strong dependence on surrounding rural and forested areas. In several provinces, sharp internal contrasts were observed between forested supply–dominant areas and urban or industrial demand–dominant areas, indicating pronounced intra–regional imbalances.

4) Public Perception and Policy Linkages

The 2025 national survey on ecosystem service awareness and satisfaction revealed that 68.6% of respondents were aware of the ecosystem service concept, the highest level recorded since the survey’s inception. Satisfaction was particularly high for ecosystem services directly experienced in daily life, such as access to parks and green spaces within walking distance. Evaluation of ecosystem service payment schemes demonstrated that practices such as rice straw retention effectively enhanced food availability for wintering birds, indicating tangible ecological benefits. However, insufficient monitoring across many local governments limits the ability to comprehensively assess long–term effectiveness, highlighting the need for strengthened evaluation protocols.

5) Policy Implications and Future Directions

The findings clearly indicate that urban and industrial regions function as both the largest beneficiaries and the largest consumers of ecosystem services, while forested and rural areas serve as key providers. This structural asymmetry necessitates policy approaches that go beyond jurisdictional boundaries and foster cooperation between service–providing and service–benefiting regions. Institutionalization of Payment for Ecosystem Services (PES) schemes represents a promising mechanism for addressing equity concerns and incentivizing conservation in supply regions. To enhance policy effectiveness, future efforts should focus on establishing regular monitoring systems, incorporating climate change scenarios into ecosystem service projections, and advancing economic valuation methodologies. Ultimately, the integrated ecosystem service assessment framework developed in this study provides a scientific foundation for embedding ecosystem services into environmental, climate, and spatial planning policies at both national and local levels.

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립

I

서론

1. 연구 배경
2. 연구 목적
3. 당해연도 목표

1. 연구 배경

가. 정책 연계성

기후변화, 생물다양성 감소, 토지이용 변화, 수질 및 대기오염 등 전 지구적 환경 문제는 기존의 부문별·대응적 환경관리 방식의 한계를 분명히 드러내고 있다. 이에 따라 자연환경을 단순한 보전의 대상으로 인식하는 접근에서 벗어나, 인간 사회에 제공되는 다양한 혜택으로서의 생태계 기능을 체계적으로 이해하고 이를 정책 결정에 반영하려는 노력이 국제사회 전반에서 강화되고 있다. 이러한 흐름 속에서 생태계서비스(Ecosystem Services) 개념은 생태계 보전과 인간 삶의 질을 연결하는 핵심 이론적·정책적 틀로 자리 잡았다. 「밀레니엄 생태계 평가(Millennium Ecosystem Assessment, MA, 2005)」는 생태계서비스를 공급, 조절, 문화, 지지서비스로 구분하고, 생태계 훼손이 인간 복지에 미치는 영향을 체계적으로 제시함으로써 국제적 논의의 전환점을 마련하였다. 이후 「생물다양성과 생태계서비스에 관한 정부 간 과학정책플랫폼(IPBES)」은 생태계 변화의 직접·간접 요인, 생태계 상태, 생태계서비스, 인간 복지 간의 인과관계를 강조하는 개념 틀을 제시하며, 과학적 평가 결과를 정책 결정에 직접 연결하는 것을 주요 목표로 설정하였다. 최근에는 생태계서비스 평가를 국가통계 및 경제 체계와 연계하려는 시도가 확대되고 있다. 유엔이 채택한 환경·경제계정체계(SEEA-EA)는 생태계의 면적, 상태, 서비스 흐름을 국가계정과 정합적으로 기록할 수 있는 국제 표준을 제시하며, 생태계서비스를 정책 및 재정 의사결정의 핵심 요소로 통합할 수 있는 기반을 제공한다. 특히 영국을 비롯한 일부 국가에서는 자연자본 계정과 도시 생태계 계정을 구축하여 공간계획, 기후 적응, 도시-녹지 인프라 투자 등 다양한 정책 분야에서 활용하고 있다. 이와 함께 최근 국제 연구의 중요한 특징은 생태계서비스의 공급-수요 관계와 공간적 불일치에 관한 관심이 증대되고 있다는 점이다. 도시 및 산업 지역은 높은 생태계서비스 수요를 보이지만, 공급 능력은 제한적인 구조를 가지며, 이에 따라 외부 지역에 대한 의존성이 심화한다. 이러한 구조적 불균형은 생태계서비스 취약성 진단과 지역 간 형평성 논의의 핵심 쟁점으로 주목받고 있다.

나. 정책 동향

우리나라에서도 생태계서비스 개념은 점차 정책 영역으로 확산되고 있다. 생물다양성 관련 법·제도 개정과 국가생물다양성전략 수립을 계기로, 생태계서비스 평가 및 지도 구축 사업이 추진되며 국가 및 광역 단위의 기초 자료가 축적됐다. 이러한 노력은 생태계서비스 개념을 정책적으로 도입하는 초기 단계로서 중요한 의미를 지닌다. 그러나 국내 생태계서비스 평가는 대체로 서비스 공급 중심의 정적 분석에 머무르는 경향이 있다. 토지피복, 식생 구조, 원격탐사 기반 지표 등을 활용한 평가는 생태계서비스의 공간적 분포를 파악하는 데 이바지하였으나, 사회·경제 활동으로 인해 발생하는 서비스 수요, 실제 이용과 체감 수준, 정책 대응과의 연계성에 대한 분석은 상대적으로 제한적이었다. 최근에는 생태계서비스지불제(Payment for Ecosystem Services, PES) 도입, 생태계 계정(SEEA-EA)에 대한 논의, 그리고 생태계서비스 국민 인식 및 만족도 조사와 같은 시도가 이루어지며 정책 활용 가능성이 점차 확대되고 있다. 특히 생태계서비스에 대한 국민 인식이 증가하고, 일상생활과 밀접한 서비스에 대한 체감도가 높아지고 있음에도 불구하고, 이러한 수요 정보를 체계적으로 정책에 반영할 수 있는 평가 틀은 아직 충분히 마련되지 않은 상황이다. 또한 기초자치단체는 토지이용, 도시계획, 환경관리의 핵심 주체임에도 불구하고, 해당 단위에서 활용할 수 있는 생태계서비스 평가

체계와 정책결정 지원 도구는 매우 제한적이다. 이는 생태계서비스 평가가 실제 정책 실행 단계로 연결되지 못하는 주요 원인 중 하나로 지적될 수 있다.

다. 연구 동향

국제적으로 생태계서비스 연구는 개념 정립 단계에서 벗어나 정량적·공간적 분석을 중심으로 빠르게 발전해 왔다. 초기 연구는 서비스 제공 지역(Service Providing Area)을 중심으로 공급량을 평가하는 데 주력하였으나, 최근에는 서비스 흐름, 수혜 지역(Service Benefiting Area), 그리고 공급-수요 불일치를 분석하는 방향으로 확장되고 있다. InVEST와 같은 생태계서비스 모형은 탄소흡수, 수질정화, 수분서비스 등 다양한 조절 서비스를 공간적으로 정량화할 수 있는 도구로 활용되고 있다. 특히 수분서비스 연구에서는 작물별 수분 의존도, 경관 구성, 화분매개자의 이동 특성을 반영한 평가가 이루어지며, 농업 생산성과 생물다양성 보전 간의 연계를 실증적으로 제시하고 있다. 한편, 최근 연구에서는 기존의 토지피복·식생 중심 지표를 넘어, 동물군을 활용한 생태계서비스 평가가 주목받고 있다. 포유류, 조류, 곤충 등은 해충 조절, 수분, 종자 확산 등 다양한 생태계 기능을 수행하며, 환경 변화에 민감하게 반응하는 특성이 있다. 특히 박쥐와 같은 포유류는 생태계서비스 제공자이자 환경 변화의 지표종으로써 활용 가능성이 제시된다. 방법론적으로는 압력-상태-대응(Pressure-State-Response, PSR) 구조가 생태계 평가와 정책 분석을 연결하는 유용한 틀로 활용되고 있다. PSR은 생태계 변화의 원인, 결과, 정책적 대응을 구조적으로 연결함으로써, 평가 결과를 정책 설계와 관리 전략으로 전환하는 데 강점을 지닌다. 그러나 이러한 구조적 접근은 국내 생태계서비스 평가 연구에서는 아직 제한적으로 적용되고 있다.

2. 연구 목적

가. 연구 목적 설정

앞서 연구 동향과 맞춰 국제적·국내적 연구 및 정책 흐름을 종합하여, 생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원체계를 구축하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는 다음과 같은 목표를 설정하였다.

- (1) IPBES 개념 틀을 바탕으로 하되 국내 정책 환경과 자료 여건에 부합하는 PSR 기반 통합 생태계서비스 평가 체계를 제시
- (2) 수분서비스 및 조절서비스 등 주요 생태계서비스에 대한 주제별 시범 평가를 통해 평가 체계의 적용 가능성을 검토
- (3) 생물 지표종을 활용한 생태계서비스 평가 가능성을 탐색하여 기존 평가 방식의 한계를 보완
- (4) 생태계서비스 평가 결과를 생태계서비스지불제 및 생태계 계정(SEEA-EA)과 연계할 수 있는 정책적 활용 가능성 모색

이를 통해 본 연구는 생태계서비스 평가를 단순한 현황 분석을 넘어, 정책 결정을 지원하는 실질적 도구로 확장하고자 한다.

나. 활용 방안

결과에서 제시하는 평가 체계와 분석 결과는 다양한 정책 영역에서 활용될 수 있다. 국가 차원에서는 국가생물 다양성전략(NBSAP, National Biodiversity Strategy and Action Plan), 지역 차원에서 지역생물다양성전략(LBSAP, Local Biodiversity Strategy and Action Plan) 기후변화 대응 정책, 환경·경제 통합 계정 구축을 위한 기초 자료로 활용 가능하다. 특히 SEEA-EA 도입을 위한 시범 평가 자료로서 의미를 지닌다. 기초자치단체 차원에서는 생태계서비스 취약 지역 진단, 도시 녹지 및 그린인프라 확충 전략 수립, 복원·보전 사업의 우선순위 설정 등에 활용될 수 있다. 또한 생태계서비스 수요와 국민 인식을 반영한 분석은 생태계서비스지불제와 같은 인센티브 기반 정책의 설계 및 효과 평가에도 기여할 수 있다. 또한 궁극적으로 본 연구는 생태계서비스 개념을 정책 현장에 실질적으로 정착시키고, 과학적 평가와 정책 실행 간의 간극을 해소하는 데 이바지하고자 한다.

3. 당해연도 목표

1단계 목표 달성을 위해 2023년~2025년, 3년간 연구를 완료하였으며 당해연도 과제 목표는 PSR 생태유형 통합 평가 체계(정책 연계), 생태계서비스 주제 평가(Thematic Assessments) 및 지불제 확대 방안 마련, 생태계서비스 미래시나리오(2050년) 연구, 수요-공급 지표 개발(3개 지표) 등이 있다.



〈그림 1 -1-1〉 연구과제 로드맵

본 연구는 2023년부터 시작된 국가 단위 생태계 유형별 생태계서비스(압력, 상태, 대응, PSR) 연구 중 대응(R) 지표 보안을 위해 2025년 생태계서비스 통합 평가 체계와 정책 간 연계성을 설명하는 데 중점을 두었다. 또한 IPBES NEXUS 시나리오 모델에 착안하여 한국의 실정에 맞는 스토리-라인과 시나리오를 2년에 걸쳐 완성하는 것이 본 과제의 목표 중 하나이다. 그리고 생태계서비스 수요-평가 체계 개발에서 다양한 지표들을 검토하였고 실제 파일럿 학습이 가능한 3개 지표에 대해 방법론 개발과 시범 평가를 목표로 두었다(3년, 10개 지표). 그리고 생태계서비스지불제와 관련하여 지속적인 제도 확대와 모니터링 확대 방안을 중심으로 실제 정책 지원과 문제점들을 발굴하고 보완하는 데 목표가 있다.

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립

II

생태계서비스 통합 평가 체계 구축

1. 생태계와 서비스의 통합평가 체계 구축 및 PSR 평가
2. 생태계 계정(SEEA-EA) 도입을 위한 생태계서비스 시범 평가

1. 생태계와 서비스의 통합 평가 체계 구축 및 PSR 평가

가. 생태계 유형별 PSR 통합 평가

1) 생태계 유형별 장단기 평가 결과 도출

가) 연구내용 및 방법

(1) 평가 개념 틀 및 범위

본 연구는 IPBES(2018)에서 제시한 평가 프로세스와 방법론을 기본으로 삼되, 우리나라의 정책 환경과 자료 여건에 맞도록 재구성한 것이다. IPBES의 개념 틀은 직접 요인으로서의 압력과 생태계의 상태, 그리고 생태계서비스 간 인과적 연계를 중시하는데, 본 연구에서는 이를 압력(Pressure, P) - 상태(State, S) - 대응(Response, R)으로 정리되는 PSR 구조로 단순화하여 평가와 정책 연계의 기본 축으로 설정하였다. 다시 말해, 기후변화·토지이용·오염·과이용·외래종과 같은 직접 요인에 의해 생태계의 상태가 변화하고, 이에 대응하는 정책과 관리 수단이 마련된다는 인과관계를 전제로, 이 장에서는 우선 압력(P)과 상태(S)에 해당하는 생태계 유형별 장·단기 통합 평가 결과를 제시하고, 이어지는 장에서 이러한 결과를 토대로 정책 대응(R) 방향을 제안하고자 한다.

평가의 시간적 범위는 2020년을 기준 시점으로 설정하였다. 장기 평가는 1990년부터 2020년까지 약 30년간의 변화를 대상으로 하였고, 단기 평가는 2010년부터 2020년까지 약 10년간의 변화를 대상으로 하였다. 이러한 구분은 기후, 토지이용, 오염, 생물다양성 등 주요 지표의 중장기 추세와 단기 변동을 동시에 파악함으로써 구조적 변화와 최근 정책·관리 효과를 함께 해석하기 위한 것이다. 공간적 범위는 대한민국 전역과 17개 광역지자체 단위로 설정하여, 전국 수준에서의 변화 양상을 먼저 파악하고 이를 시·도 단위로 세분화함으로써 향후 광역 차원의 자연환경·기후·환경계획 수립 및 이행과도 연계될 수 있도록 하였다. 평가 대상은 우리나라 자연환경을 대표하는 산림, 농경지, 도시, 담수, 습지의 다섯 생태계 유형으로 구분하였다. 국가 생태계 및 생태계서비스 평가의 전체 틀에서는 생태계서비스(공급·조절·문화서비스)와 그 경제적 가치 지표까지 포괄하지만, 본 과제의 이번 장에서는 그중에서도 생태계 유형별 압력(P)과 상태(S) 지표를 중심으로 장·단기 통합 평가를 수행하고, 이를 정책 결정 지원(R)과 연결하는 과정에 초점을 두었다.

지표 선정은 국가 통계와 국가 조사자료를 우선 활용하는 것을 원칙으로 하였다. 각 지표에 대해 자료 유형, 시계열 길이, 자료의 품질과 일관성을 검토하고, 관련 분야 전문가 자문과 합의를 거쳐 최종 목록을 확정하였다. 이러한 절차를 통해 각 생태계 유형별로 압력과 상태를 대표할 수 있는 지표 군을 구성하였으며, 이후 장·단기 추세 분석과 점수화, 통합 점수 산정에 일관되게 활용하였다.

(2) 생태계 유형 및 평가 지표

생태계 유형은 국내 자연환경 정책과 선행 연구에서 널리 사용되는 구분을 따르되, 실제 평가는 기후에너지환경부 토지피복도 등 공간자료를 활용하여 구체화하였다. 산림생태계는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 등 집단적으로 자라는 입목과 그 토지를 포괄하는 영역으로 정의하였으며, 구체적인 범위 설정 시 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 제2조의 산림 정의를 참고하였다. 농경지생태계는 논, 밭, 과수원 등 농업 생산 활동이 이루어지는 토지를 중심으로 구분하였고, 단순한 토지피복 유형뿐 아니라 주요 작물 구성, 경작 형태, 농업용수 활용 등 농업

경관의 특성을 함께 고려하였다. 도시 생태계는 시가화건조지역을 기본으로, 인공 구조물이 밀집한 지역과 그 내부 및 주변에 분포하는 도시녹지와 오픈스페이스를 포함하는 형태로 정의하여, 인공·불투수 공간과 함께 도시 내 녹지·수공간이 제공하는 생태계서비스를 동시에 반영할 수 있도록 하였다. 담수생태계는 하천, 호소, 저수지 등 지표수 수체와 그 주변 수변·완충지대를 포괄하는 공간을 대상으로 하여 수질과 수량, 수생태계 상태, 수변 토지이용 특성을 통합적으로 고려하였다. 습지생태계는 내륙습지와 하구습지 등 상시 또는 주기적으로 토양이 포화되는 지역을 중심으로, 국가 습지 인벤토리와 토지피복 정보를 결합하여 자연습지와 인위적으로 형성된 습지를 함께 포함하는 방식으로 구분하였다. 이러한 유형 구분을 통해 각 유형에서 나타나는 토지이용 변화, 기후 영향, 오염, 생물다양성 변화 등을 공간적으로 일관된 틀 안에서 추적하고 비교할 수 있도록 하였다.

압력(P) 지표 체계는 EU의 생태계 및 생태계서비스 평가(MAES)에서 제시된 분류를 참고하되, 우리나라의 자료 가용성과 정책 수요를 고려하여 토지 전환, 기후변화, 오염, 과이용, 외래종의 다섯 범주로 재구성하였다. 토지 전환은 산림이 농지로, 농지가 도시로, 습지가 개발지로 바뀌는 과정과 같이 인간의 토지이용 활동으로 자연 상태의 생태계가 다른 용도로 대체되는 현상을 의미하며, 산림에서 농지로의 전환 면적, 습지의 도시화 비율, 불투수면적 증가량 등이 이를 나타내는 지표로 활용되었다. 기후변화 범주는 온실가스 배출에 따른 기후 체계 변화가 생태계에 가하는 압력을 포착하기 위한 것으로, 기온 상승과 강수 패턴 변화, 폭염·열대야·집중호우·가뭄 등 극한기상일수를 지표로 사용하였다. 오염 범주는 대기·수질·토양 등 각 매체의 오염이 생태계에 미치는 부담을 평가하기 위한 것으로, 대기오염물질 농도, 하천과 호소의 BOD·TP 등 수질오염 지표, 농경지의 질소·인양분수지, 주요 오염원 배출 부하 등이 포함된다. 과이용 범주는 산림 벌채, 수자원 과다 취수, 과도한 어업·관광 이용 등 생태계의 수용 능력을 초과하는 이용 수준을 반영하며, 불법 산림훼손 건수, 용수 이용량, 내수면 어획량, 특정 지역으로의 방문객 집중도 등이 이에 해당한다. 외래종 범주는 생태계교란 생물 및 침입외래종의 정착과 확산이 생태계 구조와 기능에 미치는 영향을 나타내며, 생태계교란 생물·외래생물의 종 수와 분포, 확산 추세와 관련된 지표가 포함된다. 각 생태계 유형에서는 이 다섯 범주 가운데 해당 유형의 특성을 잘 설명하는 지표들을 선별하여 장·단기 추세를 분석하였다.

상태(S) 지표는 생태계의 현재 건강성과 기능 수준을 파악하기 위한 것으로, EU 평가에서 활용되는 분류를 참고하여 물리적 질, 화학적 질, 생태계 구조, 생물다양성, 생태계 기능의 다섯 범주로 정리하였다. 물리적 질 범주는 수체의 수량과 유량, 수심, 지형 구조, 토양 침식 정도 등 생태계의 물리적 환경 특성을 반영하는 지표로 구성되며, 하천 저수량의 변화, 토양 침식률, 도시 불투수면적 비율 등이 대표적이다. 화학적 질 범주는 수질과 토양·대기 내 오염물질 농도를 통해 생태계의 화학적 상태를 나타내며, 하천과 호소의 BOD·COD·TP·TN 농도, 지하수의 질소 농도, 대기 중 미세먼지 및 오존 농도가 여기에 포함된다. 생태계 구조 범주는 서식지 구성과 경관 구조를 평가하는 지표로, 패치 크기와 연결성, 파편화 정도, 산림의 임령 구조, 농업 경관의 다양성, 도시녹지의 분포와 연결성 등을 포함한다. 생물다양성(생물적 구성) 범주는 종풍부성과 종다양도 지수, 계통 다양도, 멸종위기종 출현 등 생물학적 조성을 반영하며, 식물·조류·어류의 종 수 및 다양도, 멸종위기 야생생물 지정 현황, 보호지역 내 종 구성 등이 대표적인 지표이다. 마지막으로 생태계 기능 범주는 순일차생산성, 양분 순환, 토양 비옥도, 수질 정화능, 탄소 흡수와 저장량 등 생태계가 수행하는 주요 기능과 과정을 평가하는 지표로 구성되며, 산림의 순일차생산성, 투입 대비 산출을 고려한 작물 생산성, 산림과 습지의 탄소 저장량 등이 포함된다. 이와 같이 유형별로 압력과 상태 지표를 체계화함으로써 다섯 생태계 유형이 각각 어떤 압력을 받으며 그 결과 상태가 어떻게 변화하고 있는지를 일관된 틀 안에서 비교·평가할 수 있도록 하였다.

〈표 II-1-1〉 생태계 유형별 평가 지표

구분	산림	농경지	도시	담수	습지	
압편	토지 전환	산림 토지 전환 산림파면화	활용농업 면적	불투수면적 도시화율	하천·호소 토지 전환	내륙습지 피복 전환
	기후 변화	산불 발생 산사태 피해 태풍 발생	연평균 기온 유효강우량 하계일수 무상기간	극한 기상현상 가뭄일수 자연재해 피해	극한호우발생 횟수	강수량 강우일수 물 수지
	오염	산림토양 산성화	농업용수 수질 양분수지 무기질 비료 소비 농약사용량	대기오염 배출 폐기물 발생량 폐수 발생량	BOD 배출 부하 TP 배출 부하 오폐수배출 가축분뇨 처리	하수처리 가축사육 두수 가축분뇨 처리 폐수 배출 BOD 배출 부하 TP 배출 부하 토지계ITN 배출 부하
	과이용	불법 산림훼손	-	인구변화	내수면 어업 생산 용수 이용 지하수 이용	-
	외래생물	외래생물 및 산림 병충해	-	-	외래생물 침입(어류)	생태계교란 생물
상태	화학적 질	-	지하수 질소 농도	호흡기질환 사망자 수 대기질 농도	하천수질 호소수질 하천목표 수질달성도 호소 목표 수질달성도	-
	물리적 질	-	-	하수도 보급 수목건강성	하천저수량 호소저수량 서식 수변건강도 하천 연결성	지하수위
	생태계 구조	단위면적당 임목축적 영급별면적 산림건강성	경관다양성 작물다양성 주요 작물 비율 휴경지 비율 유기농지 면적 가축 밀도 표토 유기탄소 함량	도시구조 변화 녹지접근성 녹지연결성	호소 부영양 상태	내륙습지 연결성
	생태계 구성	보호지역 면적	농지 조류	-	어류 종 다양도 하천 생태 건강도	종 수(식물, 조류) 종다양도지수(조류) 계통다양도지수(어류) 멸종위기 야생생물(조류) 습지보호지역
	생태계 기능	산림 순일차생산성	일차생산성	-	-	-

(3) 장·단기 추세 평가 및 통합 방법

각 압력(P) 및 상태(S) 지표에 대해서는 우선 이용 가능한 국가 통계와 정기 조사자료를 수집하여 시계열을 구축하였다. 이를 바탕으로 1990년대 초반부터 2020년까지 약 30년간의 변화를 장기 추세로, 2010년부터 2020년까지 약 10년간의 변화를 단기 추세로 구분하여 분석하였다. 지표별로는 연도별 값의 변화 양상, 기준연도 대비 증감률, 주요 정책 시행 전·후의 변화 등을 종합적으로 검토하여 해당 지표가 장기와 단기 각각에서 개선·악화(±5% 이상 변화)되었는지, 일정 수준을 유지하고 있는지(±5% 미만 변화) 판단하였다. 시계열이 충분하지 않거나 자료가 불규칙한 경우에는 장기 또는 단기 중 한쪽만 평가하거나, 자료 불충분 지표로 구분하여 통합 분석에서 별도로 처리하였다.

추세 평가 결과는 생태계 유형 간 비교와 정책적 활용을 용이하게 하기 위해 세 단계의 점수로 정리하였다. 장기 또는 단기 추세에서 지표가 의미 있게 개선되었으면 1점(개선)을 부여하고, 유의한 증감 없이 일정 수준을 유지하거나 단기와 장기 변화 방향이 상반되어 뚜렷한 판단이 어려운 경우에는 0점(유지)을 부여하였으며, 장기 또는 단기 추세에서 악화 방향의 변화를 보일 때에는 -1점(악화)을 부여하였다. 지표별로 부여된 점수는 이후 같은 범주에 속하는 지표들을 통합하여 범주별 통합 점수를 산정하는 데 활용되었다. 범주는 생태계 유형 내에서 설정한 압력·상태의 세부 범주를 의미하며, 각 범주에 포함된 지표들의 점수를 단순 합산하였다. 그 결과 산출된 통합 점수는 -2점 이하면 매우 악화, -1점인 경우 악화, 0점인 경우 변화 없음, 1점인 경우 개선, 2점 이상인 경우 매우 개선으로 해석하였다. 즉, 동일 범주 내에서 악화(-1점)로 평가된 지표가 다수이면 통합 점수가 -2점 이하로 낮아져 “매우 악화”로, 반대로 개선(1점)으로 평가된 지표가 많으면 통합 점수가 2점 이상이 되어 “매우 개선”으로 분류된다. 유지(0)로 평가된 지표가 많거나 개선과 악화가 혼재된 범주는 통합 점수가 0점 또는 ±1점 수준에 머물게 된다. 이와 같은 방식은 개별 지표 수준에서의 세부 결과를 범주 수준의 요약 정보로 전환함으로써 각 범주가 전반적으로 어떤 방향으로 변화하고 있는지를 한눈에 파악할 수 있게 해주며, 동시에 범주마다 포함된 지표 수가 서로 다르더라도 통합 점수의 크기와 방향을 비교하여 상대적인 개선·악화 정도를 검토하는 데 활용할 수 있다는 장점이 있다.

(4) 정책 대응 연계

도출한 생태계 유형별 장·단기 압력(P)-상태(S) 평가 결과는 정책 대응(R) 방향을 도출하기 위한 기초 자료로 사용되었다. 글로벌, 국가 및 부처별 생태계 유형·생물다양성 관련 법정계획을 검토하고, 각 계획에서 제시하는 목표·전략과 본 연구의 압력-상태 평가 결과를 연계하였다. 이 과정에서 생태계별 압력·상태 지표와 관련된 정책 대응 노력, 그리고 환경정의를 고려한 사회적 요소를 함께 발굴·검토하였다.

〈표 II-1-2〉 글로벌, 국가 및 부처별 생태계 유형 및 생물다양성에 영향을 주는 정책(법정) 계획 검토

부처	관련 법정 계획 및 정책	부처	관련 법정 계획 및 정책	
CBD(글로벌)	쿤밍-몬트리올 Global Biodiversity Framework(GBF)		멸종위기 야생생물 보전 종합계획	
관계부처 합동	제5차 국가환경종합계획	기후에너지환경부	제2차 물환경관리 기본계획	
	탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획		제4차 습지보전기본계획	
	제5차 국가생물다양성 전략		제2차 야생동물 질병관리 기본계획	
	제4차 지속가능발전 기본계획		제4차 야생생물보호 기본계획	
	제3차 국가 기후변화 적응대책		제3차 자연환경보전 기본계획	
	제3차 강우유출 비점오염원관리 종합대책		제2차 토양보전 기본계획	
	제2차 미세먼지 관리 종합계획		제2차 도시림 기본계획	
	제4차 저출산·고령사회 기본계획	제6차 산림기본계획		
	제1차 국가물관리 기본계획	제2차 백두대간보호기본계획		
	국가생명연구자원 관리 활용 기본계획	제3차 산림유전자원보호구역 관리 기본계획		
	국제개발협력 종합기본계획	제2차 정원진흥기본계획		
	유전자변형생물체 안전관리계획	제2차 산지관리기본계획		
	제1차자원순환기본계획	제4차 산림생물다양성기본계획		
	농림축산식품부	제5차 농어업인의 삶의 질 향상 및 농어촌 지역개발 5개년 기본계획		제3차 탄소흡수원 증진 종합계획
		2025년 주요업무 추진계획		제2차 도시림 기본계획
제4차 농림식품과학기술 육성 종합계획		농촌진흥청	제3차 농촌진흥사업 기본계획	
제5차 친환경농업 육성 5개년 계획		질병관리청	제3차 감염병 예방관리 기본계획	
농업·농촌 및 식품산업 발전계획			병원체자원관리 종합계획	
중장기 식량안보 강화 방안		기상청	제4차 기상업무발전 기본계획	
-	국토교통부	제4차 수도권정비계획		

* 관계부처합동, 2023 제5차 국가생물다양성 전략 p.77 재구성 및 부처별 중장기 계획 추가

나) 생태계 유형별 장단기 통합 평가 결과

(1) 산림생태계

산림생태계는 국토 면적의 약 68%를 차지(2020년 기준)하고 있으며, 1990년 대비 2020년 산림면적은 약 2.5% 감소하였으나, 동시에 임목 축적량과 장령림 비율이 많이 증가하고 보호지역이 확대되는 등, 면적 측면의 감소와 구조·기능 측면의 개선이 동시에 진행된 생태계로 요약된다.

압력(P) 측면에서 보면, 토지 전환과 관련하여 장기적으로는 산림이 감소하는 방향으로 변화했음을 보여주고 있지만, 산림 파편화 지표는 1990년 대비 약 8.7% 개선되어, 기존 산림 블록의 연결성은 어느 정도 회복 또는 유지된 것으로 평가된다. 즉, 장기적인 산림 면적 감소에도 불구하고, 남아 있는 산림의 공간 구조는 일부 개선된 양상을 보인다.

기후변화 관련 압력은 산림생태계에서 가장 두드러진 악화 요인이다. 1990~2020년 동안 산불은 총 13,607건이 발생하여 연평균 약 440건, 피해 면적은 총 6만 1천 ha로 연평균 약 1,900 ha의 피해를 입었다. 같은 기간 산사태 피해 면적은 1만 4천 ha(연평균 458 ha)에 이르며, 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미와 같이 대형 태풍에 의해 단일 연도 피해가 많이 증가한 사례도 보고되었다.

과이용 측면에서는 불법 산림훼손(산지전용, 무허가 벌채, 도벌 등) 관련 지표를 선정하였다. 불법 훼손 건수는 1990년 1,008건에서 2020년 3,291건으로 약 3배 이상 증가하였고, 2015년에는 3,913건으로 정점에 도달하였다. 이는 산림 자원의 불법적인 이용 압력이 장기적으로 뚜렷하게 증가해 온 것으로 해석된다. 오염(산림 토양 산성화)과 외래종·병해충 관련 지표는 자료의 한계로 인해 장·단기 추세를 정량적으로 해석하기 어려운 부분이 남아 있다.

상태(S) 측면에서 산림생태계는 생태계 구조와 기능에서 개선 경향이 뚜렷한 유형이다. 생태계 구조를 보면, 1990년 이후 침엽수림은 감소하고 활엽수림은 증가하였다. 침엽수림 면적은 1990년 308만 ha에서 2020년 232만 ha로 감소했지만, 활엽수림은 139만 ha에서 201만 ha로 증가하였다. 이는 과거 조림과 경영의 결과로 형성된 침엽수 위주의 인공림이 점차 활엽수림으로 전환되며, 구조적 다양성과 자연성이 회복되고 있음을 보여준다.

임목 축적량도 큰 폭으로 증가하였다. 국내 총 임목 축적량은 1990년 2억 4,800만 m³에서 2020년 10억 4,000만 m³로 약 3.3배 증가하였다. 영급 구조 측면에서는 4영급 이상 장령림의 면적 비율이 1990년 9.3%에서 2020년 77.3%로 급격히 증가하여, 산림이 전반적으로 성숙 단계로 진입했음을 알 수 있다. 이러한 결과는 산림생태계의 탄소 흡수능력과 서식지 제공 기능이 장기적으로 강화된 방향으로 변화하고 있음을 의미한다.

생물다양성 측면에서는 육상 보호지역의 확대가 눈에 띈다. 2008년 대비 육상 보호지역 면적은 약 6배 증가하였고, 2020년 기준 국토 면적의 약 16.9%가 보호지역으로 지정되어 있다. 이는 보호지역 면적 지표가 개선 방향의 점수를 받을 수 있는 근거를 제공한다. 다만 산림 조류 종다양성, 수목 종다양성 등 생물다양성 관련 세부 지표는 자료가 아직 충분하지 않아 장·단기 추세를 안정적으로 판단하기 어렵고, 일부 지표는 자료 불충분으로 분류된다.

생태계 기능 측면에서는 순일차생산성을 중심으로 평가하였으며, 산림의 순일차생산성은 2010년 이후 약 17.4% 증가하는 것으로 나타나 생산성이 개선되는 추세를 보인다.

요약하면, 산림생태계의 장·단기 통합 평가는 압력(P) 측면에서는 기후재해와 불법 훼손에 따른 악화, 상태(S) 측면에서는 구조와 기능, 일부 보호지역 지표의 뚜렷한 개선이라는 상반된 특징을 동시에 보여준다. 기후변화와 과이용에 의한 장기 압력 증가에도 불구하고, 임목 축적과 장령림 비율, 보호지역 확대, 생산성 향상 등 관리·정책의 성과가 반영되면서 전반적 상태는 개선 방향으로 평가되는 것이 이 생태계 유형의 핵심 특징이라 할 수 있다.

〈표 II-1-3〉 산림생태계 압력-상태 평가 주요 결과

구분	중분류	지표	단기	장기
압력	토지 전환	산림 토지 전환	→	→
		산림 파편화	→	↑
	기후변화	산불 발생	↓	↓
		산사태 피해	↓	↓
		태풍 발생	→	↓
	오염	산림토양 산성화	-	-
	과이용	불법 산림훼손	↓	↓
	외래종	외래종 및 산림 병충해	-	-
상태	화학적 질	-	-	-
	물리적 질	-	-	-
	생태계 구조	단위면적 당 임목축적	↑	↑
		영급별 면적	↑	↑
		산림 건강성	-	-
	생물적 구성	(산림 조류종 다양성)	-	-
		보호지역 면적	↑	-
		(수목 종다양성)	-	-
	생태계 기능	산림 순일차생산성	↑	-

↓ 악화 → 변화 없음 ↑ 개선 - 자료 불충분

(2) 농경지생태계

농경지생태계는 국토 면적의 약 19.2%를 차지(2020년 기준)하나, 지난 30년간 약 25.8%의 면적이 감소하여 장기적으로 뚜렷한 축소 추세를 보인다. 1990년 약 189만 ha 수준이던 농경지 면적은 2020년에는 약 4분의 1 정도 감소하였으며, 특히 도시화 압력이 큰 지역에서 논이 크게 줄어드는 양상이 두드러진다. 압력(P) 측면에서 볼 때 이러한 토지 전환은 농경지생태계에 대한 가장 직접적인 영향을 미치는 주요 압력 요인으로 볼 수 있다. 세부적으로 보면, 논 면적이 장기적으로 38.8%, 단기적으로 16.3% 감소하여 상대적으로 큰 압력을 받았으며, 밭 면적은 장기 3.0%, 단기 0.2% 감소로 비교적 완만한 감소 추세를 보였다.

기후변화 관련 지표도 악화하는 경향을 보인다. 30년간 연평균 기온은 약 0.32℃ 상승하였고, 하계일수는 16일 증가하였다. 반대로, 농작물 생육에 유리한 유효강우량은 약 12.6% 감소하여, 기온 상승과 강우 패턴 변화가 농업 생산 기반에 부담을 주는 방향으로 작용하고 있다. 이와 같은 추세는 농경지생태계의 장기적인 기후 스트레스가 누적되고 있음을 시사한다.

오염 범주에서는 상반된 양상이 함께 나타난다. 농업용수 수질은 BOD 8 mg/L라는 국내 수질 기준에 비해 2 mg/L 미만 수준으로 유지되며, 장기적으로 개선 경향을 보였으나, 토양 내 질소 축적을 나타내는 양분수지는 OECD 주요 국가들(50~100 kg N/ha)보다 높은 수준을 유지하고 있다. 1990년 214 kg N/ha였던 토양 질소 잉여량은 2020년 230 kg N/ha로 23.7% 증가하였다. 이는 무기질 비료와 농약사용량이 감소 추세에 있음에도 불구하고, 질소 과잉 문제가 여전히 해소되지 않았음을 의미한다.

농약사용량은 1990년 대비 약 36% 감소하였고, 무기질 비료(질소·인 등) 사용량도 감소하여 일부 오염 지표는 개선 방향을 보인다. 그러나 국제 비교에서 우리나라는 여전히 농약사용량이 높은 국가에 속하며, 토양 양분과잉 지표는 악화 또는 변화 없음에 머무르고 있다. 이에 따라 오염 범주 전체의 장·단기 통합 점수는 부분적인 개선과 지속적인 부담이 공존하는 혼합형으로 해석하는 것이 적절하다. 과이용과 외래종 관련 지표는 자료가 제한적이거나 명확한 추세가 확인되지 않아, 일부는 자료 불충분으로 분류된다.

상태(S) 측면에서 생태계 구조를 보면, 주요 작물 구성은 전체적으로 “변화 없음”으로 평가될 정도로 큰 구조적 변동은 관찰되지 않는다. 다만 과실류 재배 면적 비율이 약 5.3%p 증가하는 등 일부 품목 구조 변화는 진행 중이다. 농촌 고령화와 경영 구조 변화의 영향으로 휴경지 비율은 단기적으로 증가 추세를 보인다. 한편, 유기 농지 면적은 2001년 450 ha에서 2020년 38,540 ha로 약 85.6배 증가하여, 친환경·유기농업 관련 정책이 농업 경관의 구조를 바꾸는 방향으로 작동했음을 보여준다. 가축 밀도는 육류 소비 증가에 따라 단기간 약 27.1% 증가하였으며, 이는 토양·수질에 대한 잠재적 압력을 높이는 요인으로 작용한다.

생물적 구성 측면에서는 전국 농지 조류 생물다양성이 일부 조사 기간(2006~2010년, 2019~2023년) 사이에 약 191.2% 증가한 것으로 평가되나, 시계열의 연속성이 부족해 장·단기 전체 추세를 일반화하기는 어렵다. 이에 따라 농지 조류 지표는 “자료 불충분” 또는 “추세 판단 어려움”에 가까운 상태로 보는 것이 적절하다.

종합하면, 농경지생태계의 장·단기 통합 평가는 토지 전환과 기후변화 범주에서 악화, 농업용수 수질과 일부 투입재 사용량에서는 개선, 지하수 수질과 양분수지, 가축 밀도에서는 악화, 경관·생물다양성 지표는 개선과 자료 불충분이 혼재하는 복합적인 모습으로 요약할 수 있다. 전반적으로 농경지 면적 축소와 기후 위협은 장·단기 통합 평가에서 농경지생태계의 압력 점수를 악화 방향으로 견인하는 반면, 유기 농지 확대와 일부 오염 지표 개선은 상태 및 관리 측면의 긍정적 요소로 작용하고 있다.

〈표 II-1-4〉 농경지생태계 압력-상태 평가 주요 결과

구분	중분류	지표	단기	장기
압력	토지 전환	활용농업 면적	↓	↓
		연평균 기온	-	-
	기후변화	유효 강우량	↓	↓
		하계일수	→	↓
		무상기간	↓	↓
		농업용수 수질	↑	-
	오염	양분수지	↓	↓
		무기질 비료 소비	↑	↑
		농약 사용량	↑	↑
		과이용	-	-
	외래종	-	-	
기타	-	-		
상태	물리적 질	-	-	-
	화학적 질	지하수 질소 농도	-	-
	생태계 구조	경관 다양성	→	→
		작물 다양성	→	→
		주요 작물 비율	→	→
		휴경지 비율	→	-
		유기 농지 면적	↑	-
		가축 밀도	↓	-
		표토 유기탄소 함량	-	-
	생물적 구성	농지 조류	-	-
	생태계 기능	일차 생산성	-	-

↓ 악화 → 변화 없음 ↑ 개선 - 자료 불충분

(3) 도시 생태계

도시 생태계는 자연과 인간 활동이 복잡하게 상호작용을 하는 공간으로, 대기 조절, 도시 열섬 완화, 소음 저감 등 각종 조절서비스의 비중이 높다. 2020년 기준 우리나라 도시 생태계는 국토 면적의 약 8.7%를 차지한다.

압력(P) 측면에서, 토지 전환 범주에서는 도시화와 불투수면 확대가 핵심이다. 토지피복도 기준 시가화건조지역(불투수층) 면적은 1990년 2,062 km²에서 2010년 4,138 km², 2020년 5,614 km²로 늘어나, 연평균 서울 면적의 약 1/5에 해당하는 118.4 km²가 추가로 도시로 전환된 셈이다. 도시화율은 2010년 약 91% 수준에 도달한 이후 큰 변화 없이 유지되고 있으나, 장기적으로는 도시 면적의 급격한 확대가 이루어졌기 때문에 토지 전환 범주의 통합 점수는 악화 방향으로 해석하는 것이 타당하다.

기후변화 범주에서는 폭염·열대야, 가뭄, 자연재해 피해 지표가 중요하다. 30년 장기 추세에서 폭염 일수와 열대야 일수는 전체적으로 감소(폭염 일수 44% 감소, 열대야 일수 0.2% 감소) 경향을 보이며, 최근 10년 단기 평가에서도 극한 기상현상과 가뭄 일수는 전국 평균 기준으로 감소하는 방향을 보여 단기 점수는 '개선(1)'으로 분류되었다. 다만 개별 지자체 수준에서는 11개 지자체에서 열대야가 증가하는 등 지역별 편차가 크고,

1990년대에는 전남, 2000년대에는 전북, 2010년대 이후에는 서울과 경기에서 가뭄일수가 가장 길게 나타나는 등 시기와 지역을 달리하며 가뭄 취약지역이 이동하는 양상을 보인다. 태풍과 집중호우의 직접 영향은 제주와 부산 등 해안 지역에서 자연재해 피해액 증가로 나타나, 자연재해 피해 지표는 장·단기 모두 '악화(-1)'로 평가되었다.

오염 범주에서는 대기오염과 폐기물·폐수 배출이 주요 지표이다. 국내 대기오염 배출량은 관측이 시작된 1999년 333.55만 톤에서 2020년 351.7만 톤으로 약 6.4% 증가하여 장기적으로는 뚜렷한 감소가 나타나지 않았고, 최근 10년 단기 평가는 '변화 없음(0)' 수준으로 분류되었다. 반면 하수처리시설 확충의 영향으로 폐수 발생량은 최근 10년간 감소하는 경향을 보여 단기 점수가 '개선(1)'으로 평가되었다. 생활·산업활동에서 발생하는 폐기물은 일부 지역에서 증가하여 단기 점수가 '악화(-1)'로 나타났고, 온실가스 배출 역시 장·단기 모두 증가 추세를 보여 도시 오염·에너지 구조와 결부된 부담 요인으로 평가된다. 이처럼 도시의 오염 관련 지표는 폐수는 개선되는 한편, 폐기물과 온실가스 배출은 악화하는 혼합형 양상을 보인다.

과이용 범주에서는 도시 인구 변화가 대표적 지표다. 인구는 1992년 4,450만 명에서 2020년 5,182만 명으로 16.5% 증가한 뒤, 2019년을 정점으로 감소 추세로 전환되었다. 인구 증가 시기 동안 도시 생태계에 대한 이용 압력은 지속적으로 증가했으며, 인구 정체·감소와 함께 이용 패턴이 변화하는 국면에 진입한 것으로 볼 수 있다. 온실가스 배출은 특히 충남(장기 633.9% 증가), 충북(단기 54.1% 증가)에서 증가율이 높아, 도시화와 산업 구조가 온실가스 배출 압력을 키운 지역적 사례로 제시된다.

상태(S) 측면에서, 도시 생태계는 환경질과 인프라 측면에서 일부 개선, 건강·취약성 측면에서 악화라는 이중적인 모습을 보인다. 대기질 농도는 전반적으로 감소 경향을 보이지만, 미세먼지와 초미세먼지 농도의 지역 간 편차는 여전히 크다(예: 미세먼지는 강원·인천·경북·경기 순, 초미세먼지는 충남·전북·충북·경기 순으로 높음). 하수도 보급률은 1998년 대비 2020년 약 28.6% 상승하였고, 1980년대 후반 이후 물관리 종합대책, 4대강 물관리 종합대책 등의 시행과 함께 하수처리시설이 크게 확충되었다.

그러나 호흡기질환 사망자 수는 1990년 이후 30년간 363% 증가하여, 대기질 개선에도 불구하고 건강 부담이 크게 누적된 것으로 나타난다(1990년 7,849명 → 2020년 36,368명). 이는 상태 지표 중 건강 관련 지표가 악화 방향의 통합 점수를 받을 수 있음을 시사한다.

도시 생태계 구조 측면에서는 도시 면적과 비도시 면적의 분포 차이가 뚜렷하며, 녹지 접근성 지표가 주목된다. 10 ha 이상 녹지에 도보 15분(1 km) 이내 도달할 수 있는 인구 비율은 전국 평균 65.7% 수준으로 평가되며, 도시 내 녹지와 그린인프라가 일정 수준 확보되어 있음을 보여준다. 다만 녹지의 공간적 분포와 연결성은 지역별 편차가 크고, 개발 압력이 높은 지역일수록 생태계서비스의 혜택을 균등하게 누리기 어렵다는 한계가 존재한다.

기타 지표로는 총예산 대비 환경 분야 예산 비율이 전국적으로 0.1~0.5% 수준에 머무는 점이 제시된다. 이러한 재정 구조는 도시 생태계의 상태 개선과 관리에 투입되는 자원이 상대적으로 제한적임을 시사하며, 장·단기 통합 평가에서 환경·자연환경 관련 지표가 "자료 불충분 또는 제한적 개선" 수준으로 해석될 여지를 남긴다.

요약하면, 도시 생태계는 지난 30년간 급속한 도시화와 불투수 면적 확대에 따라 토지 전환 지표가 장·단기 모두 '악화(-1)'로 평가되었고, 인구 증가와 온실가스 배출, 폐기물 발생량도 장기적으로 도시 생태계에 대한 압력을 높여 온 유형이다. 반면, 극한 기상현상(폭염 등)과 가뭄일수, 폐수 발생량은 최근 10년간 감소하는 경향을 보여 단기 평가에서는 '개선(1)'으로 분류되는 등 기후·오염 지표 안에서도 개선과 악화가 혼재한다. 상태(S) 측면에서는 하수도 보급률과 수목 건강성, 일부 대기질 농도가 개선 방향을 보이지만, 호흡기질환 사망자 수는 장·단기 모두 증가하여 건강 부담이 심화하였고, 녹지 접근성과 도시 구조 지표는 지역별 격차가 크다. 따라서 장·단기 통합 평가에서 도시 생태계는 토지 전환과 온실가스·폐기물 배출, 건강 측면의 부담이 여전히 크지만, 극한 기상·가뭄·폐수 감소와 인프라 개선이 병행되고 있는 혼합형 상태로 정리할 수 있다.

〈표 II-1-5〉 도시 생태계 압력-상태 평가 주요 결과

구분	중분류	지표	단기	장기
압력	토지 전환	불투수 면적	↓	↓
		도시화율	→	↓
	기후변화	극한 기상현상	↑	↑
		가뭄일 수	↑	↓
		자연재해 피해	↓	↓
	오염	대기오염 배출	→	-
		폐기물 발생량	↓	-
		폐수 발생량	↑	-
	과이용	인구 변화	→	↓
	외래종	-	-	-
	기타	온실가스 배출	↓	↓
상태	물리적 질	하수도 보급	→	-
		수목 건강성	↑	↑
	화학적 질	호흡기질환 사망자 수	↓	↓
		대기질 농도	↑	-
	생태계 구조	도시 구조 변화	→	-
		녹지 접근성	-	-
		녹지 연결성	-	-
	생물적 구성	(도시 조류 다양성)	-	-
	생태계 기능	-	-	-
	기타	자연환경 분야 예산	-	-

↓ 악화 → 변화 없음 ↑ 개선 - 자료 불충분

(4) 담수생태계

담수생태계는 생물다양성 보전, 수질 정화, 식수 및 농업용수 제공 등 지구 생태계의 균형 유지에 필수적인 역할을 수행하는 유형이다. 우리나라 담수생태계는 국토 면적의 약 2.0%를 차지하며, 지난 30년간 34.4% 증가하였다(1990년 1,524.9 km² → 2020년 2,049.7 km²). 이는 댐·저수지 조성 및 방조제 건설 등 인공 수체 확대가 주요 원인으로 작용한 결과로 해석된다.

압력(P) 측면에서, 토지 전환 범주는 내륙수(하천·호소) 면적 증가라는 특수한 양상을 보인다. 기후에너지환경부 토지피복도 기준 내륙수 면적은 1990년 대비 34.4% 증가하였으며, 방조제 건설 등으로 해양수가 내륙수로

전환되면서 전체 수역(내륙수+해양수) 면적도 약 2% 증가하였다. 면적 자체는 증가하였지만, 이는 자연 하천·호소의 확장이라기보다 인공 구조물에 의한 수체 변화이기 때문에, 생태계 관점에서 토지 전환 범주의 통합 점수는 기능·건강 상태를 함께 고려해 해석할 필요가 있다.

기후변화 범주에서는 호우·극한 호우 지표가 핵심이다. 2012~2020년 단기 동안 호우일수는 약 18.7% 증가하였고, 1990~2020년 장기 기준으로는 극한 호우 발생 횟수가 약 350% 증가하였다. 이는 집중호우·홍수 위험이 많이 늘어나 담수생태계에 부정적 영향을 미치는 방향으로 작용하고 있음을 보여준다.

오염 범주에서는 BOD·TP 배출 부하가 주요 지표이다. 2016~2020년 5년간 오염물질 배출 부하량은 생활계·산업계에서 감소 추세를 보였으나, 축산계 오염은 증가하고 있다. 이는 가축분뇨 및 축산 관련 배출이 여전히 담수 오염의 중요한 원인임을 시사한다.

과이용 범주의 대표 지표인 내수면 어업 생산량(양식어업 제외)은 1990년 대비 약 55.7% 감소하여, 담수 생물종에 대한 직접적인 이용 압력이 장기적으로 감소한 것으로 평가된다. 이는 과이용 범주의 장·단기 통합 점수에 있어 개선 요인으로 작용한다. 용수 이용량은 1990년 대비 약 23.6% 감소하였고, 2010년 대비 지하수 이용량은 약 21.7% 감소하여, 수자원 이용 측면에서도 압력이 다소 완화된 것으로 나타난다. 반면, 외래 어류 종 수는 2010~2020년 사이 5종에서 8종으로 증가하여 외래종 범주의 압력은 악화하는 양상을 보인다.

상태(S) 측면에서 담수생태계는 수질·저수량·호소 건강성·생물다양성이 서로 다른 방향으로 변화하는 복합적인 유형이다. 화학적 질에서는 하천과 호소 수질의 개선이 두드러진다. 1990년 대비 하천 BOD 농도는 약 47.9%, TP 농도는 약 31.5% 감소하였다. 호소에서는 TP 농도가 장기 36.9%, 단기 31.5% 감소하였고, 2010~2020년 10년간 목표 수질 달성률은 약 41.9% 증가하였다.

물리적 질에서는 하천·호소 저수량의 변화가 중요하다. 하천 저수량은 2010~2020년 10년간 약 19.3% 감소하여, 하천의 수량 측면에서 취약성이 증가하는 양상을 보인다. 반면 호소 저수량은 1990년 대비 다목적 댐에서 약 38.7%, 용수댐에서 약 87.5% 증가하는 등, 인공 저장용량은 확대되었다. 이는 유량 조절과 물 공급 측면에서는 긍정적이지만, 하류·하폭 생태계에 대한 영향, 하천 연결성 저해 등과 연계해 평가해야 하는 지점이다.

생태계 구조 측면에서는 호소 부영양상태 지표가 대표적이다. 최근 10년간(2010~2020년) 호소 건강성은 전반적으로 악화하여, 빈영양 상태 등급 비율이 약 6.1% 감소하였다. 이는 호소의 영양상태가 부영양화 방향으로 이동하고 있음을 시사한다.

생물다양성 측면에서, 어류 종다양도는 2010~2020년 사이 약 0.6% 감소하였고, 하천 생태 건강도(수변 식생, 어류, 부착돌말, 저서동물)는 분류군별로 상반된 변화를 보인다. 예를 들어 수변 식생과 어류는 단기적으로 큰 변화 없이 유지 또는 소폭 개선되지만, 부착돌말은 약 6.4% 개선, 저서동물은 약 5.1% 악화되는 등, 생물군별로 상이한 경향을 보인다. 이러한 결과는 생물다양성 범주에서 개선·악화·유지 지표가 혼재하고 있는 것으로 나타났다.

종합하면, 담수생태계의 장·단기 통합 평가는 기후·극한 호우 압력과 호소 부영양화, 일부 생물다양성

지표의 악화, 수질 지표와 저수량·용수이용·내수면 어업생산 감소에 따른 일부 개선, 외래종 증가와 하천 저수량 감소에 따른 새로운 부담이 함께 나타나는 유형으로 요약할 수 있다. 전반적으로 담수 수질은 장기적으로 크게 개선되었으나, 홍수·극한 호우, 호소 건강성, 하천 수량 감소, 외래종과 같은 지표는 장·단기 통합 평가에서 담수생태계의 취약성을 드러내는 요인으로 작용한다.

〈표 II-1-6〉 담수생태계 압력-상태 평가 주요 결과

구분	중분류	지표	단기	장기
압력	토지 전환	하천·호소 토지 전환	-	↑
	기후변화	극한 호우 발생 횟수	↓	↓
	오염	BOD 배출 부하	-	-
		TP 배출 부하	-	-
		오폐수 배출	→	-
		가축분뇨 처리	→	-
	과이용	내수면 어업 생산	↑	↑
		용수 이용	↑	↑
		지하수 이용	↑	-
	외래생물	침입 외래종(어류)	↓	-
상태	화학적 질	하천 수질	→	↑
		호소 수질	↑	↑
		하천 목표 수질 달성도	→	-
		호소 목표 수질 달성도	↑	-
	물리적 질	하천 저수량	↓	-
		호소 저수량	↑	↑
		서식 수변 건강도	→	-
		하천 연결성	→	-
	생물적 구조	호소 부영양상태	↓	-
	생물적 구성	어류 종다양도	→	-
		하천 생태 건강도	→	-

↓ 악화 → 변화 없음 ↑ 개선 - 자료 불충분

(5) 습지생태계

습지 생태계는 풍부한 생물다양성과 탄소 저장, 수질 조절 등 다양한 기능을 수행하는 유형으로, 생태계서비스 측면에서 중요한 위치를 차지한다. 우리나라의 내륙습지는 국가 습지 인벤토리 기준 2020년 총 2,323개소, 면적 727.5 km²(국토의 약 0.7%)로 집계되며, 최근 인벤토리 구축과 보호지역 지정이 확대되는 중이다.

압력(P) 측면에서, 토지 전환 지표는 수변 식생을 중심으로 한 내륙습지 면적의 변화를 보여준다. 기후에너지환경부 토지피복도 기준 내륙습지(수변 식생) 면적은 2000년 대비 약 126.4% 증가하여, 2000년 574.5 km²에서 2020년 1,300.9 km²로 늘어났다. 이는 습지 인벤토리 구축 및 식생 구분의 정교화, 일부 복원 및 신규 습지 형성 등의 결과로 해석된다.

기후변화 범주에서는 강수량·강우일수·물 수지 지표가 핵심이다. 최근 10년간 강수량은 약 8.1% 증가하였으나, 강우일수는 약 16.5% 감소하였다. 즉, 비가 오는 날 수는 줄어든 반면 한 번에 내리는 양은 많아지는 방향으로

변화하여, 강수의 집중도가 높아지고 있다. 물 수지(유출량)는 최근 10년간 약 34.5% 증가하여, 단기간 집중호우와 유출 증가에 따른 습지 건조화 및 수문 체계 교란 가능성을 시사한다.

오염 범주에서는 생활·축산·산업계 오염원과 BOD·TP 배출 부하, 토지계 TN 배출 부하가 주요 지표이다. 2012~2020년 단기 동안 생활계 오염원은 하수처리율 6.8% 증가와 함께 개선 경향을 보였으나, 축산계에서는 가축 사육두수가 약 7.1% 증가하고 가축분뇨 처리는 큰 변화가 없어 오히려 부담이 커졌다. 산업계에서도 폐수 배출량이 12.3% 증가하여, 산업계 오염이 악화된 것으로 평가된다.

2016~2020년 5년간 BOD·TP 배출 부하는 생활계에서 하수 처리율 증가의 영향으로 감소하였으나, 축산·산업계에서 증가 추세를 보였다. 토지계 TN 배출 부하는 같은 기간 약 0.2% 감소하여 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

외래종 범주에서 생태계교란 생물 지표는 습지 생물다양성 악화의 주요 원인으로 볼 수 있다. 최근 10년간 생태계 교란 식물 평균 종 수는 약 72.4% 증가(1.70종 → 2.93종)하여, 습지에 정착·확산하는 교란 식물의 영향이 확대되고 있음을 보여준다.

상태(S) 측면에서, 습지생태계는 일부 물리적 질과 보호지역 지정은 개선, 종 수·종다양도 등 생물다양성 지표는 악화라는 상반된 모습을 보인다.

물리적 질에서는 지하수위 지표가 사용되었으며, 2011~2020년 단기 동안 일부 지역에서만 평가가 됐다. 평가 대상 지역 중 강원·전북·경남·제주에서는 지하수위가 개선됐지만, 전남에서는 악화 추세였다. 평가 지역이 제한적이라는 한계에도 불구하고, 습지 지하수위가 지역에 따라 상반된 양상을 보인다는 점은 습지 보전 및 관리 전략 수립 시 지역별 수문 특성을 세밀하게 반영할 필요가 있음을 시사한다.

생태계 구조에서는 내륙습지 연결성이 대표 지표이다. 2020년 기준 경기·전북·인천 순으로 연결성이 높은 것으로 나타났으며, 이는 특정 지역에서 습지 간 네트워크가 비교적 잘 유지되고 있음을 의미한다. 다만 전국 수준에서의 장·단기 추세를 정량적으로 제시할 만큼 자료가 충분하지 않았다.

생물다양성 측면에서는 종 수(식물·조류), 종다양도 지수(조류), 계통 다양도 지수(어류), 멸종위기야생생물(조류), 습지보호지역 지표가 함께 고려된다. 최근 5년간(2016~2020년) 식물·조류 종 수는 감소하였고, 2018~2020년 3년간 조류 종다양도 지수 역시 감소하였다. 어류 계통적 거리(계통 다양도 지수)는 최근 5년간 감소하여, 종 구성의 계통학적 폭이 줄어드는 방향으로 변화하고 있다. 반면, 최근 10년간 전국 습지에서 확인된 멸종위기 조류종 수는 약 39.5% 증가(2.91종 → 4.06종)하였고, 국제 습지보호지역(람사르 습지) 등록률¹⁾은 52.5%, 국내 습지보호지역 지정률은 14.9% 증가하였다. 이러한 결과는 종 수·종다양도·계통 다양도 지표는 악화, 멸종위기종 출현과 보호지역 지정은 개선이라는 상반된 변화를 동시에 보여준다.

종합하면, 습지생태계의 장·단기 통합 평가는 기후·물 수지 변화와 교란 생물 증가에 따른 압력 악화, 일부 오염원 관리와 습지 인벤토리·보호지역 확대에 따른 구조·관리 측면의 개선, 종 수·종다양도 감소와 멸종위기종·보호지역 지표의 엇갈린 변화가 동시에 관찰되는 유형이다. 전반적으로 볼 때, 압력 지표는 기후·외래종·축산·산업계 오염에서 악화, 상태 지표는 보호지역·연결성·지하수위 일부에서 개선, 종다양도와 계통 다양도에서 악화라는 복합적인

1) 2020년 누적 면적을 기준으로, 최근 10년간 증가한 면적의 비율: (증가면적/누적면적)*100(%)

결과로 요약할 수 있다.

〈표 II-1-7〉 습지생태계 압력-상태 평가 주요 결과

구분	중분류	지표	단기	장기
압력	토지 전환	내륙습지 피복 전환	↑	-
	기후변화	강수량	↑	-
		강우일수	↓	-
		물 수지	↓	-
	오염	하수처리	↑	-
		가축 사육두수	↓	-
		가축분뇨 처리	→	-
		폐수 배출	↓	-
		BOD 배출 부하	-	-
		TP 배출 부하	-	-
		토지계 TN 배출 부하	-	-
	과이용	-	-	-
	외래종	생태계교란 생물	↓	-
상태	화학적 질	-	-	-
	물리적 질	지하수위	-	-
	생태계 구조	내륙습지 연결성	-	-
	생물적 구성	종 수(식물, 조류)	-	-
		종다양도 지수(조류)	-	-
		계통 다양도 지수(어류)	-	-
		멸종위기야생생물(조류)	↑	-
습지보호지역		↑	-	
생태계 기능	-	-	-	

↓ 악화 → 변화 없음 ↑ 개선 - 자료 불충분

(6) 통합평가

통합평가 결과, 다섯 생태계 유형 전반에서 압력은 대체로 기후변화와 토지이용 변화에서 악화, 상태는 특정 생태계에서 선택적으로 개선되는 양상이 확인되었다. 기후변화 압력은 산림과 농경지에서 단·장기 모두 매우 악화(산림 단기 -2점/ 장기 -3점, 농경지 단기 -2점/ 장기 -3점)로 평가되어, 장기간에 걸친 기온 상승과 극한기상 증가가 이 두 생태계에 가장 큰 부담으로 누적되고 있음을 보여준다. 담수와 습지 역시 기후 관련 점수가 단·장기 모두 -1점으로 악화하였으며, 도시도 장기적으로는 -1점으로 평가되어, 도시 단기의 부분 개선(1점)을 고려하더라도 기후변화가 거의 모든 생태계에서 공통된 압력 요인으로 작용하고 있음을 시사한다. 토지 전환 측면에서는 농경지(단기 -1점/장기 -1점)와 도시(단기 -1점/장기 -2점)가 단·장기 모두 악화 또는 매우 악화로 평가되어, 농경지 감소와 도시 확장이 구조적인 토지이용 압력으로 계속되고 있지만, 산림(단기 0점/장기 1점), 담수(장기 1점), 습지(단기 1점)는 유지 또는 개선으로 나타나 생태계 유형 간 차이를 보였다.

상태 지표에서는 산림·담수·습지를 중심으로 개선 또는 매우 개선되는 영역이 분명하게 나타난다. 산림은 생태계 구조(단기 2/장기 2), 생물적 구성(단기 1점), 생태계 기능(단기 1점)에서 일관된 개선 내지 매우 개선을 보여, 장령림 확대와 임목 축적·생산성 증가, 보호지역 확충 등이 구조·기능·생물다양성 전반의 회복으로 이어지고 있음을 확인할 수 있다. 담수생태계는 화학적 질에서 단·장기 모두 2점으로 매우 개선, 물리적 질에서도 장기 1점으로 개선을 보여, 수질 및 수문환경 관리의 성과가 뚜렷하게 반영된 유형이다. 습지는 생물적 구성에서 단기 2점으로 매우 개선으로 평가되어, 멸종위기종 출현 증가와 습지보호지역 지정 확대 등 보전 정책의 효과가 통합지표 수준에서도 나타난 것으로 해석할 수 있다. 반면 농경지는 화학적 질(단기 -1점)에서 악화되어 토양·지하수 오염 부담이 지속되고 있으며, 담수·습지는 외래종(-1점)과 구조(-1점) 등 일부 상태 지표에서 악화가 확인되어, 상태 개선과 악화가 생태계별·범주별로 혼재하고 있는 것이 전체적인 특징이다.

특히 “매우 악화”로 분류된 항목은 산림·농경지의 기후변화 압력과 도시의 장기 토지 전환에 집중되어 있다. 산림과 농경지의 기후변화 점수가 각각 단기 -2점/장기 -3점, 단기 -3점/장기 -2점으로 평가된 것은, 다른 압력 범주보다도 기후 스트레스가 장·단기 모두에서 지배적인 악화 요인이라는 점을 분명히 보여준다. 도시의 토지 전환은 장기 -2점으로, 지난 30년간 도시 면적과 불투수면이 크게 확대되면서 토지 전환 압력이 매우 악화된 범주로 자리 잡았음을 의미한다. 이 세 가지 항목은 통합평가에서 나타난 가장 심각한 악화 요인으로, 후속 정책 논의에서 우선적인 대응이 필요한 영역으로 해석될 수 있다.

반대로 “매우 개선”으로 나타난 항목은 산림의 구조, 농경지의 오염(단기), 담수의 과이용·화학적 질, 습지의 생물적 구성으로, 이는 그동안의 보호·관리 정책이 비교적 뚜렷한 성과를 낸 영역이라 할 수 있다. 산림의 생태계 구조는 단·장기 모두 2점으로, 연령·종 구성 측면의 질적 향상이 일관되게 진행됐음을 보여준다. 농경지는 오염 범주에서 단기 2점으로 평가되어, 최근 10년간 농업용수 수질 개선과 비료·농약 사용량 감소가 통합지표에서도 매우 개선으로 나타났다. 담수생태계는 과이용에서 단·장기 3점과 2점을 기록하며, 용수 이용과 내수면 어업 생산의 감소를 통해 이용 압력이 크게 완화된 유형으로 나타났고, 화학적 질 역시 단·장기 모두 2점으로 수질 관리의 성과가 두드러진다. 습지는 생물적 구성에서 단기 2점으로, 보전 대상종과 보호지역 확대를 중심으로 한 생물다양성 관리가 통합적으로 긍정적 효과를 보인 사례로 해석된다.

요약하면, 통합평가 결과는 기후변화와 도시·농경지의 토지 전환이 대부분의 생태계에서 공통적인 악화 요인으로

작용하는 한편, 산림·담수·습지에서 구조·수질·생물다양성 측면의 개선이 두드러지고, 일부 범주에서 “매우 개선” 수준의 성과가 나타나고 있음을 보여준다. 동시에, 같은 생태계 안에서도 압력은 악화하지만, 상태는 개선되는 등 상반된 흐름이 존재하여, 향후 정책 대응에서는 악화된 압력을 줄이는 방향의 관리와 함께 이미 개선되고 있는 상태 요소를 유지·강화하는 전략을 병행해야 함을 시사한다.

〈표 II-1-8〉 생태계 평가 통합 결과

구분	산림		농경지		도시		담수		습지		
	단기	장기	단기	장기	단기	장기	단기	장기	단기	장기	
압력	토지 전환	→	↑	↓	↓	↓	↘	-	↑	↑	-
	기후변화	↘	↘	↘	↘	↑	↓	↓	↓	↓	-
	오염	-	-	↗	↗	→	-	→	-	↓	-
	과이용	↓	↓	-	-	→	↓	↗	↗	-	-
	외래종	-	-	-	-	-	-	↓	-	↓	-
상태	화학적 질	-	-	-	-	→	↓	↗	↗	-	-
	물리적 질	-	-	-	-	↑	↑	→	↑	-	-
	생태계 구조	↗	↗	→	→	→	-	↓	-	-	-
	생물적 구성	↑	-	-	-	-	-	→	-	↗	-
	생태계 기능	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2) 생태계 유형별 장단기 평가 결과와 정책 연계 방향

가) 산림생태계 관련 주요 정책 및 연계 방향

산림생태계 평가는 지난 30년 동안 우리나라 산림이 면적은 약 2.5% 감소했지만, 임목축적과 장령림 비율, 순일차생산성, 보호지역 면적은 심하게 증가해 구조·기능 측면의 상태는 개선됐지만, 산불·산사태·태풍과 불법 훼손 등 압력은 뚜렷이 악화하고 있음을 보여준다. 즉, 기후재해와 과이용에 따른 압력 증가는 산림면적 감소와 결합해 위험을 키우는 요인이지만, 산림의 성숙화와 생산성 향상, 보호지역 확대는 탄소흡수와 서식지 제공 기능을 강화하는 긍정적 변화로 작동하고 있다.

이에 대응해 제5차 국가생물다양성전략, 지속가능발전기본계획, 산림기본계획, 자연환경·환경종합계획, 기후변화적응대책, 탄소흡수원종합계획 등 주요 국가계획은 통합 공간계획과 생태축·그린인프라 구축, 국토환경성평가지도 고도화, 산지구분체계 개편과 산림공익보전권 도입을 통해 산림 전용과 파편화를 줄이고, 산불·산사태 예측·예방·복구 및 태풍 취약지역 관리 강화를 통해 증가하는 재해 압력을 완화하는 방향을 제시한다. 동시에 산림유전자원보호구역과 핵심 생태축, 멸종위기종 서식지, 훼손지 복원 사업, IUCN 녹색목록 등 국제 인증 확대를 통해 보호지역의 질과 양을 함께 높여, 이미 관측된 임목축적 증가와 장령림 확대, 보호지역 면적 증가 추세를 뒷받침하는 정책 기반을 제공하고 있다.

다만 이러한 정책과 관리 성과가 누가, 어디에서, 어떻게 혜택을 누리는지에 대한 사회적 분포까지 충분히 설명해 주지는 못한다는 점에서, 재해 취약 산촌과 도시·농촌 저소득층, 다음 세대가 산림의 재해 완충, 깨끗한

물, 휴양·교육 등 생태계서비스를 공평하게 이용할 수 있도록 설계·집행하는 것이 향후 과제다(IPBES, 2019; IPBES, 2022; Loos et al., 2023; Liu et al., 2024; Vickery & Quinn, 2024). 산불·산사태 예방사업과 복원 사업, 보호지역 확대 과정에서 취약계층과 지역 주민 참여를 제도화하고, 생활권 도시숲과 녹지의 공간적 불균형을 완화하며, 세대 간 형평성을 고려한 탄소흡수원 관리 전략을 강화하기 위한 노력이 필요하다(김용국, 2014; 고영주 외, 2019; UN, 2015; UNDRR, 2020).

〈표 II-1-9〉 산림생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책

구분	지표명	주요 정책	정책 주요내용	
압력	토지 전환	산림 토지 전환	a, b, c, d, e, f, g, h	<ul style="list-style-type: none"> 자연생태계·산림면적과 연결성을 유지·확대하기 위해 통합 공간계획, 생태계 적색목록(RLE), 생태축·그린인프라, 국토환경성평가지도고도화 등을 추진 백두대간-DMZ-5대강 등 국가생태축복원과 산지구분체계 개편 산림공익보전권 등으로 산림 전용을 억제하고 복원을 확대
		산림 파편화		
	기후 변화	산불 발생	c, d, e, j, l	
산사태 피해				
태풍발생				
상태	생태계 구조	산림건강성	a, b, d, e, g, h, j, k, l, m	<ul style="list-style-type: none"> 산림유전자원보호구역, 핵심 생태축, 멸종위기종 서식지를 현내내 보호구역으로 확대 지정·유형별 훼손지식별·우선순위 선정, 자생종기반 복원 및 종자공급체계 구축 등으로 산림생물다양성의 지속적 관리·복원 효과 극대화·IUCN 녹색목록 등 국제 인증을 통한 보호지역 관리 고도화·산림탄소흡수원증진 종합계획과 연계한 흡수원관리·복원 프로그램을 통해 자연자본으로서 산림의 가치와 지속가능한 이용 기반을 강화
	생물적 구성	보호지역 면적		

a. 제5차 국가생물다양성전략; b. 제4차 지속가능발전기본계획; c. 탄소중립·녹색성장 국가전략; d. 제6차 산림기본계획; e. 제4차 산림생물다양성기본계획; f. 제2차 산지관리기본계획; g. 제3차 자연환경보전 기본계획; h. 제5차 국가환경종합계획; i. 제3차 국가기후변화적응대책; j. 제3차 탄소흡수원증진종합계획; k. 제3차 산림유전자원보호구역관리기본계획; l. 제4차 야생생물보호기본계획; m. 멸종위기야생생물보전종합계획

나) 농경지생태계 관련 주요 정책 및 연계 방향

농경지생태계는 농지 축소와 기후 스트레스, 양분과잉 등으로 압력이 커지는 한편, 농지 보전·기후적응형 작부체계, 양분·물환경 관리, 친환경·유기농업과 경관보전직불제 등 정책을 통해 수질과 유기탄소, 경관·작물다양성이 일부 개선되는 혼합적 상태로 평가된다.

활용농업면적·기후·양분·오염·표토 유기탄소·경관·작물다양성 지표와 연계된 주요 농업·환경계획은, 국토·환경계획과 연동한 농지 보전목표, 농지은행·직불제·농지대장 정비를 통해 개발 압력을 관리하고, 기후변화 적응형 작부체계와 토양·양분·수질 통합관리, 비점오염 저감 대책을 통해 기후·오염 압력을 줄이는 방향을 제시한다. 동시에 친환경·유기농업 육성, 경관보전직불제와 농업환경보전 프로그램, 지역 고유 품종과 농업경관 관리 정책은 표토 유기탄소와 토양 건강성을 유지·증진하면서 농경지 경관과 작물·서식처 다양성, 농촌 주민 삶의 질을 함께 높이려는 전략으로 자리 잡고 있다.

사회적 측면에서 농경지생태계는 국가 식량안보의 기반이자 소규모·가족·고령·여성농이 밀집한 생계 공간으로, 이들이 정책 설계·집행에서 배제되지 않도록 하는 것이 핵심 과제다. 가족농·여성농은 기후위기와 빈곤·식량불안에 취약하며, 국내 공익직불제도 소규모·고령·여성농 지원 확대라는 숙제가 남아 있다는 분석이 제기된다(FAO, 2013; FAO, 2020; 김종인, 2023). 따라서 농지 보전, 기후적응형 작부체계, 토양·양분·수질 관리, 친환경·경관 직불에서 이들에 대한 지원과 참여를 강화할 필요가 있다(Loos et al., 2023).

〈표 II-1-10〉 농경지생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책

구분	지표명	주요 정책	정책 주요내용	
압력	토지 전환	활용농업면적	a, b, c, d, e, f	• 국토·환경계획과 연계하여 농지 보전목표와 토지피복유지, 농업 직불제·농지은행·농지대장 정비 등을 통해 농지 이용 효율과 농가 소득을 동시에 고려하는 방향으로 농지 이용 관리를 강화
	기후변화	연평균기온	f, g, h, i	• 기후변화에 대응해 기후적응형 작부체계·토양관리·유기자원 관리 기술, 농업용수 수질·양분유출 시나리오 평가, 취약농경지유형별 관리 등을 추진 • 친환경농업·생태기반 농업기술을 통한 탄소저감과 회복력 강화
		유효강우량		
		하계일수		
		무상기간		
	오염	양분수지	g, j, k, l, m	• 유역단위 양분유출·농업용수 수질의 장기 모니터링과 취약성 평가, 농업용 호소 수질측정망과 인공습지·침강지조성을 통한 수질개선 • 토양침식·양분과잉에 대한 관리, 비점오염원 저감대책 등으로 농업발 오염을 통합관리
		무기질 비료 소비		
농업용수 수질				
	농약 사용량			
상태	생태계 구조	표토 유기탄소 함량	a, b, d, f, g, l, m, o	• 개발사업 표토보전·재이용 지침, 표토침식 모니터링 체계, 토양검정 기반 비료사용처방, 양분수지 DB 구축 및 순환재배·유기 자원 활용 기술 등을 통해 토양유기탄소와 토양 건강성을 유지·증진
		경관 다양성		
		주요 작물 비율		
		작물다양성		
		휴경지 비율		
		유기농지 면적		

a. 제5차 국가생물다양성전략; b. 제4차 지속가능발전기본계획; c. 제5차 농어업인 삶의 질 향상 및 농어촌 지역개발 기본계획; d. 농업·농촌 및 식품산업 발전계획; e. 중장기 식량안보 강화방안; f. 제5차 친환경농업 육성 5개년계획; g. 제3차 국가기후변화 적응대책; h. 탄소중립·녹색성장 국가전략; i. 제4차 농림식품과학기술 육성 종합계획; j. 제3차 강우유출 비점오염원관리종합 대책; k. 제1차 국가물관리기본계획; l. 제2차 물환경관리 기본계획; m. 제2차 토양보전기본계획; n. 제4차 농림식품과학기술 육성 종합계획; o. 제3차 농촌진흥사업 기본계획

다) 도시 생태계 관련 주요 정책 및 연계 방향

도시 생태계는 최근 수십 년간 가장 빠르게 팽창한 유형으로, 시가화와 불투수면 확대에 따라 토지 전환 압력이 커지고 열섬·물순환 교란·홍수·침수 위험이 증가한 것으로 평가된다. 극한 기상과 기후 재해, 대기오염·폐기물·온실가스 배출, 인구 변화로 일부 기후·수질 지표는 개선되었지만, 재해 피해와 건강 부담, 오염·에너지 구조의 압력은 여전히 높다. 도시숲, 공원 등 녹지는 일정 수준 확보되었으나, 지역 간 접근성 격차와 녹지의 공간적 불균형이 남아 있는 것이 도시 생태계의 특징이다.

이에 대응해 주요 국가 계획은 불투수면적과 극한 기상, 대기오염·폐기물, 인구 변화 등 도시 생태계 압력을 통합적으로 줄이는 방향을 제시한다. 기후변화·물관리·비점오염 계획은 불투수면적 관리와 저영향개발(LID), 빗물 분산·저류, 물환경 개선을 통해 기후·홍수·수질 부담을 낮추고, 기후·지속가능발전·생물다양성·환경종합계획은 자연기반해법과 법·제도 통합 관리를 통해 기후·대기·물 부담을 동시에 줄이는 체계를 지향한다. 대기환경·자원순환·정원·수도권·미세먼지 계획은 대기오염총량제, HAPs·비배기 배출 관리, 도시숲·정원 확충, 폐기물 감량과 순환경제·EPR을 결합해 대기오염·폐기물·폐수 부담을 함께 관리하며, 도시·자연환경·고령사회 계획은 도시숲·정원·그린웨이와 생활권 공원, 3-30-30 규칙 등을 통해 녹지 네트워크와 그늘·바람·물 접근성을 높이는 것을 핵심 전략으로 삼는다.

사회적 측면에서 도시 생태계는 저소득층·고령자·아동 등이 열섬·대기오염·홍수 위험에는 많이 노출되고, 공원·그늘·물·바람의 혜택에서는 상대적으로 소외되기 쉽다(IPCC, 2022). 연구들은 도시 녹지·공원 접근성이

계층·소득·거주지에 따라 불평등하게 분포하며, 이러한 격차가 환경정의 쟁점임을 보여준다(Wolch et al., 2014). 따라서 불투수면적 관리와 도시숲·공원 확충, 대기오염·열 부담 저감 정책 수립 시 취약계층을 고려한 입지·접근성 기준을 두고, 환경 부담과 편익의 공간 분포를 정기적으로 점검하는 것이 필요하다.

〈표 II-1-11〉 도시 생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책

구분	지표명	주요 정책	정책 주요내용	
압력	토지 전환	불투수 면적	a, b, c, d	· 기후변화 대응과 물순환 회복을 위해 불투수면적 관리, 저영향 개발(LID) 기법 확산, 물순환 구조 개선 등을 중심으로 도시 물환경을 지속가능하게 관리하는 체계를 구축
	기후변화	극한 기상현상	e, f, g, h, i	· 자연기반해법과 범부처통합정보관리시스템, 기후변화 건강영향 감시체계를 통해 극한 기상현상에 따른 생태계·국민 건강 리스크를 선제적으로 관리 · 기후재난 안전사회, 국가 물안보·가뭄 통합관리, 도시침수 예방·기반시설 기후적응 강화를 통해 가뭄·홍수·자연재해 피해와 경제적 손실을 줄이는 회복력 있는 사회를 구축
		가뭄일수		
		자연재해 피해		
	오염	대기오염 배출	b, e, f, h, j, k	· 대기오염총량제 확대와 HAPs·비배기배출원관리, 도시숲·정원 확충으로 미세먼지 등 대기오염을 지속적으로 감축 · EPR·자원순환 성과관리와 직매립제로화, 산업폐수 유해물질 규제·방제체계 강화로 폐기물·폐수 오염부하를 감소
폐기물 발생량				
폐수 발생량				
과이용	인구 변화	l, m	· 인구구조 변화에 대응하고 수도권 과밀을 억제하며 지역의 지속가능한 발전과 균형 있는 인구 분포를 목표로 추진	
상태	화학적질	호흡기질환 사망자수	a, f, n, o	· 대기오염·기후변화·감염병 등으로 인한 호흡기질환을 줄이기 위해 오염총량제와 기후보건·감염병 감시체계를 강화해 건강 영향을 체계적으로 예방·관리
	물리적질	하수도 보급	b, c, f	· 농어촌·도시 하수도 보급을 확대하고 ICT·저영향개발기법을 결합해 수질 개선
	생태계구조	녹지 연결성	a, e, f, j, p	· 국토·도시계획과 생태축복원·연결성 평가를 연계해 생활권 녹지 연결성과 생태계 구조를 강화 · 도시숲·수공간·정원·그린웨이를 확대하고 3-30-30 규칙·취약 계층 배려 지표로 모두의 공공녹지 접근권을 보장
		도시구조 변화		
	녹지 접근성			

a. 제3차 국가기후변화적응대책; b. 제1차 국가물관리기본계획; c. 제3차 강우유출 비점오염원관리종합대책; c. 제2차 물환경관리 기본계획; d. 제5차 국가생물다양성전략; e. 제4차 지속가능발전기본계획; f. 제3차 국가기후변화 적응대책; g. 탄소중립·녹색성장 국가전략; h. 제5차 국가환경종합계획; i. 제1차 자원순환기본계획; j. 제2차 정원진흥 기본계획; k. 제2차 도시림기본계획; l. 제4차 저출산·고령사회 기본계획; m. 제4차 수도권정비계획; n. 제2차 미세먼지 관리 종합계획; o. 제3차 감염병 예방관리 기본계획; p. 제3차 자연환경보전기본계획

라) 담수생태계 관련 주요 정책 및 연계 방향

담수생태계는 댐·저수지·방조제 등 인공 수체 확대로 면적은 늘었지만, 자연 하천의 연속성과 생태 기능은 복합적으로 변한 유형이다. 극한 호우와 홍수 위험이 커지고, 생활·산업 오염은 다소 줄었으나 축산 오염과 외래 어종 압력은 여전히 높다. 수질은 전반적으로 개선되고 있으나 하천 유량 감소, 호소 부영양화, 생물다양성 저하로 수량과 생물군의 취약성은 그대로 남아 있다.

담수생태계 관련 대응은 토지 전환과 홍수·가뭄 압력을 완화하기 위해 생물다양성 통합공간계획, 생태축·습지 복원, 유역 단위 홍수총량제 도입과 법·제도·복구 체계 정비를 연계하는 방향으로 마련되고 있다. BOD·TP, 가축분뇨, 오폐수 등 오염원은 비점·산업·축산 부문을 아우르는 통합 관리와 자원화·저감기술을 통해 감축하고, TAC 확대, 물수요 관리·재이용, 지하수 공공관리 등을 통해 용수 이용의 지속가능성을 높이고자 한다. 외래종은 위해성 평가와 모니터링·제거 사업을 통해 관리되며, TOC 총량제, 유역 단위 수질·수량·생태유량 관리, 보·댐 운영 개선, 장기 생태 모니터링·DNA 바코딩 등을 통해 수질·수량·연결성·생물상을 통합적으로 진단·관리하는 정책이 추진 중이다.

사회적 측면에서 홍수·가뭄·수질오염은 하천변 저지대, 노후 주거지, 농촌·어촌의 고령·저소득층 주민에게 불균형하게 큰 피해를 주는 것으로 보고된다(Son & Ban, 2022; UN, 2024; WHO & UNICEF, 2025). 물 정의 연구는 이러한 불평등이 단순한 인프라 격차를 넘어 의사결정 참여와 위험·편익 분배의 문제임을 지적하며(Harris et al., 2016; Sanchez et al., 2023), 담수생태계 관련 정책은 유역 관리·오염 저감·외래종 대응과 재난대응·주거·건강 지원을 연계하여 취약계층의 안전하고 깨끗한 물 서비스 접근성을 보장하는 방향으로 발전할 필요가 있다.

〈표 II-1-12〉 담수생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책

구분	지표명	주요 정책	정책 주요내용	
압력	토지 전환	하천, 호소 토지 전환	a	· 생물다양성 통합 공간계획과 생태축 복원을 통해 관리, 생물·생태적으로 중요한 지역의 연결성과 온전성을 강화
	기후변화	극한호우	b, c, d, e	· 유역 단위 홍수총량제, AI 홍수예보, 물 인프라 확충 등을 포함한 범부처 예측-대응-복구 체계를 통해 홍수·가뭄 피해를 최소화하고 물 안보를 강화
	오염	BOD, TP 배출부하 가축분뇨 처리	a, b, e, f, g	· 생활·산업·축산에서 나오는 유기물·양분 오염을 줄이기 위해 비점·산업폐수·가축분뇨를 통합 관리하고, 자원화·저감기술로 수질·생태계·온실가스 영향을 함께 억제
		오폐수 발생		
	과이용	용수 이용량	a, e, h	· 내수면 어업과 물·지하수 사용을 줄이기 위해 TAC 확대, 물 수요관리·재이용, 지하수 공공관리로 지속가능한 이용을 추진
지하수 이용				
외래종	외래종 침입	a, c, h	· 유입경로 분석·위해성 평가·통관·모니터링·합동 방제를 통해 유입과 정착을 선제적으로 차단하고 확산을 억제	
상태	화학적 질	하천, 호소 수질	c, d, e, g, h	· TOC 총량제와 지하수 수질관리, 미량·미규제물질 모니터링과 수질측정망·비점오염 관리를 강화해 하천·호소 목표수질을 과학적으로 달성·유지
		목표수질달성도		
	물리적 질	하천, 호소 저수량 서식수변 건강도	c, e, g, h, i	· 하천유지유량 확보와 물 배분 기준 정비로 기후·수요 변화에 유연하게 대응 · 서식수변 건강도와 연결성은 수량·수질·생태 통합 관리와 생태하천·어도·수변생태벨트복원
		하천 연결성		
생물적 구성	어류 종 다양도	c	· 수생태계 지표종을 장기 모니터링하고 AI·원격탐사·DNA 바코드 등을 활용해 기후변화에 따른 변화를 진단·예측	

a. 제5차 국가생물다양성전략; b. 탄소중립·녹색성장 국가전략; c. 제3차 국가기후변화적응대책; d. 제5차 국가환경종합계획; e. 제1차 국가물관리 기본계획; f. 제3차 강우유출 비점오염원관리종합대책; g. 제2차 물환경관리 기본계획; h. 제4차 지속가능발전기본계획; i. 댐관리기본계획

마) 습지생태계 관련 주요 정책 및 연계 방향

습지생태계는 생물다양성, 탄소 저장, 수질정화, 홍수·가뭄 완충 등 다양한 기능을 제공하는 핵심 유형이며, 인벤토리 구축·복원·인공 수체 확대 등으로 면적은 늘었으나 질 변화는 복잡적이다. 강우 집중, 축산·산업오염, 외래 교란식물 증가는 수질과 서식지에 부담을 주는 반면, 일부 오염원 감소와 용수·지하수 이용 완화는 긍정적 신호로 나타난다. 하천·호소 수질과 보호지역 네트워크는 개선되고 있으나, 부영양화, 수량 감소, 지하수위·종다양성 저하는 여전히 취약성을 보여주는 지표로 평가된다.

정책 측면에서 습지생태계는 토지 전환·기후·오염·과이용·외래종 압력에 대응하기 위해 탄소중립·녹색성장, 국가기후변화적응, 국가물관리·물환경관리, 비점오염원, 지속가능발전, 국가생물다양성전략 등이 연계된 체계 아래 관리되고 있다. 이들 계획은 유역 단위 홍수총량제와 홍수 예측, 하천유지유량 확보 및 댐·보 운영 개선, 생활·산업·축산 오염원의 통합 관리, 물수요관리·재이용·지하수 공공관리, 외래종 모니터링·방제를 통해 홍수·

가뭄 위험, 오염 부하, 용수 과잉 이용, 외래종 확산을 줄이는 것을 목표로 한다. 동시에 TOC 총량제, 지하수·미량오염물질 관리, 생태하천 복원과 수변생태벨트 조성, 내륙습지 지도·온실가스 인벤토리 구축, 깃대종·멸종위기종 모니터링, 람사르 및 국가 습지보호지역 확대를 통해 수질·수량, 서식수변 건강도와 연결성, 습지의 탄소흡수 기능과 생물다양성을 제도적으로 뒷받침하고 있다.

다만 이러한 정책과 관리 성과가 습지 주변 주민의 삶과 어떤 방식으로 맞물리는지, 특히 악취·내수 침수·토지이용 제한과 같은 부담과 홍수 완충·수질 정화·경관·휴식 등 혜택이 사회적으로 어떻게 분배되는지에 대해서는 여전히 정보가 부족하다. 국제적으로도 저지대·하천변·습지 인근의 저소득·취약계층이 반복적인 침수와 하수 역류, 수질오염, 악취로 건강·자산·정체성에 복합적인 피해를 입는 사례가 다수 보고되고 있으며 (US Water Alliance, 2017; Hughes et al., 2019), 수자원·홍수 관리에서 공정한 혜택 분배와 참여를 강조하는 ‘워터 저스티스(water justice)’와 사회수문학 기반의 환경정의 논의가 확대되고 있다(Thaler, 2021). 우리나라 습지 정책도 습지 인근 저지대·노후 주거지·농어촌 마을 주민들이 홍수·가뭄·수질오염 위험과 악취·모기 피해, 토지 이용 규제 부담만 떠안지 않도록, 보전·복원·이용 전략을 설계하는 것이 중요하다.

〈표 II-1-13〉 습지생태계 평가 지표 관련 국내 주요 정책

구분	지표명	주요 정책	정책 주요내용	
압력	토지 전환	내륙습지피복 전환	a, b, c, d	• 내륙습지를 생물다양성과 탄소흡수 핵심공간으로 보고, 공간계획·국가통계·온실가스 인벤토리·습지총량제를 통해 피복 전환을 관리하며 보전·복원을 제도화
	기후변화	강수량	d	• 강수 변화에 대응해 습지의 생태계서비스·탄소저장·기후취약성을 정량 평가하고, 내륙-하천-연안습지 통합보전과 지자체 적응계획에 연계
	오염	폐수 배출량	a, b, e, f, g	• 산업폐수와 신규 오염물질을 감시·규제하고 공공처리·방체체계를 강화 • 가축분뇨 발생을 줄이고 양분관리·공공처리·에너지화를 확대해 수질오염과 축산부문 온실가스 배출을 함께 감축
		가축사육, 분뇨 처리		
외래종	생태계교란 생물	a, c, h	• 침입외래종에 대해 유입 단계부터 모니터링·위해성 평가·통관 관리·합동 방제까지 전 과정을 관리해 생태계교란 생물의 확산과 피해를 최소화	
상태	생태계 구조	내륙습지 연결성	a, d	• 국토-환경계획 통합과 생태축기반 습지 목록화·복원을 통해 내륙-하천-연안 습지 간 연결성을 높여 생물다양성과 생태계 기능을 회복·강화
	생물적 구성	종 수 (식물, 조류)	c, d, i, j, k	• 습지마다 깃대종을 정해 보전·복원과 지역 브랜드화에 활용 • 멸종위기 야생생물은 과학적 지정, DB 구축, 서식지 보전 • 복원으로 체계 관리·습지·서식지는 보호구역 확대, 관리효과성 평가, 주민·지자체·국제협력으로 장기 보전.
		멸종위기 야생생물		
습지보호지역				

a. 제5차 국가생물다양성전략; b. 탄소중립녹색성장국가전략; c. 제4차 지속가능발전기본계획; d. 제4차 습지보전기본계획; e. 제1차 국가물관리기본계획; f. 제3차 강우유출 비점오염원관리종합대책; g. 제2차 물환경관리 기본계획; h. 제3차 국가기후변화적응대책; i. 제5차 국가환경종합계획; j. 제4차 야생생물보호기본계획; k. 멸종위기 야생생물보전종합계획

3) 소결

이번 연구에서는 IPBES 개념 틀을 바탕으로 압력-상태-대응(PSR) 구조를 적용하여 산림, 농경지, 도시, 담수, 습지 다섯 생태계 유형의 장·단기 변화를 통합적으로 평가하고, 그 결과를 국가 주요 계획과 연계할 수 있는 기초를 마련하였다. 장기·단기 통합 평가 결과, 기후변화와 도시·농경지의 토지이용 변화는 거의 모든 생태계에서 공통으로 악화된 압력으로 작용하는 반면, 산림의 구조·기능, 담수의 수질, 일부 습지의 보호지역·연결성 지표는 개선이 두드러지는 등 생태계별로 다른 회복·취약 패턴이 확인되었다. 특히 하나의

생태계 안에서도 압력은 악화하지만, 상태는 개선되는 등 상반된 흐름이 동시에 나타나, 향후 관리에서는 악화된 압력을 줄이는 정책과 이미 개선된 상태 요소를 유지·강화하는 전략을 병행해야 함을 시사한다.

정책 분석 측면에서 PSR 평가는 산림기본계획, 국가기후변화대응·적응대책, 국가물관리기본계획·물환경관리 기본계획, 국가생물다양성전략, 지속가능발전 기본계획 등이 토지 전환·기후·오염·과이용·외래종 압력과 수질·수량·구조·생물상 상태를 각기 다른 정책 조합과 수단으로 다루고 있으며, 산림·담수·습지에서는 보호지역 확대와 복원, 도시는 불투수면 관리와 저영향개발, 농경지는 친환경·공익직불 중심의 정책이 추진되는 것으로 나타났다. 생태계 유형별 사회적 요소 분석 결과, 일부 계획이 취약계층 보호, 녹지·물서비스 접근성, 농어촌·산촌 지원 등을 언급하고 있으나, 재해·오염 부담과 생태계 혜택의 공간적·사회적 분포를 정량 지표와 목표로 설정하고 정책 수단과 연계해 관리하는 체계는 미흡해 이를 보완하기 위한 지표·제도 정비가 필요하다. 본 연구는 5개 생태계 유형별 압력·상태와 정책 대응 구조와 함께, 현행 법정 계획과 데이터 체계의 공백·편중 양상을 동시에 나타내는 기초 진단 도구로서 의미가 있다.

4) 결론 및 제언

본 연구는 IPBES 평가틀을 바탕으로 압력-상태-대응(PSR) 구조를 적용하여 산림·농경지·도시·담수·습지 5개 생태계의 장·단기 변화를 통합적으로 진단하고, 국가 생물다양성·기후·환경·물 관리계획과의 연계 가능성을 검토하였다. 분석 결과, 대부분 생태계에서 토지 전환·기후변화·오염·외래종 등 구조적 압력은 여전히 악화 추세인 반면, 산림 구조·기능과 담수 수질, 일부 보호지역·연결성 지표는 개선되는 등 압력 악화와 상태 부분 개선이 공존하는 양상이 확인되었으며, 이는 압력 저감과 상태 유지·강화를 병행하는 이중 전략의 필요성을 시사한다. 또한 생태계 유형별로 사회적 취약성과 환경정의·형평성 관점에서 관련 정책을 발굴·검토함으로써, 생태·환경 관리에 더해 사회적 측면까지 확장의 필요성을 강조하였다.

한편, 장·단기 평가는 생태계·지표별로 활용할 수 있는 자료의 공간적·시간적 범위가 불균형하고, 특히 각 생태계의 지표 구성의 불균형과 장기 시계열 데이터 부족으로 인해 변화를 해석하는 데 한계가 있었다. 통합평가 또한 단순 점수 합산 방식에 기반하여 생태계 유형별 중요도와 민감도, 지표 간 상관관계와 불확실성을 충분히 고려하지 못하였으며, 향후 생태계 특성을 반영한 가중치 체계와 신뢰구간·정확도 평가, 압력-상태-대응 간 인과 구조의 정량화 등을 위한 추가 연구가 요구된다.

이러한 한계에도 불구하고 본 연구는 첫째, 5대 생태계를 대상으로 장·단기 변화를 일관된 PSR 틀 안에서 비교·통합한 최초의 시도라는 점에서, 둘째, 생태계 평가 결과를 다수의 법정 계획과 연결할 수 있는 공통 평가 축을 제시했다는 점에서, 셋째, 데이터 공백과 평가 방법의 한계를 구체적으로 드러내 향후 국가 생태계서비스 계정 및 자연자본 관리체계 고도화를 위한 의제와 방향을 명확히 했다는 점에서 의의가 있다.

나. 생태계서비스 주제 평가(수분)

1) 연구 배경 및 필요성

가) 연구의 배경

수분서비스는 종자식물이 번식하고 열매를 형성하는 과정의 핵심 요소로, 생태계 유지와 식량 생산을 연결하는 중요한 조절 기능이다. 특히 곤충을 통한 화분 이동은 작물의 생산량과 품질을 높이고 농업 생태계의 안정성과 생물다양성 증진에도 이바지한다(Klein et al., 2007; Simon et al., 2010; Roulsto & Goodell, 2011; IPBES, 2016). 우리나라 주요 작물의 절반 이상이 곤충매개, 그중에서도 꿀벌에 크게 의존하며, 화분매개의 경제적 가치는 수조 원 규모로 평가된 바 있다(정철의, 2008). 수분서비스는 생물다양성과 농업생태계의 생산성을 연결하는 핵심 역할을 하여 다른 서비스보다 PSR 연결고리가 명확하다. 수분서비스는 작물 의존도, 생산량, 공간적 매개 가능성, 경제가치를 국가 단위로 비교적 계량이 가능한 구조이다. 국내는 2019년 생물다양성 관련 법 개정 이후 생태계서비스 평가를 추진하고 있으나, 수분서비스는 아직 초기 단계에 머물러 있으며 화분매개자 분포자료, 수분의존도 자료, 공간적 매치 분석에 대한 정보 수준 차이가 크다. 수분서비스 평가는 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 모형으로 생태계서비스를 정량적으로 평가하는 대표적인 도구로 토지이용 및 토지피복이 생태계서비스에 끼치는 영향을 분석한다(Bagstad et al., 2013). 그 중, Crop pollination을 활용하여 국내 주요 작물 23종을 대상으로 17개 광역시도에 대한 수분서비스를 평가하였다(국립생태원, 2024). 그러나 꽃 및 서식지 자원의 다양성, 서식지의 분포 등 국외 문헌 자료를 통해 평가한 것으로 국내 환경에 적합한 데이터 구축이 필요하다. 모형 입력자료인 수분매개자의 비행거리, 실제 수분매개자 자원식물 파악 등 국내 환경요소를 고려한 현실적인 정보가 거의 없다. 이번 연구 대상종인 꿀벌은 양봉꿀벌(*Apis mellifera* Linnaeus, 1758)과 재래꿀벌(*Apis cerana* Fabricius, 1793)은 전 세계적으로 널리 사육되는 대표적인 종이다. 양봉꿀벌은 대량 꿀 생산과 기술 공유가 활발해 상업 양봉의 주류를 이루고 있지만(농림축산식품부, 2021), 재래꿀벌은 기후 적응력과 질병 저항성이 높고 지역 고유 생태·문화 자산과 깊이 연관되어 있음에도 불구하고 그 사육 규모와 개체수가 급격히 감소하고 있다 (Theisen-Jones & Bienefeld, 2016). 재래꿀벌의 봉군 수는 양봉꿀벌이 적극적으로 양봉산업에 사용되는 1970년대 이후, 꾸준히 감소하고 있다. 특히, 2009년에는 낭충봉아부패병 발생으로 재래꿀벌 42만 군이 2016년 1만 군으로 급격하게 줄었다(그린피스, 2023). 재래꿀벌은 고정 사육 방식으로 열, 습도에 따른 주변 서식지 환경 변화 민감하고 감염 시 집단 폐사 위험이 크다(Li et al., 2023). 그러나 재래꿀벌 서식지 특성, 비행거리 같은 행동 생태, 수분서비스 기여도 등에 관한 연구는 여전히 부족하다. 특히, 재래꿀벌 봉분과 양봉가의 수가 양봉꿀벌에 비해 적고, 개체군의 민감도가 높아 과학적 실험 연구가 제한적이다. 이러한 연구적 한계를 개선하고자 1. 비행거리 측정 2. 재래꿀벌과 양봉꿀벌의 꿀 eDNA를 통해 정량적인 봄철 화분매개 자원 목록 3. 양봉가 대상 포커스 그룹 인터뷰 4. InVEST 모델링 비교 분석을 진행하였다. 이러한 정보 구축은 향후 생태계 안정성 확보 및 건강한 생태계 유지를 위한 수분서비스 기반 생태계서비스 관리 및 보전 전략 수립에 기여할 것으로 기대한다.

〈표 II-1-14〉 국가별 화분매개(수분)서비스 평가 방법론 및 주요 결과

국가	평가 시기 / 체계	사용한 데이터	주요 결과	레퍼런스
영국 (UK)	UK NEA (2011) UK NEA Follow-on (2014)	<ul style="list-style-type: none"> 토지피복(LCM) 작물별 수분의존도 자료 벌 서식지 적합성 지수(HSI) 농업통계(Defra Yield Stats) 	<ul style="list-style-type: none"> 도시·집약농업지대에서 수분공급 저하 지역 확인 사과·유채 등 작물 생산성-수분서비스 공간 불일치 도출 Pollinator Strategy 수립의 근거 마련 	UK NEA 2011; UK NEA Follow-on 2014; Baude et al. 2016 (Nature)
EU (유럽연합)	MAES(2013-) ESTIMAP Pollination (2013- 2015)	<ul style="list-style-type: none"> CORINE Land Cover 벌 이동 거리·생태자료 작물별 Pollination Demand EU 농업통계(Eurostat) 	<ul style="list-style-type: none"> 남유럽·도시 지역에서 공급-수요 미스매치(high deficit) 지역 파악 EU 차원의 토지계획 및 농업 정책에 반영 	Zulian et al. 2013; Maes et al. 2015; Schulp et al. 2014
미국 (USA)	National Strategy to Promote Pollinators (2015) USGS Pollinator Mapping	<ul style="list-style-type: none"> 전국 Pollinator Monitoring data(USGS) 토지이용/토지피복(NLCD) 야생벌 개체수 추세 모델 농업생산량(USDA NASS) 	<ul style="list-style-type: none"> 야생벌 개체군 23% 감소지역 식별 서식지 감소 지역 중심으로 복원 우선순위 도출 연방 생태복원정책의 근거 제공 	The White House 2015; Koh et al. 2016 (PNAS); USGS 2017
캐나다 (Canada)	Pollination Service Mapping (2015-2019)	<ul style="list-style-type: none"> 토지피복(Canada Land Cover) 농업생산 통계 (Statistics Canada) 벌 서식지 자료 작물별 Pollination Need 	<ul style="list-style-type: none"> 농업지대 생산성 변동의 핵심 요인이 '수분서비스 변동성'으로 확인 작물 생산량 예측모델에 Pollination 변수 포함 	Roubik & Kjøhl 2018; Breeze et al. 2016; Faris & Coutts 2019

나) 연구 내용 및 방법

연구 내용은 크게 현장 조사를 통한 비행거리 실험, 환경 시료에서 eDNA를 통한 봄철 자원 목록, 양봉가 인식조사, 특정 연구 지역 대상 InVEST 모델 비교 분석을 진행하였다.

(1) 연구 대상종 비행거리 측정 실험

공간적 범위는 경상북도 영양군 일월면 일대에서 진행되었고 시기는 7월에 진행하였다. 연구 방법은 귀소 본능을 활용한 비행거리 측정하는 것으로 거리 및 주변 환경 요인을 고려하여 방출 지점 선정, 친환경 표식 방법을 개발하였다.

(가) 환경 요인 고려 방출 지점 선정

도로망을 중심으로 한 지리 공간 분석 기본 데이터는 도로 레이어(22개 도로), 하천 레이어(21개 하천), 농경지 레이어(1개 영역)로 구성되었다. 연구 대상 지역에 대해 총 220,720개의 규칙적인 격자점(grid points)을 생성하였다. 이 중 도로에 위치하거나 도로와 인접한 2,908개 지점을 1차 후보지로 추출하였다. 도로 접근성을 고려하여 거리 기반 공간 분석을 수행하였다. 1차 후보지 중 특정 거리 조건을 만족하는 630개 지점을 최종 분석 대상으로 선정하였다. 선정된 630개 지점에 대해 다음의 공간 변수를 추출하였다. 그리고 실제로 차로 진입하는 데 어려움 없는 곳으로 최종 20곳을 선정하였다.

〈표 II-1-15〉 방출 지점 고려 환경요인

유형	공간 변수	설명
수문 및 토지이용 변수	하천 근접도(stream ratio)	각 지점으로부터 하천까지의 거리 또는 영향권 비율
	농경지 비율(crop ratio)	주변 지역 내 농경지 점유 비율
지형 변수	고도(elevation)	수치표고모델(DEM)로부터 추출
	경사도(slope)	DEM 기반 경사 분석
	가시성(visibility)	지형적 가시권 분석
	사면 방위(northness)	북향 성분을 나타내는 지형 지수

(나) 친환경 표식 방법 개발

귀소 개체를 판별하기 위한 최적의 표식 방법을 도출하기 위해 다음과 같은 방법을 시행하였다. 먼저 일반적으로 여왕벌을 표시하기 위한 저독성 마커를 활용한 표식 실험을 시도하였다(Hayashi et al., 2021). 그러나 표식 개체의 약 50%가 포획 용기 내에서 폐사하였으며, 생존 개체 중에서도 방사 후 귀소하지 못하는 문제가 발생하여 부적합한 것으로 판단하였다. 다음으로 독성이 낮고 개체 식별이 쉬운 식용색소를 활용하여 스프레이로 도포하여 표식을 시도하였다. 표식 개체의 귀소는 확인되었으나, 표식의 명확성과 개체 식별의 용이성이 낮아 정량적 분석에 한계가 있었다. 다음으로 자연 상태에서 꽃가루가 곤충 체표에 부착되는 현상에 착안하여 전분 가루를 체표에 도포하여 표식하는 데 활용하였다. 이 방법은 표식의 가시성과 개체 식별이 모두 쉬웠으며, 개체의 생존율과 귀소율에 부정적인 영향을 미치지 않아 최종 표식 방법으로 채택하였다. 그리고 이동조와 관찰조로 나누어 비행 실험을 진행하였다.



〈그림 II-1-1〉 비행실험 진행사항

(2) 연구 대상종 화분매개 가능 자원 목록

(가) 시료 채집 및 DNA 추출

화분매개 가능 자원 목록을 구축하기 위해 전북특별자치도 군산시 옥산면 일대와 경상북도 영양군 일월면 일대 양봉장에서 봄철 꿀을 채집하였다. 꿀 시료로부터 식물 eDNA를 추출하기 위해 멸균된 50 mL 튜브에 꿀 10 g을 담고 멸균된 3차 증류수 30 mL를 첨가한 후 65°C에서 30분간 유지하였다. 이후 15,000 g에서 30분간 원심분리하여 상층액을 제거하고, 침전된 펠릿을 멸균된 3차 증류수 10 mL에 재현탁한 뒤 동일한 조건으로 30분간 원심분리하여 꿀에 포함된 잔재를 제거하였다. 최종 침전물은 1 mL 멸균수에 재현탁하여 FastDNA SPIN Kit for Soil (MP Biomedicals, UK)을 사용하여 eDNA를 추출하였다.

(나) 유전자 마커 선정 및 메타바코딩 분석

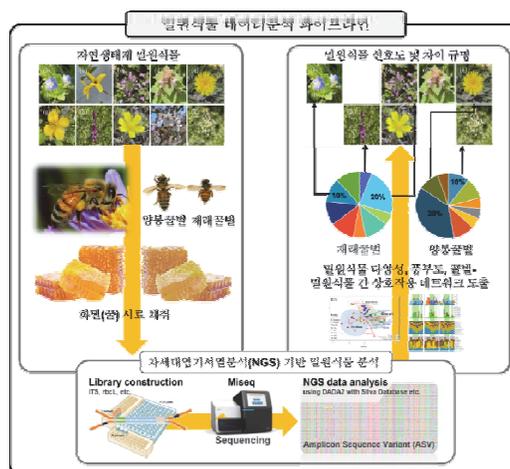
식물상 분석에는 ITS(Internal Transcribed Spacer), *rbcL*, *matK* 등의 유전자 마커가 대표적으로 사용된다. 본 연구에서는 ITS2와 *rbcL* 두 유전자 부위를 선정하였다. ITS2는 variation region을 포함하고 있어 종 수준 분류에 적합하며, 세계적으로, 보편적으로 사용되는 universal primer로 누적된 데이터가 풍부하고 NGS 분석용 데이터베이스가 구축되어 있다는 장점이 있다. *rbcL*은 진화적으로 보존성이 높아 넓은 범위의 식물군 검출이 쉽지만, 누적된 데이터가 상대적으로 부족한 단점이 있다. 그러나 다양한 식물 검출을 위하여 두 유전자 부위를 모두 활용하여 Illumina MiSeq 플랫폼 기반의 메타바코딩 분석을 수행하였다.

(다) 프라이머 설계 및 PCR 조건 최적화

1차 PCR을 위해 Illumina Nextera 어댑터 서열이 부착된 프라이머 세트를 사용하였다. ITS2 영역 증폭에는 ITS2_F(53bp)와 ITS2_R(54bp) 프라이머를 사용하였으며(Wirta et al., 2021), *rbcL* 영역 증폭에는 *rbcLaf*(59bp)와 *rbcLr506*(56bp) 프라이머를 사용하였다(de Vere et al., 2017). 모든 프라이머는 5' 말단에 Illumina Nextera 어댑터 서열을 포함하도록 설계되었다. PCR 반응의 특이성을 높이기 위해 TaKaRa Ex Taq® Hot Start(RR006B)를 사용하여 비특이적 증폭과 프라이머 이합체 형성을 최소화하였으며, PCR 저해 물질의 영향을 억제하기 위해 Bovine Serum Albumin(2320; TaKaRa)을 첨가하였다. ITS2 마커의 PCR 조건은 98°C 30초 초기 변성 후, 98°C 10초, 55°C 30초, 72°C 30초의 사이클을 35회 반복하고 72°C에서 5분간 최종 신장 반응을 수행하였다(Namin et al., 2022). *rbcL* 마커는 어닐링 온도를 50°C로 조정된 것을 제외하고는 동일한 조건을 적용하였다(de Vere et al., 2017). 모든 PCR 반응은 20 µL 부피로 진행되었다.

(라) DADA2 분석용 참조 데이터베이스 구축

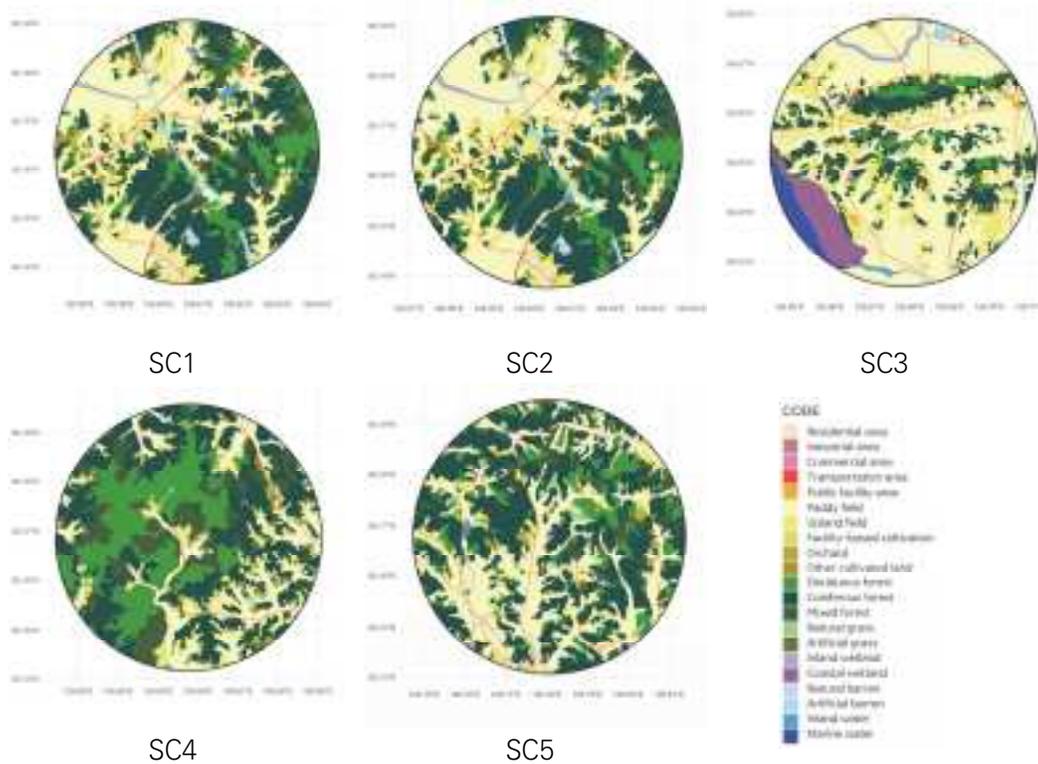
꿀 시료 내 식물 기원 분석의 정확도와 분류학적 해상도를 향상하기 위해 DADA2 전용 식물 ITS 참조 데이터베이스를 구축하였다. 이탈리아 피사대학교에서 개발한 PLANITS(Plant ITS) 데이터베이스 v2020.3-full 버전을 GitHub 공식 저장소에서 확보하였다(Banchi et al., 2020). 확보한 원본 데이터를 DADA2의 assignTaxonomy() 함수에 적합한 형식으로 전환하기 위해 R 환경에서 재가공 작업을 수행하였으며, 종 수준까지 식별할 수 있는 고해상도 참조 서열 집합을 'ITS2_dada2.fasta' 형식으로 재구성하였다. 이를 통해 국내 밀원식물의 식별 정확도를 제고하고 분석 결과의 신뢰성을 확보할 수 있는 로컬 참조 데이터베이스를 구축하였다.



〈그림 II-1-2〉 유전자 분석 파이프라인

(3) 연구대상종 서식지 생태계서비스 가치 평가

조사 지역인 충청남도 서천군 양봉장 주변 서식지 분석은 벌의 평균 활동권(반경 약 3 km) 내 토지피복 특성과 생태계서비스 잠재력을 파악하기 위해 수행되었다(Gerula&Gabka, 2025).



〈그림 11-1-3〉 반경 3 km 이내 양봉장 토지 피복

이를 위해 기후에너지환경부에서 제공하는 2021년 중분류 토지피복도를 활용하였다. 공간 정보 분석프로그램을 활용하여 각 벌통을 중심으로 반경 3 km의 버퍼를 생성하고, 각 유형별 비율을 산출하여 주변 서식지 구성의 특성을 수치화하였다(그림 11-1-3). 이렇게 도출된 공간 분석 결과는 FGI와 간이평가 자료와 통합하여, 재래꿀벌 서식지 관리 전략과 정책 제안의 근거자료로 활용하였다.

(가) 생태계서비스 간이평가

간이평가는 FGI에서 얻은 질적 자료를 보완하여, 재래꿀벌 서식지 특성을 다각적으로 이해하기 위해 진행하였다. 이를 통해 인터뷰에서 제시된 경험적 진술과 인식된 어려움 등 주관적 서술을 수치화하고, 서비스 유형별 상대적 중요도를 정량적으로 파악할 수 있었다. 이러한 접근은 서식지별 강·약점을 명확히 드러내고, 향후 관리 전략 설정 시 실증적 근거를 제공한다는 장점이 있다. 평가는 습지 평가 도구 RAWES(Rapid Assessment Wetland Ecosystem Services, McInnes & Everard, 2017; Kim et al., 2019; Choi et al., 2023)를 참고하여 공급(3항목), 조절(7항목), 문화(5항목), 지지(2항목) 등 총 17개 항목으로 재구성하였다(표 11-1-16). 각 항목은 5점 리커트 척도로 중요도를 평가하였으며, 설문 전 사전 안내와 예비 응답을 통해 문항 이해도와 응답 일관성을 검토하였다. 추가로 서식지에 대한 위협요인과 함께 재래꿀벌의 행동 생태에 대한 경력, 특이 사항 등 전문가 기반 정보도 함께 도출하였다.

〈표 II-1-16〉 양봉장 주변 생태계서비스 평가 설문 내용

항목	지표	평가 스케일
Basic information	Beekeeping type	Numeric entry
	Years of beekeeping experience	
	Survey site address	open-ended
	Foraging activity(spring summer autumn)	
	average foraging distance	
	Flower resource(spring summer autumn)	
Ecosystem services	P_Water	1-5(low-high) Likert scale
	P_Food	
	P_Materials	
	R_Cleaning Air	
	R_Climate	
	R_Flood	
	R_Erosion	
	R_Cleaning Water	
	R_Pollination	
	R_Noise	
	C_Aesthetics	
	C_Heritage	
	C_Recreation	
	C_Social	
	C_Education	
	S_Fertile Soil	
S_Habitat		
Threat factors	Development pressure	
	Climate change	
	Environmental pollution	
	Overexploitation	
	Invasive species	

(나) 포커스 그룹 인터뷰

재래꿀벌을 사육하는 양봉가의 서식지에 대한 인식, 위협요인, 관리 방안에 대한 심층적 의견을 체계적으로 수집하였다. 2025년 3월, 충청남도 서천군 내 재래꿀벌을 취급하는 양봉장 총 7곳 중 참여 의사를 밝힌 5곳을 대상으로 인터뷰를 진행하였다. 참여자는 양봉 활동을 최소 5년에서 최대 20년 이상 경험한 양봉가로 구성되어 있다. 사전 안내를 통해 연구 목적과 절차를 상세히 설명한 후, 반구조화(semi-structured) 질문지를 활용하여 포커스 그룹 인터뷰(Focus Group Interview, FGI)를 진행하였다. 주요 질문은 재래꿀벌 서식지 특성 및 환경 자원 현황, 주요 위협요인 인식, 계절별 벌 행동과 밀원 자원 변화, 서식지 관리 및 정책 지원 필요성 등으로 구성하였다.



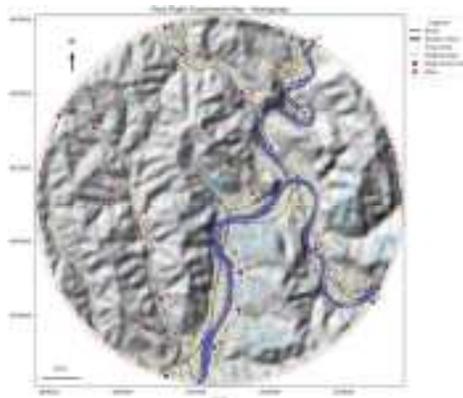
〈그림 II-1-4〉 수분서비스 이해당사자 생태계서비스 정성평가 진행 과정

(4) 모델 평가

수분서비스 연구 표준지인 경상북도 영양군 일월면 일원 5 km를 대상으로 10 × 10 m 해상도의 세분류 토지피복도(환경부, 2024)를 활용하여 수분서비스 공급 잠재력을 평가하였고, 모형 입력자료로 화밀자원 (floral resources)과 벌집 서식지(nesting habitat)에 해당하는 래스터 자료를 공간 정보 분석프로그램을 통해 구축하였다. 내용 범위는 기존 Lonsdorf 기반 모형의 한계인 수분매개자 먹이활동 행동 메커니즘을 보완한 Rahimi et al.(2021b)에 의해 개발된 PollMap모형 기반 평가와 경관 또는 지역 수준에서 InVEST 활용 수분서비스 평가와 비교 및 적용, 활용성을 검토하였다.

다) 연구 결과

(1) 연구대상종 비행거리 측정 실험



〈그림 II-1-5〉 비행거리 측정 방출 지점 20곳

연구대상종 비행거리 연구는 총 20회에 걸친 현장 방출 실험을 통해 국내 재래꿀벌의 비행거리에 따른 귀소 성공률을 분석하였다. 실험결과, 방출 지점과 벌집 간의 거리가 귀소 능력에 미치는 주된 요인임을 확인하였다. 실험 결과, 짧은 거리에서는 상당수 개체의 귀소가 관찰되었지만, 거리 증가에 따라 귀소율이 급격히 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 500 m 지점의 경우 총 37마리가 확인되어 매우 높은 귀소율을 기록하였다. 1 km

지점은 7마리가 확인되면서 귀소율이 현저히 낮아지는 지점이다. 1.5 km와 2 km 지점에서의 귀소 비율은 방출 개체 수 대비 약 3%에 머물렀다. 2.5 km 지점의 경우, 5회 방출 실험 중 한 마리만 귀소하는 데 성공했으며 이는 전체적으로 귀소율이 0%에 수렴함을 시사한다. 하지만 한 개체의 귀소는 재래꿀벌이 최대 2.5 km까지 비행하여 벌집으로 돌아올 수 있는 최장 비행거리를 시사한다는 점에서 중요한 의미가 있다.

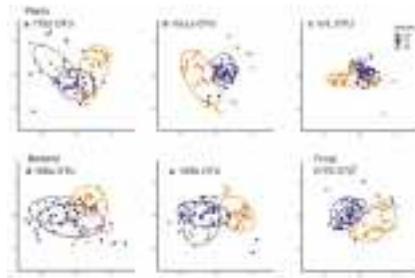
〈표 II-1-17〉 재래꿀벌 귀소율에 대한 거리 및 지형요인 회귀분석

Factor	Estimate	Standard error	p-value
Distance	-0.00238	0.00144	0.097
Visibility	-0.68272	1.88792	0.7176
Mean elevation	-0.01191	0.02916	0.6829
Stream ratio	-0.01178	0.08659	0.8918

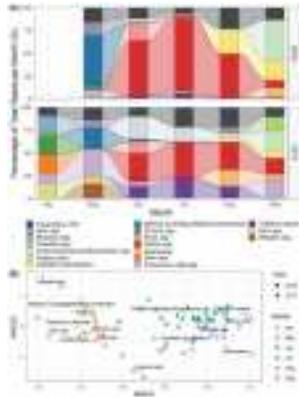
거리별 귀소율(실측치)과 로지스틱 회귀분석을 기반으로 예측된 귀소 성공률(파란곡선) 및 95% 신뢰구간(회색음영)을 통해 이 관계를 확인하였다. 500 m 지점에서 확인된 높은 귀소율은 1 km 이상에서 급격히 낮아지는 양상을 보였으며 특히 1 km에서 1.5 km 사이가 귀소 성공의 임계 거리로 판단된다. 이러한 결과는 국내 재래꿀벌의 일반적인 행동권이 짧을 수 있음을 시사한다. 거리 요인 이외에 지형적 특성(가시성, 평균고도, 하천밀도)이 귀소 성공률에 미치는 영향을 파악하기 위해 다중 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 분석 결과 거리만이 귀소율 감소와 약한 관련성을 나타냈다. 나머지 지형 요인들은 귀소율과의 통계적 유의성이 확인되지 않았다. 이는 전체 실험 지점을 포괄하여 고려할 때, 재래꿀벌의 귀소 성공률이 지형적 요인보다는 주로 거리(Distance)를 함수로 설명될 수 있음을 시사한다.

(2) 연구대상종 화분매개 가능 자원 목록

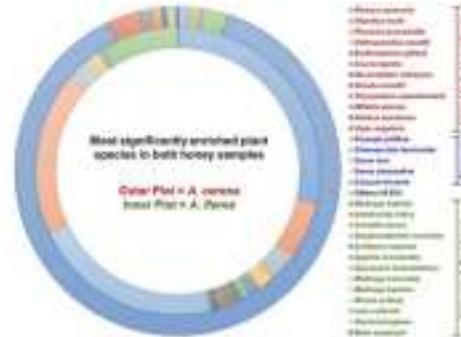
국내·외 eDNA 메타바코딩 기반 꿀 연구 현황을 보면 Wirta 등 (2021)은 핀란드, 스웨덴, 에스토니아 3개국의 꿀 eDNA분석을 통하여, 꿀의 밀원식물 및 박테리아, 곰팡이의 구성 차이를 밝혀냈고, 이를 통해 꿀의 생산 지역 판별 가능성을 시사하였다. Jones et al.(2022)은 영국의 다양한 식물 환경에서 2년에 걸쳐 꿀벌이 이용하는 식물군의 계절별 변화를 분석하여 계절별 선호하는 밀원식물을 밝혀냈고, 이는 계절별 식생 변화를 반영한 꿀벌의 행동을 통해 농업생태계 관리, 생물다양성 보전에 중요한 기초 자료가 될 것으로 기대하였다. Patel et al.(2025)은 인도의 *Apis cerana*와 *Apis florea* 두 종의 꿀벌에서 채취한 꿀 eDNA 분석을 통하여, 꿀벌 종에 따른 식물 이용 패턴을 비교·분석하였다. 꿀벌 종에 따라 선호하는 식물종이 달랐고, 이에 따라 경쟁을 줄이고 자원을 분할 사용 가능성을 제시하였다.



Wirta et al.(2021) Map of the three northern Europe countries (Estonia, Finland, Sweden) from which honey samples were obtained(left). Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) plots for plant, bacterial and fungal OTU community similarities among samples originating from the three different countries.(right)



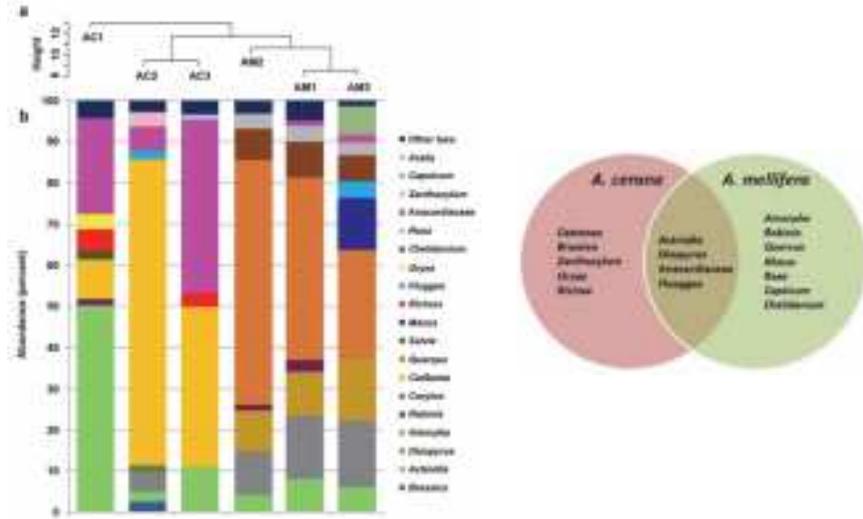
Jones et al.(2022) Plant taxa variation in relation to the sampling periods identified from different honey samples(A). NMDS ordination of the honey samples collected over 2 years(B).



Patel et al.(2025) Donut plot showing unique and commonly enriched floral taxa in the two honey samples from *A. cerana* and *A. florea*.

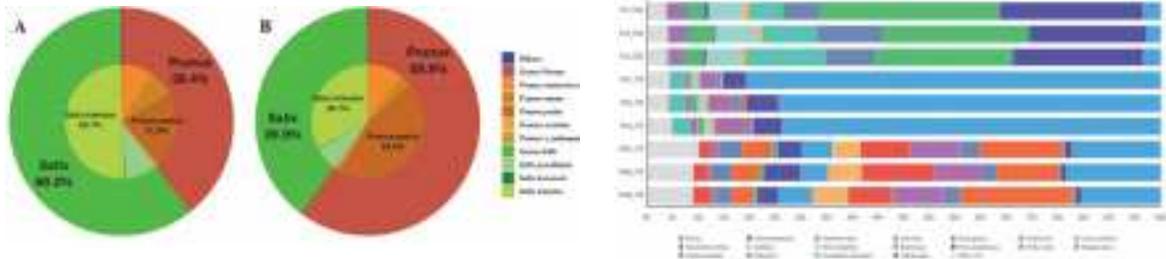
<그림 II-1-6> DNA 메타바코딩을 활용한 꿀 시료의 식물 및 미생물 군집 분석: 지역별, 시기별, 꿀벌 종별 연구 사례

Namin 등 (2022)은 꿀 속 eDNA 분석을 통해 꿀벌이 선호하는 식물종과 꿀의 식물 기원을 파악했고, 국내 재래꿀벌(*Apis cerana*)과 양봉꿀벌(*Apis mellifera*) 간의 밀원식물 이용 차이를 비교하였다. 두 종은 밀원식물 이용에서 부분적 중복성을 보이긴 했지만, 자원 분할 경향성을 크게 보였으므로, 밀원식물에 대한 상호경쟁은 제한적인 것을 확인하였다. Ryu 등(2024)은 장항 지역에서 수집한 꿀과 화분 샘플을 분석하여, 주요 밀원식물이 수양버들(*Salix triandra*)과 개앵도나무(*Prunus padus*)임을 하였다. 또한, 꿀벌의 밀원식물 이용은 계절과 지역 환경에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 실제로 꿀 수집 시기(3월과 4월)에 따라 꿀 속의 대사물질 조성 및 꽃가루 구성에 뚜렷한 차이를 확인하였다. 김선미 등(2025)은 국내 생산 아카시아꿀을 대상으로 DNA 메타바코딩을 수행하여 지역별 식물종 조성 차이를 분석하였는데 특정 샘플에서만 검출되는 식물종이 확인되었고, 이를 통해 꿀의 지역적 특이성과 분류 가능성 확인하였다. 또한, 같은 아카시아꿀로 분류되었음에도, 아카시아(*Robinia pseudoacacia*)의 상대적 풍부도(relative abundance)는 꿀 샘플에 따라 차이를 보이는 것을 확인하였다. 이번 연구는 시범적으로 진행하였으나 향후 국내 꿀벌의 화분매개 자원을 정량적으로 평가하여 생태계서비스 기여도에 대한 새로운 정보를 구축하고자 한다.



The Euclidean distance-based dendrogram summarizes the differentiation among honey samples from *Apis mellifera* (AM-n) and *Apis cerana* (AC-n). (b) Bar charts showing the taxonomic composition at genus level in the six honey samples.

Venn diagram shows the number of unique and shared taxa identified at the genus level among *A. cerana* honey and *A. mellifera* honey samples.



Pie chart using metabarcoding data from (A) honey and (B) pollen samples. The larger circles represent genus level and smaller circles represent species level.

The bar plot shows the relative abundances of the top 30 detected plant species in different Korean Robinia honey samples. Despite being labeled as Robinia honey, the samples showed considerable variation in the relative abundance of *Robinia pseudoacacia*.

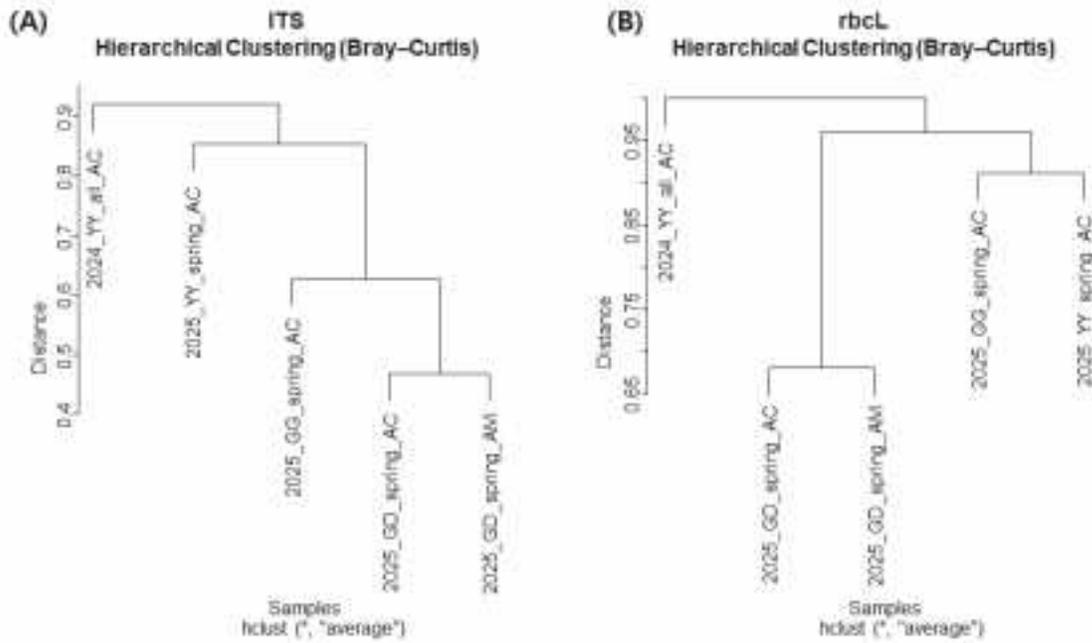
〈그림 11-1-7〉 꿀 및 화분 시료의 식물 분류군 조성 분석 연구 사례

시료는 2024년 경상북도 영양군 일세꿀(1년에 1번 채밀)과, 2025년 경상북도 영양군과 전북특별자치도 군산 봄꿀(3, 4, 5월) 시료로 ITS 및 rbcL ASV 데이터를 기반으로 산출한 α -다양성 분석 결과, 시료 간 다양성 (Diversity)과 풍부도(Richness)는 꿀벌 타입과 지역에 따라 차이를 보였다. ITS 및 rbcL 마커 모두에서 양봉꿀이 재래꿀보다 높은 Chao1 풍부도 지수(richness index)를 나타냈으며, 이는 양봉 개체군이 상대적으로 다양한 식물종으로부터 꿀과 꽃가루를 채집하는 것으로 해석된다. 이러한 경향은 선행 연구에서도 확인된 바 있으며, 양봉꿀이 재래꿀보다 더 다양한 식물상(flora)을 반영한다는 보고와 일치한다(Namin et al., 2022). 종합적으로, 양봉꿀은 재래꿀에 비해 풍부하고 다양한 밀원식물 조성을 반영하였으며, 이는 꿀벌의 행동적·생태적 차이에서 비롯된 것으로 판단된다. 다만, 이번 연구에서 양봉꿀 1개, 재래꿀 4개로 시료 수의 한계로 구성이 제한적이었기 때문에, 향후 연구에서는 샘플 수 확보와 계절적 반복 채집(seasonal replication)을 통해 보다 심층적인 분석이 필요하다.

〈표 II-1-18〉 ITS 및 rbcL ASVs 기반 꿀 시료의 메타데이터 및 α -다양성 지수 (Shannon, Chao1, and Evenness)

Sample ID	Date	Season	Location	Honey bee type	ITS-based alpha diversity index			rbcL-based alpha diversity index		
					Shannon	Chao1	Evenness	Shannon	Chao1	Evenness
2024_YY_all_AC	2024	all	Yeong yang	<i>A. cerana</i>	3.52	65	0.84	1.22	5	0.76
2025_GD_spring_AC	2025.05.21	spring	Gunsan	<i>A. cerana</i>	2.87	57	0.71	1.97	18	0.68
2025_GD_spring_AM	2025.05.21	spring	Gunsan	<i>A. mellifera</i>	3.41	222	0.63	2.29	80	0.53
2025_GG_spring_AC	2025.06.03	spring	Gunsan	<i>A. cerana</i>	3.21	61	0.78	2.05	18	0.71
2025_YY_spring_AC	2025.05.27	spring	Yeong yang	<i>A. cerana</i>	1.89	29	0.56	1.8	31	0.53

ITS와 rbcL ASV 데이터를 이용한 Bray-curits 거리 기반 화분매개 자원 식물 군집 구조 분석을 진행하였다. 군산시 당북리 시료(2025_GD_spring_AM, 2025_GD_spring_AC)는 동일 지역에서 각각 재래꿀벌(AC) 및 양봉꿀벌(AM)에서 생산된 꿀 시료로, 높은 조성 유사성을 보여 하나의 cluster로 묶인 것을 확인하였다. 반면 군산 당북리에서 약 1.3 km 떨어진 금성리 시료(2025_GG_spring_AC)는 이들과 분리된 별도의 cluster를 형성하여, 근접 지역 간에도 밀원식물 조성에 미세한 차이가 존재함을 보여준다. 또한 영양 지역 시료(2025_YY_spring_AC, 2024_YY_all_AC)는 군산 지역 시료들과 명확히 다른 cluster를 형성하였으며, 특히 2024년 시료(2024_YY_all_AC)는 일 년 1회 채취된 시료로서 동일 지역 내에서도 독립적인 분지로 분리되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 지역(Location) 및 계절성(Seasonality)으로 인한 식생 구조 차이가 꿀 시료 내 밀원식물 조성 유사도를 결정하는 주요 요인임을 시사한다. rbcL ASV 데이터를 이용한 계층적 군집 분석에서도 ITS 분석과 유사하게, 지역 중심적인 군집 분리 양상이 확인되었다. 군산시 당북리 시료 (2025_GD_spring_AM, 2025_GD_spring_AC)는 각각 재래꿀벌(AC)과 양봉꿀벌(AM)에서 생산된 꿀임에도 불구하고 하나의 cluster로 묶였는데, 이는 동일 지역 내 꿀벌이 공통으로 접근할 수 있는 인근 식생이 꿀의 밀원식물 조성에 큰 영향을 미친다는 것을 시사한다. 반면, 영양 지역 시료(2025_YY_spring_AC)는 군산 금성리 시료 (2025_GG_spring_AC)와 하나의 cluster를 형성하였으며, 이는 지역 간 및 계절적 변동성에 따른 식생의 복합적 영향을 반영한 결과로 해석된다. 또한 2024년에 채취된 영양 지역 시료(2024_YY_all_AC)는 다른 시기 시료와 가장 큰 차이를 보였으며, 1년 1회 채취된 시료로서 계절적 영향이 반영된 독립적 분지로 나타났다. rbcL 유전자 부위는 종 수준 식별력이 ITS보다 상대적으로 낮음에도 불구하고, 지역 간 밀원식물 조성 차이를 충분히 반영할 수 있음을 보여준다.



YY:영양, GD: 군산시 당북리, GG: 군산시 금성리, All: 일세꿀(1년 1회 채밀), spring: 봄 채집(3, 4, 5월), AC: 재래꿀벌, AM: 재래꿀벌

〈그림 II-1-8〉 ITS(A) 및 rbcL(B) ASVs 기반 Bray-Curtis 거리를 이용한 꿀 시료의 계층적 군집 분석

ITS 기반 과(family) 수준 분석 결과, 봄철 주요 밀원식물은 Fabaceae, Rosaceae, Brassicaceae, Styracaceae, Anacardiaceae 등으로 구성되었으며, 지역과 꿀벌 타입에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 지역 간 비교에서, 군산 시료는 Rosaceae(25-35%), Fabaceae(15-30%), Styracaceae(최대 31.8%)가 우점하여 초여름 개화 교목성 식물이 주요 밀원자원으로 작용했지만, 영양 시료는 Brassicaceae(24.6-38.8%), Fabaceae(최대 20.2%), Anacardiaceae(22.1%), Fagaceae(20.3%), Poaceae(21.5%), Asteraceae(16.8%)가 높게 나타나, 산림성 교목과 초본성 식물 자원이 혼합된 군집 구조를 보이며, 십자화과 작물과 산림성 자원의 복합적 영향을 받은 것으로 판단된다. 2024년 영양 시료에서는 Fagaceae(20.3%), Poaceae(21.5%) 및 Asteraceae(16.8%)가 우점하여 계절적 차이가 반영된 것으로 판단된다. 동일 지역(군산) 꿀벌 타입별로 비교해 보면 양봉꿀에서 Amaryllidaceae의 비율이 높게 나타났다. 속 수준에서는 *Rosa*, *Brassica*, *Styrax*, *Toxicodendron*, *Castanea* 등 산림성 활엽수 교목 및 관목류와 초지성 초본식물(십자화과)이 전반적으로 우점하였다.

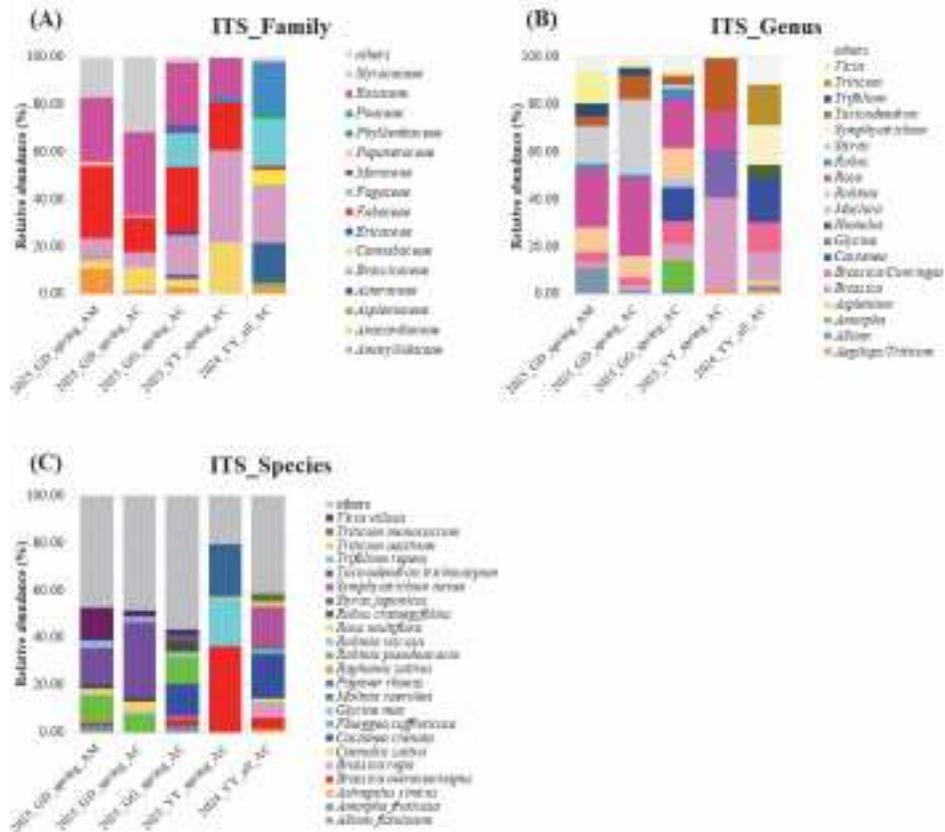
속(genus) 수준 분석 결과 지역 간 비교 결과, 영양 시료(2025_YY_spring_AC)에서는 *Brassica*(38.8%), *Toxicodendron*(22.1%), *Glycine*(20.2%) 속이 우점하여, 십자화과 작물과 산림성 자원이 모두 기여한 것으로 나타난다. 반면, 군산 지역 시료(2025_GD_spring_AM, 2025_GD_spring_AC, 2025_GG_spring_AC)에서는 *Rosa*(24-33%), *Styrax*(15-32%), *Robinia*(9-13%) 속의 비율이 높아, 초여름 개화기에 풍부한 교목성 밀원식물이 주요 자원으로 작용함을 시사한다. 특히 *Amorpha*(12.2%) 속은 금성리 시료에서만 높게 검출되어, 지역별 식생과 개화 시기의 차이를 반영한 것으로 보인다. 동일 지역(군산) 꿀벌 타입별로 비교해 보면 양봉꿀은 *Rosa*(24.4%), *Vicia*(14%), *Allium*(10.7%), *Trifolium*(5.3%) 속 비율이 높았다. 재래꿀의 경우, 양봉꿀보다 *Rosa*(32.7%) 와 *Styrax*(31.8%)속이 약 1.5-2배 높은 비중으로 우점하였다. 이는 *A. cerana*가 *A. mellifera*와 비교했을 때, 교목성 자원과 개화 밀도가 높은 수목류를 선호하는 채집 특성이 있을 것으로 추정된다.

종(species) 수준 분석 결과, 주요 밀원식물은 *Styrax japonicus*, *Brassica oleracea/napus*, *Castanea crenata*, *Robinia pseudoacacia*, *Toxicodendron trichocarpum*, *Glycine max*, *Vicia villosa*, *Symphotrichum novae* 등으로 확인되었다. 꿀벌 타입별 비교에서, 재래꿀에서는 *Styrax japonicus*(최대 31.7%), *Brassica oleracea/napus*(최대 36.3%), *Toxicodendron trichocarpum*(최대 22.1%), *Glycine max*(최대 20.2%), *Robinia pseudoacacia*(7.4-11%) 등이 주요 밀원으로 나타났다. 반면, 양봉꿀에서는 *Styrax japonicus*(15.5%), *Vicia villosa*(13.8%), *Robinia pseudoacacia*(9.6%) 등이 나타났다. 군산 지역 시료(2025_GD_spring_AM, 2025_GD_spring_AC, 2025_GG_spring_AC)가 공통적으로 *Styrax japonicus*와 *Robinia pseudoacacia*가 도출되었으며, 교목성 밀원자원의 비중이 높았다. 반면, 영양 지역 시료(2025_YY_spring_AC)에서는 *Brassica oleracea/napus*, *Toxicodendron trichocarpum*, *Glycine max*가 주요 밀원으로 검출되어, 산림성 및 초본성 식물이 주된 밀원식물 자원으로 나타났다. 2024년 영양 시료(2024_YY_all_AC)에서는 *Castanea crenata*(19.1%)와 *Symphotrichum novae*(16.7%)가 상대적으로 높은 비중을 보였는데, 이는 채취 시기 및 시료 보존 기간에 따른 밀원 DNA 조성 차이를 반영한 결과로 판단된다.

〈표 II-1-19〉 Relative abundance based on ITS ASVs at the family, genus, species level

ITS_family	2025_GD_spring_AM	2025_GD_spring_AC	2025_GG_spring_AC	2025_YY_spring_AC	2024_YY_all_AC
Amaryllidaceae	10.70	1.26	2.64	0.00	2.91
Anacardiaceae	4.23	10.04	3.89	22.14	0.00
Aspleniaceae	0.00	0.00	0.00	0.00	2.06
Asteraceae	0.26	0.00	1.58	0.00	16.76
Brassicaceae	8.59	6.26	16.95	38.75	24.56
Cannabaceae	0.00	0.00	0.00	0.00	6.38
Ericaceae	0.00	0.00	1.43	0.00	0.00
Fabaceae	30.44	14.94	27.30	20.18	1.45
Fagaceae	0.05	0.00	14.05	0.00	20.25
Moraceae	0.00	0.00	3.63	0.00	0.00
Papaveraceae	1.42	0.70	0.00	0.00	0.00
Phyllanthaceae	0.00	0.00	0.00	0.00	1.97
Poaceae	0.05	0.21	0.82	2.51	21.45
Rosaceae	27.32	34.84	25.25	16.42	0.34
Styracaceae	15.74	31.75	1.64	0.00	0.00
others	1.18	0.00	0.82	0.00	1.88
ITS_genus	2025_GD_spring_AM	2025_GD_spring_AC	2025_GG_spring_AC	2025_YY_spring_AC	2024_YY_all_AC
<i>Aegilops/Triticum</i>	0.00	0.00	0.00	2.01	1.44
<i>Allium</i>	10.70	1.26	1.65	0.00	2.14
<i>Amorpha</i>	0.31	0.00	12.24	0.00	0.00
<i>Asplenium</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	2.06
<i>Brassica</i>	2.63	2.55	7.35	38.75	12.03
<i>Brassica/Conringia</i>	4.01	3.07	9.60	0.00	12.53
<i>Castanea</i>	0.00	0.00	14.05	0.00	19.14
<i>Glycine</i>	0.00	0.00	0.00	20.18	0.00
<i>Humulus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	5.29

<i>Maclura</i>	0.00	0.00	3.63	0.00	0.00
<i>Robinia</i>	10.48	9.10	13.04	0.00	0.00
<i>Rosa</i>	24.42	32.67	20.69	16.42	0.00
<i>Rubus</i>	2.58	1.76	4.56	0.00	0.00
<i>Styrax</i>	15.74	31.75	1.64	0.00	0.00
<i>Symphotrichum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	16.76
<i>Toxicodendron</i>	4.23	10.04	3.89	22.14	0.00
<i>Trifolium</i>	5.27	3.22	0.00	0.00	0.00
<i>Triticum</i>	0.00	0.00	0.00	0.50	17.08
<i>Vicia</i>	13.99	2.62	2.02	0.00	0.00
others	5.63	1.95	5.65	0.00	11.52
ITS_species	2025_GD_spring _AM	2025_GD_spring _AC	2025_GG_spring _AC	2025_YY_spring_ AC	2024_YY_all_AC
<i>Allium fistulosum</i>	1.72	0.00	0.16	0.00	0.00
<i>Amorpha fruticosa</i>	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00
<i>Astragalus sinicus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45
<i>Brassica oleracea/napus</i>	0.48	0.00	3.65	36.29	5.07
<i>Brassica rapa</i>	0.44	0.00	0.56	0.00	6.49
<i>Cannabis sativa</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09
<i>Castanea crenata</i>	0.00	0.00	14.05	0.00	19.14
<i>Flueggea suffruticosa</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.97
<i>Glycine max</i>	0.00	0.00	0.00	20.18	0.00
<i>Molinia caerulea</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16
<i>Papaver rhoeas</i>	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Raphanus sativus</i>	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Robinia pseudoacacia</i>	9.60	7.41	11.12	0.00	0.00
<i>Robinia viscosa</i>	0.88	1.57	1.93	0.00	0.00
<i>Rosa multiflora</i>	2.15	3.84	0.43	0.79	0.00
<i>Rubus crataegifolius</i>	1.81	1.76	4.56	0.00	0.00
<i>Styrax japonicus</i>	15.51	31.72	1.64	0.00	0.00
<i>Symphotrichum novae</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	16.65
<i>Toxicodendron trichocarpum</i>	0.00	0.00	1.05	22.14	0.00
<i>Trifolium repens</i>	3.23	2.55	0.00	0.00	0.00
<i>Triticum aestivum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	2.31
<i>Triticum monococcum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	3.18
<i>Vicia villosa</i>	13.81	2.62	2.02	0.00	0.00
Others	47.24	48.52	56.63	20.60	41.50



〈그림 II-1-9〉 ITS ASVs 기반 과(A), 속(B), 종(C) 수준에서의 식물 분류군 상대 비율

rbcL 유전자를 기반으로, 과(family) 수준 분석 결과, 주요 밀원식물은 Poaceae, Rosaceae, Pinaceae, Ebenaceae(or Juglandaceae), Anacardiaceae, Magnoliaceae, Fabaceae, Actinidiaceae 등으로 구성되었으며, 지역 및 꿀벌 타입에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 지역 간 비교에서, 군산 지역 시료(2025_GD_spring_AM, 2025_GD_spring_AC, 2025_GG_spring_AC)는 Rosaceae(최대 56.6%), Fabaceae(6.4-20.8%), Anacardiaceae(최대 35.9%), Magnoliaceae(최대 31.5%), Ebenaceae(or Juglandaceae) (최대 43.5%)가 우점하였다. 봄철 영양 지역 양봉꿀(2025_YY_spring_AC)에서는 Pinaceae (52.1%), Rosaceae(15%), Actinidiaceae(13.5%), Anacardiaceae(13.0%), 등이 검출되었다. 2024년 시료(2024_YY_all_AC)는 Poaceae(100%)가 단독으로 검출되어, 시료 채취 시기 및 시료 노화에 따른 식물 DNA 편중이 반영된 결과로 판단된다. 동일지역(군산) 꿀벌 타입별로 비교해보면 재래꿀(2025_GD_spring_AC)에서는 Anacardiaceae(35.9%) 및 Magnoliaceae(31.5%)의 비율이 크게 높지만, 양봉꿀(2025_GD_spring_AM)에서는 Rosaceae(56.6%) 및 Fabaceae(20.8%)의 비중이 크게 높아, 두 꿀벌 종의 선호 식생 차이가 과 수준에서도 반영되었다.

rbcL 서열 기반 속(genus) 수준 분석 결과, 봄철 주요 밀원식물은 *Pinus*, *Rosa*, *Diospyros/Juglans*, *Toxicodendron*, *Liriodendron*, *Prunus*, *Actinidia* 등으로 대부분 봄철~초여름에 개화하는 산림성 교목(활엽수 및 침엽수) 및 관목성 활엽수로 구성되었다. 지역 간 비교에서, 군산 지역 시료(2025_GD_spring_AM, 2025_GD_spring_AC, 2025_GG_spring_AC)는 전반적으로 교목성 및 관목성 밀원식물의 비중이 높았고 초본성 밀원식물도 일부 검출되었다. 재래꿀(2025_GD_spring_AC)에서는 *Toxicodendron*(35.9%)과 *Liriodendron*(31.5%)이 월등히 높았으며, *Paulownia*(6.3%)와 *Carex*(3.4%)도 일부 검출되었다. 동일 지역

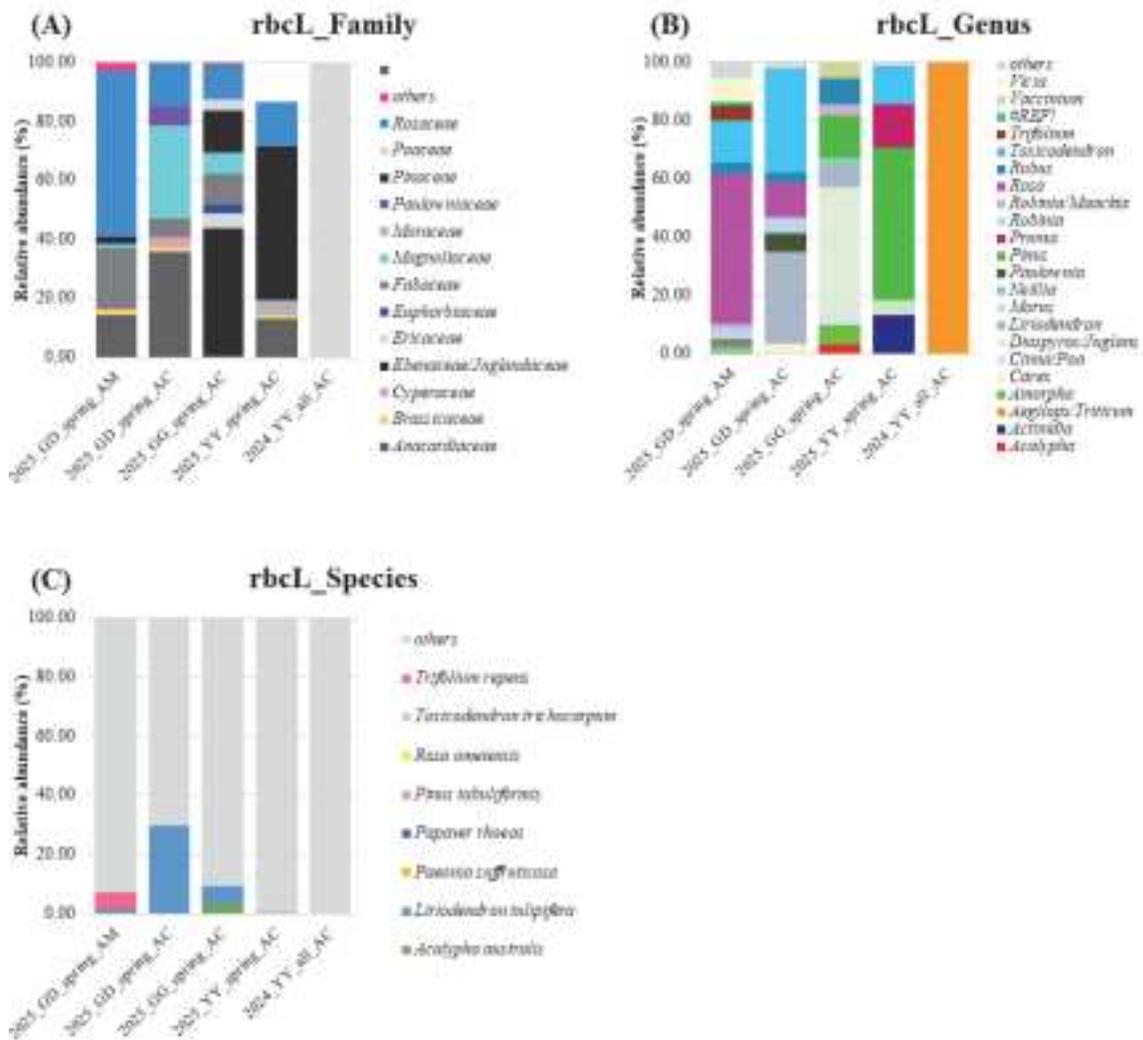
양봉꿀(2025_GD_spring_AM)에서는 Rosa(51.2%)가 압도적으로 우점하였으며, *Toxicodendron*(14.4%), *Vicia*(8.2%) 및 *Trifolium*(5.3%) 등이 검출되었다. 이는 동일한 지역 내에서도 꿀벌 종에 따라 선호 채집 식물 차이를 보인다. 군산 금성리 시료(2025_GG_spring_AC)에서는 *Diospyros*(or *Juglans*) (43.5%)와 *Rubus* (8.6%)가 우점하였다. 반면, 영양 지역 시료(2025_YY_spring_AC)는 *Pinus*(52.1%), *Prunus*(15.0%), *Actinidia*(13.5%) 및 *Toxicodendron*(13.0%) 등이 주요 밀원식물로 검출되었으며, 이들은 산림성 교목(활엽수 및 침엽수)과 덩굴성 활엽수로 구성되어 있다. 2024년 영양 지역 시료(2024_YY_all_AC)는 *Aegilops*(or *Triticum*) (100%)만 검출되었으며, 이는 채취 시기 및 장기 보관에 따른 DNA 편중이 반영된 결과로 판단된다.

rbcL 유전자 기반 종(species) 수준 분류는 ITS 기반 분석과 달리, 대부분의 ASV(약 70-100%)가 NCBI 데이터베이스 BLASTN 검색 결과에서 복수의 taxon이 동일한 identity 값으로 매칭되었기 때문에, 종 수준에서의 신뢰도 있는 분류 및 해석은 불가능한 것으로 확인하였다.

〈표 II-1-20〉 rbcL ASVs 기반 family, genus, species 수준 상대비율 비교

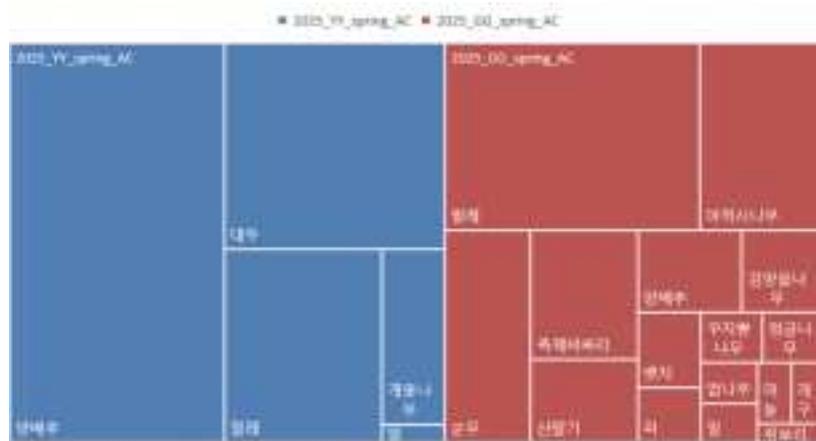
rbcL-family	2025_GD_spring_AM	2025_GD_spring_AC	2025_GG_spring_AC	2025_YY_spring_AC	2024_YY_all_AC
Actinidiaceae	0.00	0.00	0.00	13.45	0.00
Anacardiaceae	14.42	35.90	0.27	13.00	0.00
Brassicaceae	1.58	1.52	0.00	1.51	0.00
Cyperaceae	0.36	3.35	0.00	0.00	0.00
Ebenaceae/ Juglandaceae	0.00	0.00	43.53	0.00	0.00
Ericaceae	0.00	0.00	4.97	0.00	0.00
Euphorbiaceae	0.00	0.00	3.14	0.00	0.00
Fabaceae	20.79	6.35	10.42	0.00	0.00
Magnoliaceae	1.35	31.49	7.18	0.00	0.00
Moraceae	0.00	0.00	0.00	4.87	0.00
Paulowniaceae	0.21	6.30	0.00	0.00	0.00
Pinaceae	1.96	0.00	14.36	52.13	0.00
Poaceae	0.00	0.00	3.63	0.00	100.00
Rosaceae	56.58	15.07	11.96	15.04	0.00
others	2.75	0.03	0.53	0.00	0.00
rbcL-genus	2025_GD_spring_AM	2025_GD_spring_AC	2025_GG_spring_AC	2025_YY_spring_AC	2024_YY_all_AC
<i>Acalypha</i>	0.00	0.00	3.14	0.00	0.00
<i>Actinidia</i>	0.00	0.00	0.00	13.45	0.00
<i>Aegilops/Triticum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	100
<i>Amorpha</i>	0.36	0.00	6.88	0.00	0.00
<i>Carex</i>	0.36	3.35	0.00	0.00	0.00
<i>Cinna/Poa</i>	0.00	0.00	3.63	0.00	0.00
<i>Diospyros/Juglans</i>	0.00	0.00	43.53	0.00	0.00
<i>Liriodendron</i>	1.04	31.49	7.18	0.00	0.00
<i>Morus</i>	0.00	0.00	0.00	4.87	0.00
<i>Neillia</i>	0.01	0.00	3.04	0.00	0.00
<i>Paulownia</i>	0.21	6.30	0.00	0.00	0.00
<i>Pinus</i>	1.96	0.00	14.36	52.13	0.00
<i>Prunus</i>	0.70	0.00	0.00	15.04	0.00
<i>Robinia</i>	3.80	5.07	0.08	0.00	0.00
<i>Robinia/Maackia</i>	1.98	0.66	3.46	0.00	0.00

<i>Rosa</i>	51.15	11.76	0.32	0.00	0.00
<i>Rubus</i>	3.88	3.31	8.60	0.00	0.00
<i>Toxicodendron</i>	14.40	35.90	0.27	13.00	0.00
<i>Trifolium</i>	5.32	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Vaccinium</i>	0.00	0.00	4.97	0.00	0.00
<i>Vicia</i>	8.23	0.00	0.00	0.00	0.00
others	6.61	2.17	0.53	1.51	0.00
rbcl-species	2025_GD_spring_AM	2025_GD_spring_AC	2025_GG_spring_AC	2025_YY_spring_AC	2024_YY_all_AC
<i>Acalypha australis</i>	0.00	0.00	3.14	0.00	0.00
<i>Liriodendron tulipifera</i>	1.04	29.93	6.11	0.00	0.00
<i>Paeonia suffruticosa</i>	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Papaver rhoeas</i>	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Pinus tabuliformis</i>	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00
<i>Rosa omeiensis</i>	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Toxicodendron trichocarpum</i>	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00
<i>Trifolium repens</i>	5.32	0.00	0.00	0.00	0.00
Others	92.97	70.07	90.76	99.19	100.00

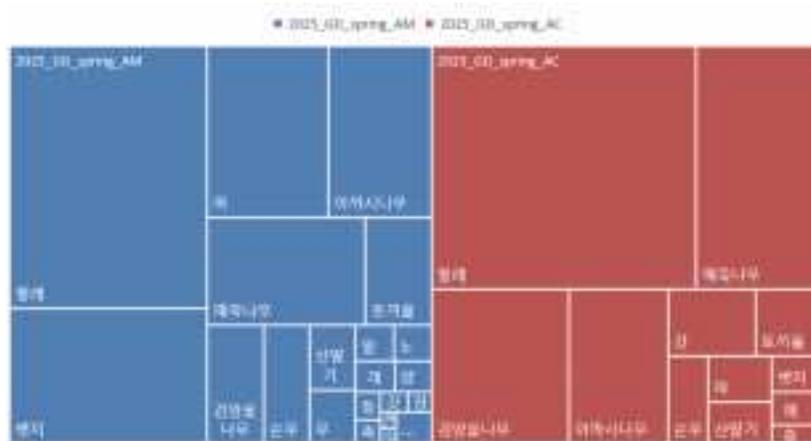


〈그림 II-1-10〉 rbcL ASVs 기반 과(A), 속(B), 종(C) 수준에서의 식물 분류군 상대 비율

재래꿀벌의 지역별 봄철 화분매개 자원으로 영양은 총 5종으로 찔레, 양배추, 대두, 개웃나무, 밀이 나왔으며, 군산은 총 16종으로 찔레, 아까시나무, 순무, 족제비싸리, 산딸기, 양배추, 검양꽃나무, 벚지, 파, 꾸지뽕나무, 정금나무, 밤나무, 밀, 마늘, 개구리자리, 쥐보리가 확인되었다. 동일 지역의 종별 봄철 화분매개 자원으로 *A.mellifera*는 총 30종으로 찔레, 벚지, 파, 아까시나무, 때죽나무, 토끼풀, 검양꽃나무, 순무, 산딸기, 무, 분홍아까시, 밀, 노린재나무, 개양귀비, 양배추, 등, 족제비싸리, 갓, 장딸기, 큰방가지뚱, 수리딸기, 중국단풍, 팔배나무, 유채, 벗나무, 등갈퀴나무, 살갈퀴, 버드나무속, 매발톱, 작약이 나왔고, *A.cerana*는 12종으로 찔레, 때죽나무, 검양꽃나무, 아까시나무, 갓, 토끼풀, 순무, 파, 산딸기, 벚지, 애기뚱풀, 중국체리가 확인되었다.



〈그림 II-1-11〉 지역별 차이(영양 5종, 군산 16종)



〈그림 II-1-12〉 종별 차이(양봉꿀벌_AM 30종, 재래꿀벌_AC 12종)

(3) 연구 대상종 서식지 생태계서비스 가치 평가

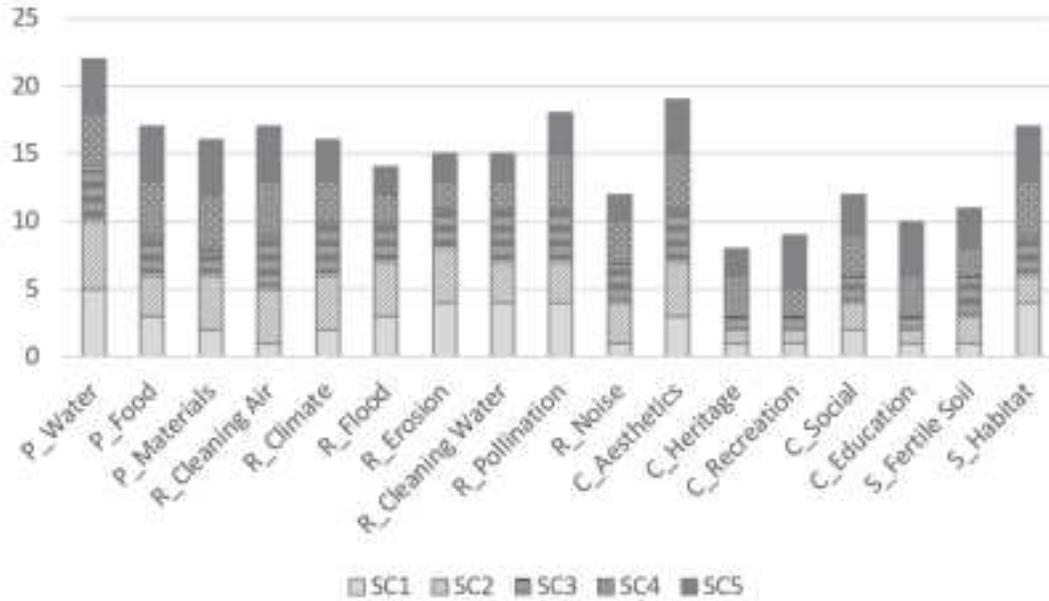
재래꿀벌은 개체군이 직접 서식지를 선택하기보다는 양봉가의 지식이나 경험 등을 토대로 설치된다. 재래꿀벌 양봉가 대상 생태계서비스 가치 평가를 위해 연구 대상지는 충청남도 서천군으로 농경지와 산림, 해양습지 등 다양한 생태계 유형을 가진 지역이다. 양봉가는 총 5곳으로 SC1 SC2 ...SC5로 각 양봉가를 중심으로 3 km 반경의 생태계 유형을 파악하였다.

〈표 II-1-21〉 Proportion(%) of Ecosystem Types within 3 km Radius around Bee Colonies

Name	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
Residential area	2.4	2.4	4.3	1.1	2.2
Industrial area	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Commercial area	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Cultural/Sports/Leisure area	1.3	1.4	1.2	0.5	1.5
Transportation area	0.1	0.1	0.4	0.0	0.1
Paddy field	26.4	29.1	45.2	14.2	28.5
Upland field	13.2	13.2	14.7	9.1	6.0
Greenhouse area	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0
Orchard	0.5	0.5	0.0	0.7	0.8
Other cultivation	0.7	0.8	0.3	0.3	0.1
Deciduous forest	10.1	9.0	3.9	22.9	10.5
Coniferous forest	31.5	30.5	14.6	34.9	41.6
Mixed forest	9.0	8.2	3.4	15.5	6.7
Natural grass	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
Artificial grass	1.4	1.3	1.2	0.5	0.6
Inland wetland	0.4	0.6	0.7	0.0	0.0
Coastal wetland	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0
Natural barren	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Artificial barren	1.8	1.8	1.2	0.2	0.0
Inland water	0.8	0.8	0.6	0.1	0.6
Marine water	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0

SC1과 SC2 지역은 연접한 지역으로 산림과 농경지가 골고루 분포하는 지역인 반면, SC3 지역은 논 중심에 낮은 아산과 해안 습지 등이 다양하게 분포하고 있다. SC4와 SC5 지역은 산림 위주의 생태계 유형을 가지고 있다(표 II-1-21). 꿀벌의 생활사와 밀접하게 연관이 되는 먹이활동, 서식지의 다양성과 같은 생물적 요인, 지역사회 교류, 교육 등 사회·문화적 요인 그리고 복합적인 스트레스로 영향을 주는 토지이용, 농약, 공기오염, 기후요인 등이 수분서비스에 영향을 준다(IPBES, 2016; Duque et al., 2024; Dainese et al, 2019). 서식유형 중 높은 비율을 차지하는 벼는 풍매화(wind pollination, Anemophily)이거나 자가수분(self-pollination, autogamy) 작물이며 꿀이 매우 적거나 거의 없지만, 벼, 밀, 옥수수 등 화분을 먹이로 수집하기 때문에 벌 군집에 인접한 논에 사용되는 살충제, 제초제, 살균제 등이 부정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Liu et al., 2022). 그 외에는 침엽수와 밭이 주요한 유형으로 구성되어 있었다. 양봉가들이 언급하는 주요한 밀원 자원(신나무, 헛개나무)을 제공하는 것으로 활엽수림과 혼효림 등이 있다. 과수원과 기타 작물 지역도 있었으나 비율은 미미하였다. 생태계서비스 간이평가를 통해 양봉장 5곳에 대한 생태계서비스 항목별 평가 및 전반적인 생태계서비스 평가를 확인하였다. 물공급(평균 4.4), 경관가치(평균 3.8), 꽃가루받이(평균

3.6) 서식처 제공(3.4) 항목에 대하여 높게 평가가 되었다. 반면 문화유산, 여가 또는 관광과 같은 문화서비스가 평균 2점 이하로 낮게 평가되었다. 벌 서식지로 활동하는 데 직접적인 영향을 줄 수 있는 물, 수분, 서식처 제공에 대한 항목은 높게 평가되었으나 문화서비스 제공에 대한 부분 낮게 평가되었다(그림 II-1-13).



〈그림 II-1-13〉 이해당사자 대상 양봉장 주변 생태계서비스 정성평가 결과

수분서비스와 서식지에 대한 인식은 개인의 경험과 경력 차이에 따라 뚜렷하게 구분되었다. 경력이 높은 양봉인은 전반적으로 생태계서비스 가치를 높게 평가하는 경향을 보였으며, 반대로 경력이 짧은 응답자들은 항목별 편차가 상대적으로 컸다. 또한 풍부한 밀원자원과 안정적인 서식지를 확보한 양봉가들은 대체로 높은 만족도를 보였으나, 자원이 부족하거나 서식지가 불안정한 경우 평가 점수가 낮았고, 정책적 지원 필요성을 강하게 표현하였다. 계절별 활동에 대한 응답에서는 봄철 자원 부족이 가장 심각하게 지적되었다. “꽃이 피기 시작하는 봄에는 꿀벌이 나가도 먹을 것이 없다”라는 현장 경험은 봄철 수분서비스 저하와 직결되는 문제로 반복 언급되었다. 가을철에는 상대적으로 밀원자원이 풍부해 활동 빈도가 높게 유지되었다. 이처럼 계절적 밀원 변동이 서식 안정성과 수분서비스를 좌우하는 핵심 요인으로 나타났다. 전반적인 인식을 참고하기 위해 진행된 인터뷰 내용의 텍스트 분석에서는 ‘꿀’, ‘토봉’, ‘헛개나무’, ‘신나무’, ‘밀원’, ‘낭충봉아부패병’ 등이 도출되었다. 이는 인터뷰 서술과 일관되게, 특정 밀원수종의 중요성과 전염병 관리가 주요 관심사임을 확인하였다. 위협요인 평가에서는 외래생물(등검은말벌, 질병 등)에 대한 경계가 가장 높게 나타났고, 이어 개발압력, 환경오염, 과이용, 기후변화 순으로 인식되었다. 이는 토종별 양봉가들이 서식지 축소, 농약 사용, 병해충 확산 등을 직접적인 위협으로 체감하고 있음을 보여준다.

(4) 모델 평가

수분서비스는 생물다양성 유지를 위한 핵심 생태계서비스로 관련 연구는 주로 수분매개자의 서식 적합성과 수분서비스의 공급 및 수요의 공간적 분포를 분석하는 방향으로 발전해 왔다. 초기에는 토지이용 및 피복 정보를 활용하여 Lonsdorf 모형 기반 평가가 주로 이루어졌으며, 단순한 서식지 질과 먹이자원 접근성을 고려한 기본 모형으로 전 세계적으로 가장 널리 활용되고 있다(Lonsdorf et al., 2009). 이후 ESTIMAP

모형은 유럽 환경에 최적화되어 생태계서비스 통합평가가 가능하도록 확장되었으며(Zulian et al., 2013, 2018), InVEST Pollination Model은 수분매개자의 비행거리, 꽃자원 가용성, 작물 수분 의존도를 함께 고려하여 공급-수요 불균형을 시각화할 수 있는 대표적 도구로 발전하였다(Sharp et al., 2020). 한편, PollMap 모형은 Lonsdorf 기반 접근법의 한계를 보완하기 위해 벌의 행동생태학적 이동 패턴(Central Place Foraging, CPF)을 반영한 형태로 제안되었으며, 공간해상도가 높고 토지이용 구조를 세밀하게 고려하여 보다 현실적인 수분서비스 평가가 가능하게 되었다(Rahimi et al., 2021).

〈표 II-1-22〉 수분서비스 평가 모형 및 특징

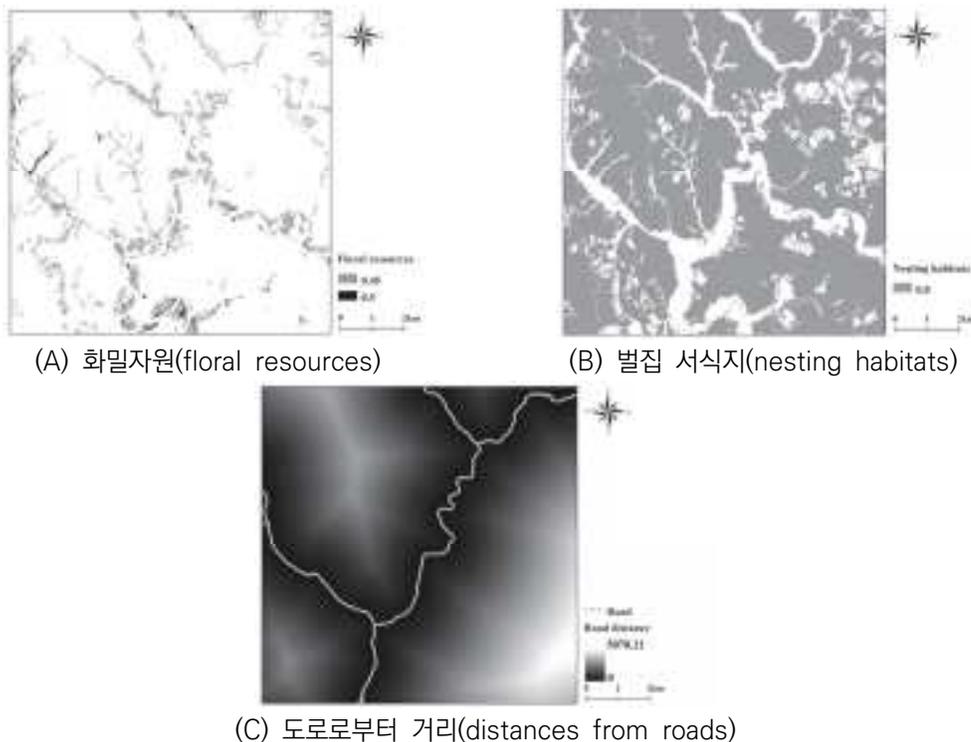
구분	Lonsdorf 모형	ESTIMAP	PollMap	InVEST Pollination Model
기본 개념	벌의 서식지 자원(habitat resources)과 먹이자원(floral resources)의 공간적 분포를 결합하여 수분서비스 잠재력 평가	Lonsdorf 기반이지만, 유럽의 경관 특성을 반영한 확장형, 이용자 맞춤형 GIS 도구	Lonsdorf의 한계를 보완하여 벌의 이동 거리, 자원 질(quality), 경관 가장자리 효과를 고려한 CPF (Central Place Foraging) 기반 모형	Lonsdorf 모형을 통합한 형태로 공급-수요 개념을 적용해 작물 수분서비스 정량화
모형 접근 방식	단순화된 서식지 질과 먹이자원 접근성 모델	공간 단위별 잠재 공급지수 산출(전역적 평가 지향)	벌 개체의 행동생태학적 이동 패턴(CPF) 반영	서식지 가중치와 함께 비행거리 함수로 수분 공급 정량화 및 작물 수요지와 매칭
주요 입력 자료	토지이용/피복, 벌 서식지 적합도, 비행거리	토지이용, 식생, 기후, 벌 활동률, 평균 비행거리 등	벌 종류별 비행거리, 먹이자원 질, 경관 구조(가장자리 포함)	토지이용/피복, 벌 서식지 질, 꽃자원 가용성, 비행거리
분석 단위	Raster 기반 격자 단위	Raster / Vector 혼용 가능	Raster 기반 공간분석	Raster 기반(기본 30 m)
특징	- 구획이 간단하고 접근성 높음 - 전 세계적으로 가장 널리 활용된 기본 모형	- 유럽 환경에 최적화 - 생태계서비스 통합평가 가능(ESTIMAP Suite에 포함) - 상대적으로 시각화 기능 우수	- 벌 행동생태 기반으로 현실성 높음 - 비농업지역 적용 가능성 높음	- 공급-수요 연계 평가 가능 - 작물 수분서비스 정량화 가능
한계	- 자원 질(quality) 반영 미흡 - 단일 비행거리 가정	- 코드 공개 제한 - 벌 종류 세분화 어려움	- 상대적으로 복잡한 입력 자료 요구 - 일부 변수 추정 불확실성	- 농업 중심 평가에 치우침 - 비농업 지역의 생태적 기여 반영 한계
적용성	산림, 농경지, 초지 등 광범위	유럽 대상 경관 평가에 적합	도시 및 산림 포함 다양한 경관에 적용 가능	농경지 중심의 수분서비스 공급-수요 평가에 적합
참고문헌	Lonsdorf et al., (2009)	Zulian et al., (2013, 2018)	Rahimi et al., (2021b)	Sharp et al., (2020)

PollMap은 InVEST에 비해 상대적으로 간단한 구조로 되어 있으며, 입력자료를 통해 직관적인 수분서비스 지도를 생성할 수 있다. 이 모형은 두 개의 주요 입력자료인 화밀자원(floral resources)과 벌집 서식지(nesting habitats) 참조 값이 필요하며, 각 픽셀에 대해 0-1 사이의 상대적 잠재력 값을 부여해야 한다(표 II-1-23). 또한, 모형 구동을 위해서는 벌의 최대 비행 가능한 이동 거리와 셀 크기를 바탕으로 계산한 알파(Alpha, α) 값을 필수적으로 입력해야 한다. 환경 요인을 반영할 경우, 상호작용에 해당하는 각 요인의 상대적 중요도에 따라 가중치(weight)를 설정함으로써 수분서비스의 공간 분포를 보다 현실적이고 정밀하게 분석할 수 있다(Rahimi, 2021; Rahimi et al., 2021b).

〈표 II-1-23〉 PollMap 구동을 위한 입력자료

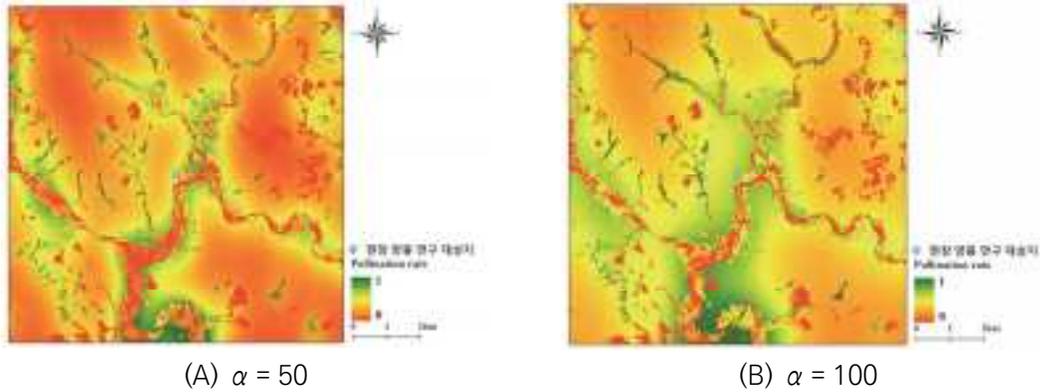
항목	설명
Floral resources	꽃 자원이 있는 지역(예: 밭, 과수원 등)
Nesting habitats	벌집을 짓고 서식할 수 있는 지역(예: 산림)
α (Alpha)	벌의 최대 비행 가능한 이동거리 ÷ 셀 크기
w (Weight)	공간적 상호작용의 가중치

벌집 서식지에 대한 입력값 구축을 위해 대상으로 선정한 재래꿀벌(*Apis cerana*)이 산지 또는 초지의 죽은 나무 속, 바위틈, 굴 속 등 수직 공간에 집을 짓는 생태적 특성(국립생물자원관, 2018)을 반영하여 InVEST 입력자료 중 nesting Cavity Availability Index 값만을 활용하였다. 화밀자원에 대해서는 봄과 여름으로 구분된 floral resources index 값을 평균화하여 입력값으로 사용하였다. 벌집 서식지는 활엽수림, 침엽수림, 혼효림을 포함하는 산림 지역에 대해 동일하게 0.80을 부여하였으며, 화밀자원은 경지 정리가 된 밭, 경지 정리가 안 된 밭, 과수원에 대해 각각 0.45, 0.45, 0.50의 값을 적용하였다. 일반적으로 재래꿀벌은 500 m 내외로 먹이를 채집하지만, 특정 환경 조건에서는 최대 3 km까지 비행하는 연구 결과를 확인하였다(Hyatt, 2012). 이를 기반으로 벌의 비행 가능한 이동 거리를 셀 단위로 환산한 α 값은 국내 재래꿀벌의 일반적인 비행 이동거리 범위에 해당하는 500 m와 1,000 m를 래스터 셀 크기인 10 m로 나누어 계산하여 최종적으로 각각 50과 100으로 구동하였다(그림 II-1-20). 이와 함께 도로가 벌의 행동과 이동에 끼치는 부정적인 영향을 반영하기 위해 퍼지 함수를 적용하였다. 즉, 도로로부터 10 m 이내 구간에는 최대 영향값(1)을 부여하고, 100 m 이내까지는 영향이 선형적으로 감소하도록 설정하였으며, 거리 기반 가중치(w)는 0.5로 적용하였다. 도로에 대한 공간정보로 국가교통데이터베이스(2023)의 도로망 자료를 활용하였다.



〈그림 II-1-14〉 수분서비스 현장 양봉 연구 대상지 PollMap 입력자료
(A: floral resources, B: nesting habitats, C: distances from roads)

A는 α 를 50으로, B는 100으로 설정하여 PollMap을 통해 수분서비스를 시뮬레이션한 결과로 벌은 벌집 서식지에서부터 α 범위 내에 존재하는 먹이자원만을 수분의 대상으로 인식하며, α 가 클수록 더 넓은 범위에서 수분서비스를 제공할 수 있음을 의미한다.



〈그림 II-1-15〉 수분서비스 현장연구 대상지 PollMap 결과(A: $\alpha = 50$, B: $\alpha = 100$)

도로로부터 거리가 먼 곳일수록 수분서비스 잠재력이 높게 나타났으며, 비행 가능한 이동 거리가 짧을수록 벌이 제공할 수 있는 수분서비스의 공간적 범위가 제한되었다. 결과적으로, 비행거리가 짧은 종일수록 도로와 같은 인공적 장벽의 영향을 더 많이 받으며, 이는 수분서비스의 공간적 단절 또는 감소로 이어질 수 있음을 시사한다. 이는 벌의 비행 능력에 따라 수분서비스의 공간적 불균형이 달라질 수 있다는 것을 의미한다.

수분서비스 연구 표준지인 경상북도 영양군 일월면 일대를 대상으로 InVEST를 구동하기 위해 필수 입력 자료인 길드 표(guild table)를 작성하였다(표 II-1-24). PollMap 결과와 InVEST 결과를 비교 분석하기 위해 재래꿀벌(*Apis cerana*)의 생태적 특성을 고려하여 InVEST 수분서비스 모델 길드 표의 벌집 서식지 적합성 지수(nesting suitability index) 및 먹이활동 지수(foraging activity index), Alpha (α), 상대적 풍부도(relative abundance)에 대한 값을 작성하였다. 우리나라 농업에서 재래꿀벌은 서양꿀벌(*Apis mellifera*)에 비해 군체 크기가 작고 경제적 실용성이 낮아 실제 현장 활용이 제한적이고 활용 빈도도 매우 낮은 수준으로 보고되고 있다(윤형주 등, 2017; 국립농업과학원, 2021). 그러나 사과나무를 대상으로 수행된 수분 활동 비교 실험에서는 서양꿀벌과 재래꿀벌 간 유의미한 차이를 발견하지 못했고, 오히려 뒤편벌(*Bombus pascuorum*)보다 높은 수분활동 빈도를 보이는 것으로 확인되었다(Kim et al., 2024; Jung, 2021). 이에 따라 재래꿀벌의 봄철 먹이활동에 대한 지수를 0.13에서 1.00으로, 여름철 먹이활동에 대한 값은 0.48에서 0.80으로 수정하였다. 벌의 비행거리를 나타내는 α 값은 Greenleaf et al., (2007)과 Hyatt (2012)를 참고하여 500 m와 1,000 m를 적용하였으며, 상대적 풍부도(Relative abundance)는 값의 총합이 1이 되어야 하므로 1차 연도 값의 0.74에서 1로 조정하여 수분서비스를 평가하였다. 또한, 재래꿀벌에 초점을 맞추어 구동한 PollMap과의 결과 비교를 위해 InVEST 입력자료 중 nesting ground availability index의 값은 모두 0으로 하여 구동하였다(표 II-1-25).

〈표 II-1-24〉 InVEST 구동을 위한 길드 표(guild table)

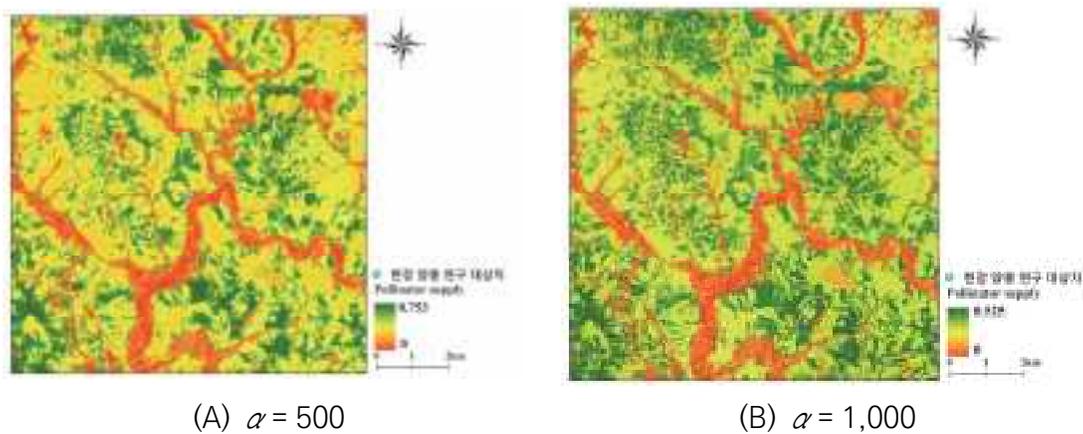
항목	대상 종
	재래꿀벌(<i>Apis cerana</i>)
Nesting suitability cavity index	1
Nesting suitability ground index	0
Foraging activity spring index	1
Foraging activity summer index	0.8
Alpha (α)	500, 1000
Relative abundance	1

〈표 II-1-25〉 InVEST 구동을 위한 생·물리적 표

lucode	토지피복 유형	nesting cavity availability index	nesting ground availability index	floral resources spring index	floral resources summer index
111	단독주거시설	0.18	0	0.25	0.2
112	공동주거시설	0.1	0	0.2	0.15
121	공업시설	0	0	0	0
131	상업·업무시설	0	0	0	0
132	혼합지역	0	0	0	0
141	문화·체육·휴양시설	0.2	0	0.3	0.25
151	공항	0	0	0	0
152	항만	0	0	0	0
153	철도	0	0	0	0
154	도로	0	0	0	0
155	기타교통·통신시설	0	0	0	0
161	환경기초시설	0	0	0	0
162	교육·행정시설	0	0	0	0
163	기타 공공시설	0	0	0	0
211	경지정리가 된 논	0.1	0	0	0.35
212	경지정리가 안 된 논	0.1	0	0	0.5
221	경지정리가 된 밭	0.15	0	0.48	0.5
222	경지정리가 안 된 밭	0.2	0	0.68	0.55
231	시설재배지	0	0	0	0
241	과수원	0.25	0	0.7	0.5
251	목장·양식장	0.3	0	0.9	0.8
252	기타재배지	0.3	0	0.68	0.5
311	활엽수림	0.93	0	0.7	0.6
321	침엽수림	0.6	0	0.4	0.45
331	혼효림	0.82	0	0.75	0.63
411	자연초지	0.3	0	1	0.78
421	골프장	0.25	0	0.35	0.3
422	묘지	0.2	0	0.4	0.4
423	기타초지	0.6	0	0.6	0.55

lucode	토지피복 유형	nesting cavity availability index	nesting ground availability index	floral resources spring index	floral resources summer index
511	내륙습지	0.11	0	0.2	0.2
521	갯벌	0	0	0	0
522	염전	0	0	0	0
611	해변	0	0	0	0
612	강기슭	0.2	0	0.1	0.15
613	암벽바위	0.25	0	0.1	0.1
621	채광지역	0	0	0	0
622	운동장	0	0	0	0
623	기타나지	0.15	0	0.2	0.15
711	하천	0	0	0	0
712	호수	0	0	0	0
721	해양수	0	0	0	0

출처: 윤형주 등(2008), Sun et al., (2023), Zhao et al., (2019), Zhao et al., (2023)



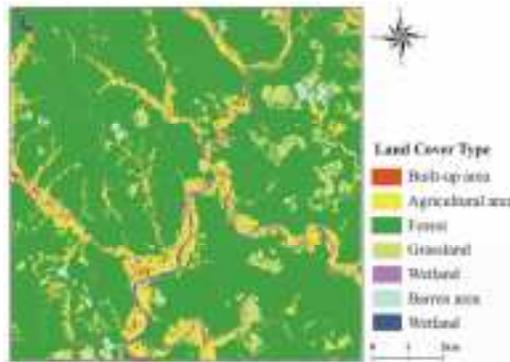
〈그림 II-1-16〉 수분서비스 현장 연구 대상지 InVEST 결과(A: $\alpha = 500$, B: $\alpha = 1,000$)

모형 결과에 따르면, $\alpha=500$ 일 때 연구 표준지에서의 수분서비스 최댓값은 0.753으로, $\alpha=1,000$ 일 때의 최댓값인 0.525보다 높게 나타났다. 이는 α 값이 증가함에 따라 수분매개자의 영향 범위가 넓어지면서, 공급력이 특정 지점에 집중되기보다는 넓은 공간에 걸쳐 분산되었기 때문으로 해석된다. 두 시나리오의 공간적 분포를 비교한 결과로 α 값이 500에서 1,000으로 증가 시 밭 지역에서는 수분서비스 공급량의 증가(즉, 양의 변화값)가 주로 나타났으며, 반면 산림 지역에서는 주로 감소(즉, 음의 변화값)하는 양상을 확인하였다. 이는 기존에 상대적으로 높은 값을 보이던 지점의 수분서비스가 주변 지역으로 확산되며, 개별 픽셀 단위의 공급량이 희석되어 감소한 결과로 이해할 수 있다.

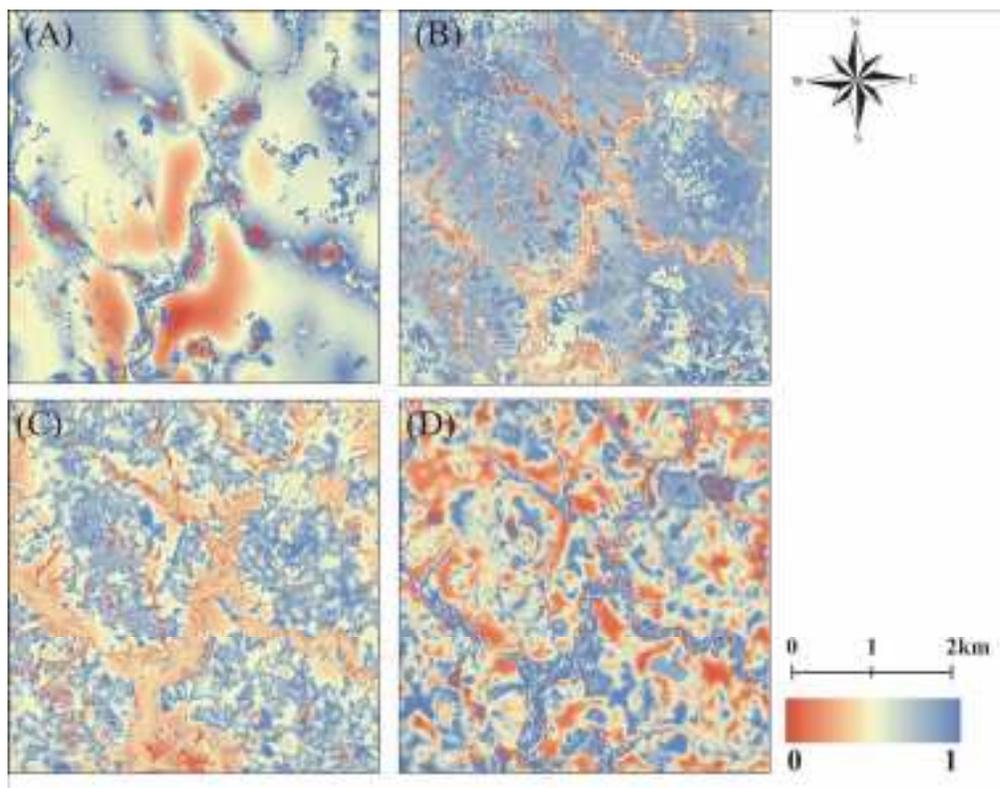
다음으로 경상북도 영양군 일월면의 표준지를 대상으로 재래꿀벌의 수분서비스를 평가하기 위해 PollMap과 InVEST 각 모형 조건을 적용하여 모형과 α 값에 따른 4종류의 입력 데이터를 구축하였다. 모형 간 결과를 비교하기 위해 분포 확률 기반 0-1 범위로 정규화하여 식(1)과 같이 유사도(S)를 계산하였다(Hagen-Zanker et al., 2006).

$$S = 1 - |A - B| \quad \text{식(1)}$$

이후 모형 간 유사도가 토지 유형별로 어떻게 달라지는지 확인하기 위해 대상지의 토지피복도를 7개의 대분류로 범주화하여 토지피복별 유사도 평균(mean) 값을 산출하였다.



〈그림 II-1-17〉 영양군 현장 연구 대상지 토지피복도



〈그림 II-1-18〉 PollMap, InVEST 모형 간 공간 유사도 비교(A: PollMap $\alpha = 50$ vs. PollMap $\alpha = 100$, B: PollMap $\alpha = 100$ vs. InVEST $\alpha = 100$, C: PollMap $\alpha = 50$ vs. InVEST $\alpha = 50$, D: InVEST $\alpha = 50$ vs. InVEST $\alpha = 100$)

〈표 II-1-26〉 PollMap과 InVEST 모형의 토지피복유형별 평균 유사도

토지피복 유형	PollMap $\alpha = 50$ vs. PollMap $\alpha = 100$	PollMap $\alpha = 100$ vs. InVEST $\alpha = 100$	PollMap $\alpha = 50$ vs. InVEST $\alpha = 50$	InVEST $\alpha = 50$ vs. InVEST $\alpha = 100$
시가화건조지역	0.965	0.472	0.489	0.472
농업지역	0.925	0.379	0.443	0.379
산림지역	0.921	0.826	0.739	0.826
초지	0.960	0.750	0.703	0.750
습지	0.977	0.434	0.479	0.434
나지	0.977	0.499	0.509	0.499
수역*	1.00	0.00	1.00	0.00

*수역의 경우 수분매개자의 서식지로 활용하지 않으므로 분석에서 제외함

〈그림 II-1-18〉에서 A(PollMap $\alpha = 50$ - $\alpha = 100$)의 전체 평균 유사도는 0.927로 α 값, 즉 비행거리 변화에는 크게 영향을 받지 않으며, 도로 주변 등 수분매개자의 접근성이 제한되는 지역 내에서 큰 차이를 보인다. D(InVEST $\alpha = 50$ - $\alpha = 100$)의 전체 평균 유사도는 0.824로 PollMap 간 평균 유사도 보다 낮았다. 또한, 토지피복 유형 중 시가화건조지역과 농업지역에서 유사도가 낮게 나타났다. 이러한 차이는 모형의 기본 구조에서 비롯되며, InVEST는 수분매개자의 비행거리에 따른 수분서비스의 점진적 감쇠를 적용하는 반면, PollMap은 최대 비행 가능한 이동거리 내에서만 자원을 탐색하고 자원의 질과 거리 정보를 반영하여 공간적 선호도를 차등화하는 구조이다. InVEST가 전반적으로 더 민감하게 반응하는 경향이 나타났는데, 이는 비행거리 변화에 따른 감쇠함수의 영향으로 해석된다. 반면에 PollMap은 자원의 밀도와 질, 거리 요인을 종합적으로 고려하여 수분 잠재력이 높은 지역과 낮은 지역 간의 공간적 경계를 뚜렷하게 나타낼 수 있다. 토지피복 유형별로 살펴보면, 시가화건조지역은 PollMap에서는 주변 녹지 패치를 일부 반영하여 부분적으로 높은 값을 보였으나, InVEST에서는 경관 단절의 영향으로 매우 낮은 수분서비스 공급을 나타냈다. 농업지역은 영양군 내에서 불규칙하게 분포하여 연결성이 낮았고, InVEST에서는 수분서비스 공급이 매우 낮게 산정되었다. PollMap은 경작지 인근의 국지적 서식 가능성을 반영하여 중간 수준의 값으로 나타났고, α 값 변화에 따른 차이가 가장 크게 나타난 지역으로 두 모형의 구조적 특성이 가장 명확히 드러나는 유형이다. 산림은 두 모형 모두에서 수분서비스 지수가 높게 나타났으며, 공간적 패턴 또한 유사하여 평균 유사도가 가장 높았다. 초지는 주로 농지와 산림의 경계부에 위치하여 PollMap에서는 일정 거리(α) 내 자원이 많아 상대적으로 균일한 높은 값을 보였으나, InVEST는 주변 토지 연속성에 민감하게 반응하여 적합도 분포가 불규칙하게 나타나 유사도가 낮았다. 습지, 나지는 수분매개자의 서식이 제한되는 지역으로 인근 경관의 연속성과 연결성에 따라 두 모형 간 유사도 차이가 큰 편이었다. 전체적으로 두 모형 모두 α 값이 증가함에 따라 수분서비스의 공간적 범위가 확대되는 유사한 거시적 경향을 보였으나, 공급 분포의 양상, 공간적 집중도, 구조적 차이에 따른 변화를 통해 세부적인 차이를 확인할 수 있었다. 이는 PollMap이 자원의 질과 접근성을 반영하여 경관 내 수분서비스의 미세한 공간 이질성을 더욱 현실적으로 재현하는 반면, InVEST는 비행거리 감쇠함수의 영향으로 경관 단절에 더 민감하게 반응함을 의미한다. 이러한 비교를 통해 각 모형의 장단점을 파악하고, 다양한 경관 내 수분서비스의 공간 패턴을 더 정교하게 이해할 수 있다.

국내 수분서비스 평가의 정밀도 향상과 다양한 경관 유형에의 적용 가능성을 높이기 위해서는 토지피복 입력자료의 생태적 타당성 확보가 필수적이다. InVEST 및 PollMap과 같은 공간 생태 모형의 적용 범위를

농경지를 넘어 산림 경관으로 확대하기 위해서는 국내 주요 산림수종의 밀원 기능을 정량적으로 파악할 수 있는 기초 자료가 필요하다. 따라서 국내 산림수종을 대상으로 수분서비스 평가에 활용할 수 있는 밀원수 34개 종의 화밀 분비량 특성에 대한 기초 자료를 구축하였다(표 II-1-27). 대표적 밀원수인 아까시나무가 밀원자원으로 널리 활용되고 있으나, 흰가루병과 탄저병 등 병충해 발생으로 쇠퇴 현상이 발생하고 있으며, 이에 따라 대체 밀원자원 발굴의 필요성이 커지고 있다(최진영 등, 2021). 밀원수 평가 시 단위 꽃 기준의 화밀량이나 유리당 함량만을 고려하는 것이 아닌 본당 개화량과 수관 폭 등 생육 특성도 함께 고려하는 것이 필요하며, 국립산림과학원은 이러한 요소를 종합적으로 고려하여 ha당 꿀 생산량이 높은 수종을 선발하고 있다(산림청, 2023). 특히 벌은 단순히 가까운 위치의 먹이자원이 아니라, 양질의 먹이자원이 풍부한 장소를 선호하며, 그에 따라 서식지의 위치를 결정하는 경향이 있다는 점에서(Collett et al., 2013), ha당 꿀 생산량은 수분서비스 공급 잠재력을 보다 정확하게 평가하는 데 핵심적인 정보가 될 수 있다. ha당 꿀 생산량은 [본당 꿀 생산량(g/tree) × ha당 생육 가능 본 수(본/ha)] / 1,000의 방식으로 산정되며, 수종 간 꿀 생산량(kg/ha)은 약 2~301 kg/ha 범위로 큰 차이를 보인다(국립산림과학원, 2022a).

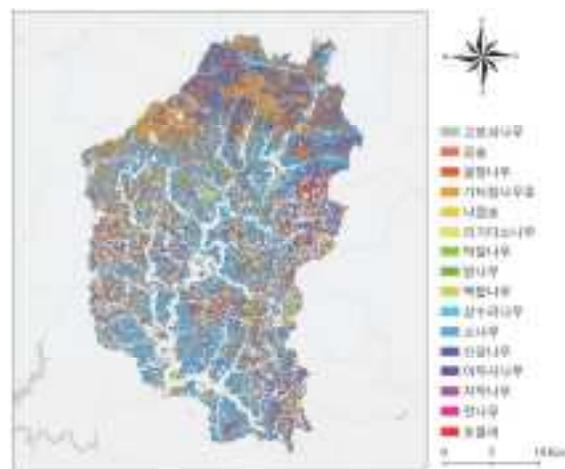
〈표 II-1-27〉 국내 주요 밀원수종의 화밀 분비량 및 꿀 생산량

밀원수종	학명	화밀 분비량 (μ l/flower)	유리당 함량 (mg/flower)	ha당 꿀 생산량 (kg/ha)	개화시기
가시오갈피나무	<i>Eleutherococcus senticosus</i>	3.5	-	-	7~8월
광나무	<i>Ligustrum japonicum</i>	0.8	0.6	103~146	6월
광광나무	<i>Ilex crenata</i>	암꽃: 0.3 수꽃: 0.1	암꽃: 0.2 수꽃: 0.1	암꽃: 6~18 수꽃: 62~168	5~6월
동백나무	<i>Camellia japonica</i>	357.1	62.7	25~50	2~4월
등	<i>Wisteria floribunda</i>	0.9	0.7	26~42	4~5월
때죽나무	<i>Styrax japonicus</i>	1.1	0.1	-	5~6월
마가목	<i>Sorbus commixta</i>	0.08	0.05	1~5	4~5월
매실나무	<i>Prunus mume</i>	10	1.8	1~4	3~4월
머귀나무	<i>Zanthoxylum ailanthoides</i>	암꽃: 1.3 수꽃: 1.0	암꽃: 1.0 수꽃: 1.1	암꽃: 36~111 수꽃: 42~128	7~8월
명자나무	<i>Chaenomeles speciosa</i>	19.8	5.0	20~40	3~4월
모감주나무	<i>Koelreuteria paniculata</i>	0.6	0.4	18~25	6~7월
밤나무	<i>Castanea crenata</i>	30.5	9.4	30~100	6월
튤립나무	<i>Liriodendron tulipifera</i>	391.5	66.3	15~30	5~6월
벽오동	<i>Firmiana simplex</i>	1.6	-	-	6~7월
보리수나무	<i>Elaeagnus umbellata</i>	1.7	1.4	22~39	4월
산벚나무	<i>Prunus sargentii</i>	8.5	2.2	25~40	4~5월
산초나무	<i>Zanthoxylum schinifolium</i>	0.2	-	-	6~7월
섬피나무	<i>Tilia insularis</i>	2.2	0.3	90~560	6월
쉬나무	<i>Tetradium daniellii</i>	암꽃: 0.4 수꽃: 3.2	암꽃: 0.3 수꽃: 1.2	자웅동주: 148~400 수꽃: 195~500	7~8월
신나무	<i>Acer tataricum</i>	1.4	0.5	-	5~6월
아까시나무	<i>Robinia pseudoacacia</i>	2.2	0.86	210~320	5~6월

밀원수종	학명	화밀 분비량 (μ l/flower)	유리당 함량 (mg/flower)	ha당 꿀 생산량 (kg/ha)	개화시기
아왜나무	<i>Viburnum odoratissimum</i>	0.5	0.5	67~247	6월
오갈피나무	<i>Eleutherococcus sessiliflorus</i>	3.9	-	-	8~9월
웃나무	<i>Toxicodendron vernicifluum</i>	0.4	-	-	5~6월
왕벚나무	<i>Prunus × yedoensis</i>	7.6	3.6	25~40	4~5월
음나무	<i>Kalopanax septemlobus</i>	0.5	0.3	11~34	7월
이나무	<i>Idesia polycarpa</i>	암꽃: 1.7 수꽃: 9.7	암꽃: 1.3 수꽃: 5.0	암꽃: 13~68 수꽃: 58~177	5월
쥐똥나무	<i>Ligustrum obtusifolium</i>	0.7	0.4	25~74	5~6월
쪽동백나무	<i>Styrax obassia</i>	3.6	-	-	5~6월
찰피나무	<i>Tilia mandshurica</i>	2.2	0.4	90~560	6월
칠엽수	<i>Aesculus turbinata</i>	1	0.9	58~75	5월
피나무	<i>Tilia amurensis</i>	1.6	0.7	90~560	6월
헛개나무	<i>Hovenia dulcis</i>	4.3	1.8	240~360	6~7월
황칠나무	<i>Dendropanax trifidus</i>	4.5	0.9	-	8~9월

출처: 김세현(2013), Sup et al., (2015), 국립산림과학원(2021, 2022a, b), 국립생물자원관(2023), 손민웅 등(2023), Chrzanowska et al., (2024), Na et al., (2024)

국내 밀원수종을 대상으로 구축한 기초 자료와 문헌조사를 기반으로 영양군 내 꿀 생산 잠재력을 평가하였다. 꿀과 더불어 나무의 잎이나 줄기에서 분비되는 당분이나 진딧물 등이 배출하는 당질성 분비물인 감로(honeydew)를 생산하는 수종을 포함하였으며, 2024년도 임상도에서 총 16개의 수종을 선정하였다(산림청, 2024b).



<그림 II-1-18> 영양군 내 꿀 및 감로 생산 수종(16종) 분포

영양군에서는 소나무가 가장 넓은 면적을 차지하고 있었으며, ha 당 꿀 생산량이 가장 많은 수종은 아까시나무로 확인되었다(표 II-1-28).

〈표 II-1-28〉 수분서비스 평가를 위해 선정된 16종의 영양군 내 면적과 꿀 및 감로 생산량

수종	학명	총면적(ha)	퍼센트 면적	꿀 및 감로 생산량 (kg/ha)
소나무	<i>Pinus densiflora</i>	23,105.85	44.973	25
기타 참나무류	<i>Quercus spp.</i>	7,724.92	15.036	25
신갈나무	<i>Quercus mongolica</i>	7,638.67	14.868	25
굴참나무	<i>Quercus variabilis</i>	6,406.10	12.469	25
낙엽송	<i>Larix kaempferi</i>	5,401.25	10.513	25
자작나무	<i>Betula pendula</i>	431.86	0.841	0
리기다소나무	<i>Pinus rigida</i>	371.03	0.722	25
아까시나무	<i>Robinia pseudoacacia</i>	93.73	0.182	265
포플러	<i>Populus nigra</i>	79.11	0.154	20
백합나무	<i>Liriodendron tulipifera</i>	37.81	0.074	23
상수리나무	<i>Quercus acutissima</i>	37.64	0.073	25
전나무	<i>Abies holophylla</i>	23.88	0.046	25
밤나무	<i>Castanea crenata</i>	17.06	0.033	65
곰솔	<i>Pinus thunbergii</i>	5.07	0.010	25
고로쇠나무	<i>Acer pictum</i>	2.41	0.005	200
박달나무	<i>Betula schmidtii</i>	0.55	0.001	0

출처: 이경준(1998), 산림청(2024), Janssens et al.(2006)

구축한 산림수종 데이터를 활용하여 영양군 내 산림의 수분서비스를 평가하기 위해 InVEST Crop Pollination 모형을 활용하였다. 단일 토지피복도와 산림수종 정보가 포함된 통합형 토지피복도를 각각 적용하여 InVEST 모형을 두 차례 구동하였으며, 두 결과의 차이를 비교·분석하여 수종별 수분서비스를 평가하였다. 김세건 등(2019)과 최진영 등(2021)을 참고하여 감로를 먹이자원으로 활용하고 국내에서 수분매개자로 가장 많이 이용되는 재래꿀벌(*Apis cerana*)과 서양꿀벌(*Apis mellifera*)을 대상으로 길드 표를 구축하였다. 2016~2022년의 꿀벌 군수 데이터(농림축산식품부, 2024)를 활용하여 길드 표의 상대적 풍부도 비율을 재래꿀벌 0.05, 서양꿀벌 0.95로 조정함으로써 국내 수분매개 꿀벌의 실제 분포 특성을 반영하였다(표 II-1-29).

〈표 II-1-29〉 영양군 내 산림수종 수준에서 InVEST 구동을 위한 길드 표

항목	대상 종	
	<i>Apis cerana</i>	<i>Apis mellifera</i>
Nesting suitability cavity index	1	1
Nesting suitability ground index	0	0
Foraging activity spring index	1	1
Foraging activity summer index	0.8	0.6
Alpha (α)	1,375	3,250
Relative abundance	0.05	0.95

출처: 농림축산식품부(2024), Kitamura and Maeta (1969), Visscher and Seeley (1982), Greenleaf et al., (2007), Guedot and Kemp (2009), Koetz (2013), Liczner and Colla (2019), Jung (2021), Pugesek and Crone (2021), Zhao et al., (2023), Kim et al, (2024)

생·물리적 표는 기존 연구 자료를 기반으로 국내 환경에 맞추어 작성 및 적용하였다(표 II-1-30).

〈표 II-1-30〉 단일 토지피복도 기반의 영양군 내 InVEST 구동을 위한 생·물리적 표

lucode	토지피복 유형	nesting cavity availability index	nesting ground availability index	floral resources spring index	floral resources summer index
111	단독주거시설	0.18	0.18	0.25	0.20
112	공동주거시설	0.10	0.10	0.20	0.15
121	공업시설	0.00	0.00	0.00	0.00
131	상업·업무시설	0.00	0.00	0.00	0.00
141	문화·체육·휴양시설	0.20	0.25	0.30	0.25
154	도로	0.00	0.00	0.00	0.00
161	환경기초시설	0.00	0.00	0.00	0.00
162	교육·행정시설	0.00	0.00	0.00	0.00
163	기타 공공시설	0.00	0.00	0.00	0.00
211	경지정리가 된 논	0.10	0.15	0.00	0.35
212	경지정리가 안 된 논	0.10	0.30	0.00	0.50
221	경지정리가 된 밭	0.15	0.25	0.48	0.50
222	경지정리가 안 된 밭	0.20	0.40	0.68	0.55
231	시설재배지	0.00	0.00	0.00	0.00
241	과수원	0.25	0.60	0.70	0.50
251	목장·양식장	0.30	0.70	0.90	0.80
252	기타재배지	0.30	0.30	0.68	0.50
311	활엽수림	0.93	0.90	0.70	0.60
321	침엽수림	0.60	0.50	0.40	0.45
331	혼효림	0.82	0.61	0.75	0.63
411	자연초지	0.30	1.00	1.00	0.78
422	묘지	0.20	0.55	0.40	0.40
423	기타초지	0.60	0.70	0.60	0.55
511	내륙습지	0.11	0.11	0.20	0.20
612	강기슭	0.20	0.20	0.10	0.15
613	암벽바위	0.25	0.15	0.10	0.10
621	채광지역	0.00	0.00	0.00	0.00
622	운동장	0.00	0.00	0.00	0.00
623	기타나지	0.15	0.20	0.20	0.15
711	하천	0.00	0.00	0.00	0.00
712	호수	0.00	0.00	0.00	0.30

출처: Seeley and Morse (1978), Lonsdorf et al., (2009), Groff et al., (2016), Koh et al., (2016), Zhao et al., (2019), Rothwell and Ginsberg (2019), Collado and Bartomeus (2019), Antoine and Forrest (2021), Serret et al., (2022), Zhao et al., (2023), Natural Capital Project (2024), Hinsch et al., (2024a)

분류된 산림수종 데이터와 토지피복도의 공간정보를 통합하기 위해, 생·물리적 표 구축 시 수종별 코드를 추가하고 해당 코드를 기준으로 Polygon to Raster를 수행하여 각 수종의 분포를 픽셀 단위로 나타내는 래스터 데이터로 생성하였다. 생성된 산림수종 래스터와 토지피복도를 결합하기 위해 ArcGIS Pro의 Raster Calculator에서 Con 함수를 활용한 조건부 병합을 수행하였다. 수분서비스 평가를 위해 분류된 16개 수종의 정보가 존재하는 곳은 해당 값을 유지하고, 정보가 없는 곳은 토지피복도의 활엽수림, 침엽수림, 혼효림 등의 값을 유지하도록 설정하여 수종별 lucode가 반영된 통합형 토지피복 래스터를 구축하였다. 수종별 코드는 기존 토지피복 코드와 중복되지 않도록 별도의 900번대 코드로 설정하여, 활엽수종은 900-910, 침엽수종은 911-915로 부여하였다. 또한, 기존의 ‘활엽수림’, ‘침엽수림’, ‘혼효림’ 항목은 각각 ‘기타활엽수림’, ‘기타침엽수림’, ‘기타혼효림’으로 수정하였다. 구축된 산림 수종을 반영한 토지피복 래스터를 InVEST Crop Pollination 모형의 입력자료로 활용하여, 수분서비스 결과를 산림 수종 수준에서 비교·분석할 수 있도록 하였다. 생·물리적 지표는 분류된 산림 수종 16개의 꿀 및 감로 생산량 자료를 바탕으로 활엽수와 침엽수로 구분하여 값을 부여하였다(표 II-1-31).

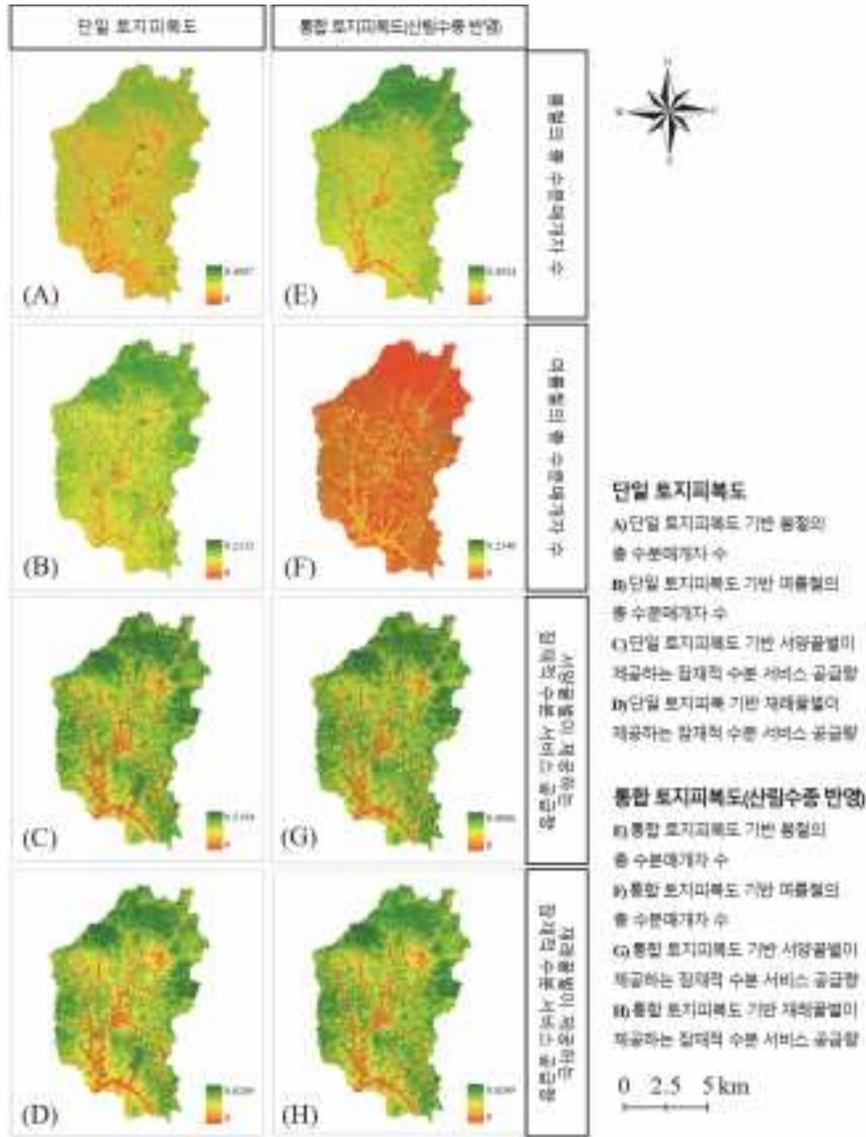
〈표 II-1-31〉 통합 토지피복도 기반의 영양군 내 InVEST 구동을 위한 생·물리적 표

lucode	토지피복 유형	nesting cavity availability index	nesting ground availability index	floral resources spring index	floral resources summer index
111	단독주거시설	0.18	0.18	0.25	0.20
112	공동주거시설	0.10	0.10	0.20	0.15
121	공업시설	0.00	0.00	0.00	0.00
131	상업·업무시설	0.00	0.00	0.00	0.00
141	문화·체육·휴양시설	0.20	0.25	0.30	0.25
154	도로	0.00	0.00	0.00	0.00
161	환경기초시설	0.00	0.00	0.00	0.00
162	교육·행정시설	0.00	0.00	0.00	0.00
163	기타 공공시설	0.00	0.00	0.00	0.00
211	경지정리가 된 논	0.10	0.15	0.00	0.35
212	경지정리가 안 된 논	0.10	0.30	0.00	0.50
221	경지정리가 된 밭	0.15	0.25	0.48	0.50
222	경지정리가 안 된 밭	0.20	0.40	0.68	0.55
231	시설재배지	0.00	0.00	0.00	0.00
241	과수원	0.25	0.60	0.70	0.50
251	목장·양식장	0.30	0.70	0.90	0.80
252	기타재배지	0.30	0.30	0.68	0.50
311	기타활엽수림	0.93	0.90	0.70	0.60
321	기타침엽수림	0.60	0.50	0.40	0.45
331	기타혼효림	0.82	0.61	0.75	0.63
411	자연초지	0.30	1.00	1.00	0.78
422	묘지	0.20	0.55	0.40	0.40
423	기타초지	0.60	0.70	0.60	0.55
511	내륙습지	0.11	0.11	0.20	0.20

lucode	토지피복 유형	nesting cavity availability index	nesting ground availability index	floral resources spring index	floral resources summer index
612	강기슭	0.20	0.20	0.10	0.15
613	암벽바위	0.25	0.15	0.10	0.10
621	채광지역	0.00	0.00	0.00	0.00
622	운동장	0.00	0.00	0.00	0.00
623	기타나지	0.15	0.20	0.20	0.15
711	하천	0.00	0.00	0.00	0.00
712	호수	0.00	0.00	0.00	0.30
900	고로쇠나무	0.93	0.90	0.57	0.00
901	굴참나무	0.93	0.90	0.84	0.00
902	기타참나무류	0.93	0.90	0.95	0.00
903	박달나무	0.93	0.90	0.46	0.00
904	밤나무	0.93	0.90	0.00	0.60
905	백합나무	0.93	0.90	0.63	0.40
906	상수리나무	0.93	0.90	0.68	0.00
907	신갈나무	0.93	0.90	0.89	0.00
908	아까시나무	0.93	0.90	0.79	0.80
909	자작나무	0.93	0.90	0.46	0.00
910	포플러	0.93	0.90	0.73	0.00
911	곰솔	0.60	0.50	0.00	0.00
912	낙엽송	0.60	0.50	0.60	0.00
913	리기다소나무	0.60	0.50	0.40	0.00
914	소나무	0.60	0.50	0.80	0.00
915	전나무	0.60	0.50	0.20	0.00

출처: 이경준 (1998), 산림청(2024a), Janssens et al.(2006)

nesting cavity availability index와 nesting ground availability index 값은 선행 연구에서 구축한 활엽수림과 침엽수림의 값을 그대로 반영하였으며, floral resources spring index와 floral resources summer index 값은 16개의 주요 수종의 면적 정보와 문헌조사를 통해 수집한 각 수종의 꿀 및 감로 생산량 자료를 활용하여 구축하였다. 각 수종의 면적과 단위면적당 꿀 및 감로 생산량을 곱하여 총 꿀 및 감로 생산량을 산정하였으며, 수종 간 상대적 중요도를 반영하기 위해 계산된 값에 순위 기반 누적 확률 정규화(CDF-based rank normalization)를 적용하였다. 정규화 과정에서 각 수종의 총 꿀 및 감로 생산량을 기준으로 순위를 부여하고, 순위를 표본 수로 나누어 0-1 범위의 누적 확률값으로 변환하여 각 수종이 전체 분포 중 어느 정도 위치에 있는지를 상대적 비율로 표현한다. 수종의 생태적 특성을 고려하여 별도로 정규화하였으며, 봄(3~5월), 여름(6~8월)으로 구분하여 계절별 floral resources spring index와 floral resources summer index 값을 산정한다. 16개 수종 중 활엽수와 침엽수에 해당하는 각 그룹의 평균값이 목표값(봄에 개화하는 활엽수는 0.7, 봄에 개화하는 침엽수는 0.4, 여름에 개화하는 활엽수는 0.6)에 수렴하도록 선형 보정을 적용했다, 이를 통해 생·물리적 표에 수종별 floral resources spring index와 floral resources summer index를 반영하고, 영양균을 대상으로 InVEST Crop Pollination 모형을 시범 구동했다(그림 II-1-19).



〈그림 II-1-19〉 영양군 산림 대상 단일 토지피복도 및 통합 토지피복도 InVEST 구동 결과

모형 구동 결과, 단일 토지피복도와 통합 토지피복도를 이용한 경우 모두 산림 지역에서 높은 수분서비스 값을 나타냈으나, 수종 정보가 반영된 토지피복도(F)를 적용하면 여름철 수분매개자의 총 수는 뚜렷하게 감소하였다. 이러한 결과는 수종별 꽃 자원과 감로 생산량이 실제 수종의 생태적 차이를 반영하도록 정규화되어, 기존 토지피복의 단일 산림 범주에 비해 상대적으로 보수적인 값으로 산정하였기 때문이다. 특히 개화 시기가 여름에 집중된 수종들이 특정 지역에 편중되어 분포함에 따라, 전체적으로 공간적 연속성이 낮아지고 자원 접근성이 감소하여 수분서비스가 약화된 것으로 해석된다. 반면, 봄철(A, E)에는 두 결과 간 차이가 크지 않았는데, 이는 봄에 개화하는 수종의 분포가 단일 토지피복도 내 ‘활엽수림’ 범주에 이미 포함되어 있기 때문이다. 서양꽃벌(C, G)은 재래꽃벌(D, H) 보다 수분서비스 공급량의 상한값이 더 크게 나타나, 높은 잠재적 수분서비스 공급량을 보임. 그러나 공간 분포에서는 두 종간 차이가 미미하였다. 이는 작물의 수분서비스 또는 수분서비스의 경제적 가치 평가를 넘어 생태계서비스 측면에서 산림을 대상으로 수분서비스를 평가했다는 점에서 의의가 있다. 그러기 위해 생·물리적 표 구축 시 활용된 매개변수가 국외 문헌값에 근거하고 있으므로 향후 국내 수종에 적합한 매개변수 구축이 필요하다.

라) 소결

(1) 연구 대상종 비행거리 측정 실험

연구 대상종인 재래꿀벌을 대상으로 비행거리에 따른 귀소 능력과 지형 요인의 영향을 분석하였다. 짧은거리(500 m)에서는 매우 높은 귀소율을 기록했으나 거리가 증가함에 따라 귀소율이 급격히 감소하였다. 로지스틱 회귀분석 결과, 1 km에서 1.5 km 사이가 귀소 성공률이 급격히 낮아지는 임계 거리로 확인되었다. 2.5 km 지점에서는 극소수의 개체가 귀소했으나 이는 재래꿀벌의 최대 비행 및 귀소가능 거리를 시사하였다. 이는 국내 재래꿀벌의 일반적인 행동권이 2.5 km 이내에 집중되어 있음을 반영하는 결과로 판단된다. 거리 외의 지형 요인(가시성, 평균고도, 하천밀도)이 귀소율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다중 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 거리만이 귀소율 감소와 관련성을 보였을 뿐 나머지 지형 요인들은 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 못했다. 결론적으로 국내 재래꿀벌의 성공적인 귀소 능력은 물리적인 거리에 가장 크게 제약을 받으며, 1.5 km를 넘어서면 귀소율이 현저히 낮아져 실질적인 행동권의 경계가 형성됨을 확인하였다. 비행거리 실험이 7월에 진행되어 꿀벌의 활동성, 체력, 비행의지에 영향을 미쳤을 수 있고, 거리별 방출 개체수의 한계가 있으나 장거리 비행에 다른 귀소 능력을 체계적으로 분석하고 최장 귀소 가능 거리(2.5 km)를 확인한 국내 최초 현장 방출 실험 성공 사례라는 점에서 향후 재래꿀벌의 관리 및 보호 연구에 중요한 기초 자료를 제공하는 데 큰 의의가 있다.

(2) 연구대상종 화분매개 가능 자원 목록

봄철 꿀벌 타입(*Apis mellifera* vs. *A. cerana*)에 따른 선호 밀원식물의 차이 또한 명확하게 구분되었다. 동일 지역 시료(군산 당북리) 비교 결과, 토봉꽃에서는 Rosa, Styrax, Liriodendron, Toxicodendron 등 교목성 산림 자원의 비율이 높았던 반면, 양봉꽃에서는 Rosa, Allium, Vicia, Trifolium 등 초본성 및 관목성 식물이 상대적으로 높은 비중을 차지하였다. 이는 두 꿀벌 종의 비행 거리, 채집 효율성, 서식지 이용성, 미세기상 반응성 등 생태적 특성 차이에서 기인한 것으로 해석된다. 다만, 본 연구에서는 동일 지역의 봄철 1회 샘플링을 기반으로 한 연구이므로, 향후 계절별 및 타 지역과 비교분석할 경우 보다 정확한 토봉 및 양봉의 선호 밀원식물원을 밝혀낼 수 있을 것으로 판단된다. 종합적으로, ITS와 rbcL 마커는 모두 밀원식물 군집 해석에 유용하였으나, ITS 마커가 종 분해능과 검출 다양성 측면에서 더 우수한 것으로 확인되었다. 반면, rbcL은 엽록체 기원(cpDNA) 마커로서 교목성 및 산림성 식물 유전자 검출에 강점을 보였다. 따라서 향후 연구에서는 ITS를 주마커(primary marker)로 활용하되, rbcL을 보조마커(secondary marker)로 병행 분석하여 상호 보완적인 생태 정보를 확보하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한, 보다 다양한 지역과 계절에 걸친 토봉 및 양봉 시료를 확보하고, 현지 식생 데이터와의 비교 분석을 병행할 경우, 꿀벌 종별 선호 밀원식물 자원과 계절·지역별 생태계서비스 기여도를 더욱 정밀하게 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

(3) 연구대상종 서식지 생태계서비스 가치 평가

충청남도 서천군의 재래꿀벌(*Apis cerana*) 서식지를 대상으로 GIS 기반 공간분석, 생태계서비스 간이평가, 양봉가 포커스그룹 인터뷰(FGI)를 통합하는 다학제적 접근을 시도하였다. 이는 과학적 실험 연구가 제한적인 재래꿀벌의 서식지 특성을 규명하는 데 있어, 정량적 데이터와 이해당사자의 경험적 지식을 결합하는 방법론을 제시하였다. 연구 결과, 재래꿀벌 서식지는 물공급, 경관가치, 수분서비스 순으로 높게 평가되었으며, 양봉 활동의

안정성이 지역의 생태·사회적 자원에 크게 의존함이 확인되었다. 이는 재래꿀벌이 가진 고유한 생태·문화적 가치가 아직 사회적으로 충분히 활용되거나 정책적 지원으로 연결되지 못하고 있음을 의미한다. 또한 양봉가 경력에 따라 생태계서비스 인식에 차이가 관찰된 점은 주목할 만하다. 이는 생태계서비스 인식이 물리적 환경뿐만 아니라 개인의 경험, 가치관, 사회문화적 맥락에 의해 복합적으로 형성되기도 한다. 이러한 결과는 보전 정책 수립 시 현장 전문가인 양봉가의 지역생태지식(Local Ecological Knowledge)을 적극적으로 반영하는 협력적 거버넌스 구축이 중요함을 강조한다. 또한, 봄철 밀원 부족과 외래생물 위협은 서식지의 회복탄력성을 저해하는 핵심 요인으로, 이를 해결하기 위해서는 소규모 서식지의 질적 개선과 서식지 간 연결성 확보가 중요한 과제로 제시된다. 본 연구는 몇 가지 한계점을 지닌다. 첫째, 기후변화와 병충해 등으로 재래꿀벌 농가가 급감하는 추세 속에서 연구 대상지 표본 수(5곳)가 충분하지 못하여, 연구 결과를 일반화하는 데 충분한 고려가 필요하다. 둘째, 생태계서비스 평가가 양봉가의 주관적 인식에 기반하였으므로, 실제 생태계 기능의 정량적 측정과는 차이가 있을 수 있다. 셋째, 서식지 분석 시 중분류 토지피복도를 활용하여, 실제 밀원식물의 종 다양성이나 식생의 질적 수준을 상세히 반영하지 못한 한계가 있다.

향후 연구에서는 이러한 한계점을 보완하기 위한 접근이 필요하다. 첫째, 연구의 공간적 범위와 표본 수를 확대하여 지역별 토지이용 특성과 밀원식생 분포에 따른 인식 차이를 체계적으로 비교 분석해야 한다. 둘째, 양봉가의 인식 기반 평가를 보완하기 위해 화분 분석(Pollen Analysis)이나 직접적인 수분 기여도 측정 등 생태학적 정량 연구를 병행하여 서식지 특성을 검증할 필요가 있다. 셋째, 재래꿀벌의 실제 행동 생태(비행거리, 선호 밀원)를 추적하고 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 서식지 적합성 모델을 개발하는 연구가 요구된다.

(4) 모델 평가

본 연구는 국내 경관 특성을 반영한 수분서비스 평가체계 구축을 위해 CPF 기반 모형인 PollMap을 적용하고, 기존 InVEST 결과와 비교·분석하였으며, 밀원수종 정보를 활용한 비농업지역의 수분서비스를 평가하였다. 두 모형은 수분매개자의 비행거리 변화에 따라 수분서비스 공간 범위가 확대되는 유사한 경향을 보였으나, 공급 분포의 집중도와 경관 단절에 대한 반응 특성에서는 뚜렷한 차이를 보였다. PollMap은 자원의 질과 실제 접근성을 통합적으로 고려함으로써 경관 내 수분서비스의 세밀한 공간적 변화를 현실적으로 반영하였으며, 특히 비농업지역(산림, 초지)에서도 국지적 잠재력을 효과적으로 모의할 수 있다. 반면 InVEST는 비행거리 기반 감소 효과가 뚜렷하고 주변 경관 연속성에 민감하게 반응하여, 농경지 등 단일 경관의 수분서비스 평가에 유용할 것으로 판단된다. 또한, 밀원수종 기초 자료를 활용한 영양군 수분서비스 평가에서는, 수종 정보가 반영된 통합 토지피복도를 적용할 경우 여름철의 수분매개자의 총 수가 뚜렷하게 감소하는 것으로 보였다. 이는 수종별 개화 시기와 자원 분포의 편중으로 인해 접근성이 저하된 결과로 해석된다. 산림 수종을 반영한 모델에서는 수종별 꿀·감로 자원량이 고려되어, 실제 경관 특성에 따른 잠재적 수분 공급량을 모의·평가할 수 있었고, 벌 종별 풍부도와 α 값의 차이로 인해 재래꿀벌보다 서양꿀벌이 더 높은 수분서비스를 제공하는 것으로 나타났다. PollMap과 InVEST의 구조적 특성과 적용 가능성을 비교하여 국내 경관 특성에 적합한 수분서비스 평가체계 마련의 기반을 제공하였다. 특히 밀원수종 정보를 활용한 시범 분석을 통해 비농업지역의 생태적 기여도를 정량화할 가능성을 제시하였다.

다. 생태계서비스 기반 훼손지 복원 목표 유형 분류

1) 생태계서비스 기반 훼손지 복원 목표 유형 분류 체계 및 적용

가) 국내외 복원 정책 동향 및 제도적 기반

(1) 국제적 동향

기후위기 대응과 생물다양성 보전을 위한 국제사회의 노력이 강화되고 있다. 유엔 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD)은 2022년 제15차 당사국총회에서 "쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크(Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework)"를 채택하였다(CBD, 2022). 이 프레임워크의 2030 실행목표(Action Targets) 중 목표 2(Target 2)는 2030년까지 훼손된 육상·내륙수역·해양·연안 생태계의 최소 30%를 효과적으로 복원하여 생물다양성, 생태계 기능 및 서비스, 생태학적 무결성과 연결성을 향상하는 것을 목표로 하고 있다(환경부, 2023). 이는 2011~2020 생물다양성 전략계획의 아이치목표 15번(훼손 생태계 15% 복원)에서 목표를 두 배로 상향한 것이다.

자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)은 기후위기 대응과 탄소중립 이행을 위한 효과적이고 지속가능한 해결방안으로, 국제적으로 강조되고 있다. 특히 생태계 복원은 탄소흡수와 저장을 촉진하고 생물다양성을 증진하는 핵심 수단으로서, 숲 조성 및 복원, 습지 회복 등 다양한 형태의 녹색복원이 탄소중립 달성에 필수적인 것으로 인식되고 있다(환경부, 2021).

(2) 국내 정책 추진 경과

국내에서는 2020년부터 국토환경 녹색복원 정책이 본격적으로 추진되었다. 기후에너지환경부는 2020년 「국토환경 녹색복원 마스터플랜 수립을 위한 연구」를 시작으로, 2021년 「국토환경 녹색복원 종합계획 수립 연구」를 통해 체계적인 녹색복원 전략과 4대 추진전략을 마련하였다. 동 계획에서는 “국토·도시의 녹색회복(Green Recovery)을 통한 건강하고 회복력(Resilience) 있는 지속가능 국토환경 확보”를 비전으로 제시하였다(환경부, 2021).

2023년에는 「국토환경 녹색복원 후보목록 선정방안 연구」를 통해 전국 단위의 체계적인 훼손지 도출 및 복원 후보지역 선정 프레임워크를 개발하였으며, 같은 해 관계부처합동으로 「한반도 생태축 연결복원 추진계획(2024~2028)」을 수립하여 전국 3,955개소의 생태축 단절지점 중 주요 단절지 44개소를 2028년까지 연결·복원하는 계획을 발표하였다(관계부처합동, 2023).

2024년 6월에는 기후에너지환경부가 「자연환경복원 추진 지침」을 제정하여 자연환경복원사업의 복원목표 유형, 사업계획 수립, 시행 절차, 사후관리 등에 관한 구체적인 기준을 마련하였다(환경부, 2024a).

(3) 법적 근거

자연환경복원의 법적 근거는 「자연환경보전법」에 명시되어 있다. 2021년 1월 5일 개정된 동법에서는 자연환경복원사업의 정의(제2조제19호), 후보목록 작성(제45조의3), 사업계획 수립(제45조의4), 추진실적 보고·평가(제45조의5), 유지·관리(제45조의6) 등에 관한 조항이 신설되었다.

특히 제45조의3에서는 기후에너지환경부장관이 자연환경조사, 정밀·보완조사, 기후변화 관련 생태계 조사, 습지조사 등의 결과를 토대로 훼손된 지역의 생태적 가치, 복원 필요성 등의 기준에 따라 우선순위를 평가하여 자연환경 복원이 필요한 대상 지역의 후보목록을 작성하도록 규정하고 있다.

한편, '환경훼손'의 정의는 「환경정책기본법」 제3조에서 “야생동식물의 남획 및 그 서식지의 파괴, 생태계 질서의 교란, 자연경관의 훼손, 표토 유실 등으로 자연환경의 본래적 기능에 중대한 손상을 주는 상태”로 규정하고 있다.

나) 훼손지 유형 분류 및 복원 전략 수립 개요

(1) 연구의 필요성

자연환경의 훼손은 생태계서비스(Ecosystem Services, ES) 공급 기능의 저하를 초래하며, 이는 지역사회의 환경적·경제적·사회적 편익 감소로 이어진다. 효과적인 자연환경 복원을 위해서는 훼손지의 특성과 복원 목표를 체계적으로 분류하고, 각 유형에 적합한 맞춤형 복원 전략을 수립하는 것이 필수적이다.

특히 경기도는 수도권에 위치하여 도시화와 개발 압력이 높은 동시에, 북부의 DMZ 인접지역, 동부의 산악지역, 서부의 연안지역 등 다양한 생태환경을 보유하고 있어 훼손지 유형과 복원 방향이 지역별로 다를 수 있다. 따라서 경기도 전역을 대상으로 훼손지 현황을 체계적으로 파악하고, 생태계서비스 기반의 맞춤형 복원 목표를 설정하는 연구가 필요하다.

(2) 연구 목적

본 연구는 생태계서비스 개념을 도입하여 훼손지의 복원 목표 유형을 분류하는 새로운 체계를 개발하고, 이를 경기도 전역에 시범 적용하여 현장 적용성을 검증하는 것을 주된 목적으로 한다. 이를 달성하기 위한 구체적인 과정은 다음과 같다.

우선 도시생태현황지도의 바이오톱 공간정보를 활용하여 훼손지를 과학적으로 추출하고 유형화하는 체계를 구축하였다. 이후 2024년 제정된 기후에너지환경부의 「자연환경복원 추진 지침」 상의 복원목표 유형을 준용하여 훼손지를 체계적으로 분류하고, 생태계서비스 평가를 수행하여 유형별 기능적 취약성을 정밀하게 분석하였다. 궁극적으로는 이러한 분석 결과를 토대로 훼손지 유형의 특성과 기능 저하 요인을 고려한 맞춤형 복원 전략을 제시함으로써 실효성 있는 복원 기반을 마련하고자 한다.

다) 연구의 범위 및 수행 체계

본 연구의 공간적 범위는 경기도 내 31개 시·군 전역을 대상으로 하며, 시간적 범위는 2024년을 기준 시점으로 설정하여 현황 분석을 수행하였다.

내용적 범위는 훼손지의 발굴부터 전략 수립까지의 일련의 과정을 포괄하였다. 구체적으로는 바이오톱 정보를 기반으로 한 훼손지 추출 및 유형 분류를 시작으로, 생태계서비스 관점의 복원 목표 분류 체계를 개발하고 기능 저하 요인을 분석하였다. 이를 통해 최종적으로 훼손지 유형별 특성에 부합하는 구체적인 복원 전략 수립 방안을 제시하였다.

라) 훼손지 및 복원 목표 유형 분류 방법

(1) 비오톱 기반 훼손지 도출 및 훼손유형 설정

(가) 훼손지의 정의

훼손지 도출을 위해서는 우선 '훼손'에 대한 명확한 개념 정립이 요구된다. 법적 정의에 따르면 '환경훼손'이란 야생동식물의 남획 및 서식지 파괴, 생태계 질서 교란, 자연경관 훼손, 표토 유실 등으로 자연환경의 본래적 기능에 중대한 손상을 초래하는 상태를 의미한다(「환경정책기본법」 제3조). 윤주웅 등(2021)은 이를 공원관리 관점에서 구체화하여 "인위적·자연적 요인 또는 두 요인의 결합으로 자연구조사 기능이 본래 상태로 작동하지 못해 생태계에 부정적 영향을 끼치는 상태"로 정의하였다. 본 연구에서는 이러한 '기능적 손상'이 발생한 지역을 훼손지로 규정하고, 이를 공간적으로 식별·유형화하고자 하였다.

선행 연구(서정영, 2020; 환경부, 2023)에서는 주로 토지피복지도의 시계열 변화 분석을 통해 산림·초지·습지가 나지나 시가화 지역으로 변화한 곳을 훼손지로 추출하였다. 그러나 이러한 접근법은 광역적 스케일의 분석에는 유효하나, 국소적·미시적 규모에서의 생태적 질 저하를 파악하는 데에는 한계가 있다. 토지피복도 기반의 분석은 피복 유형의 변화 여부만을 탐지할 뿐, '식생이 존재하나 생태적 기능이 저하된 지역(예: 덩굴성 식물 피복지, 방치된 묵논 등)'을 정밀하게 식별하기 어렵기 때문이다.

이에 본 연구는 경기도에 이미 구축된 '도시생태현황지도(비오톱)'를 활용하여 기존 방법론의 한계를 보완하고자 하였다. 비오톱 지도는 현장조사를 토대로 토지이용, 식생 상태, 불투수 포장 여부 등을 정밀하게 반영하고 있어, 전국자연환경조사나 토지피복지도에 비해 훼손지 식별에 적합한 자료 특성을 갖는다(경기도, 2023).

(나) 훼손지 추출 및 유형분류 방법

본 연구는 비오톱 지도를 활용하여 훼손지를 추출하고, 이를 복원 정책 수립에 활용 가능한 형태로 유형화하였다. 구체적인 도출 및 분류 절차는 다음과 같다.

첫째, 경기도 비오톱의 전체 소분류 유형을 검토하여 훼손 상태를 나타내거나 생태적 기능이 현저히 저하된 18개 세부 유형을 1차로 선별하였다. 여기에는 단순히 개발된 나지뿐만 아니라 '산불 후 방치', '조림 실패지', '폐염전' 등 질적 훼손이 발생한 지역이 모두 포함된다.

둘째, 선별된 18개 유형을 체계적으로 그룹화하기 위해 기후에너지환경부(2020)의 「국토환경 녹색복원 마스터플랜 수립을 위한 연구」 등에서 제시된 훼손지 분류 체계를 분석의 준거 틀(Framework)로 참고하였다. 선행 연구들은 대체로 훼손의 '원인'과 '양상'을 기준으로 유형을 구분하고 있으나, 이는 국가 단위의 광역적 계획을 목적으로 설계되어 본 연구의 18개 미시적 비오톱 유형을 직접 대입하기에는 분류 위계(Hierarchy)와 세부 정의가 다르다는 한계가 있었다.

셋째, 이에 본 연구에서는 선행 연구의 핵심 분류 기준인 '훼손 원인'과 '물리적 특성'을 원용하되, 이를 18개 비오톱 유형 각각의 발생 기작에 부합하도록 재구성하였다. 구체적으로 각 비오톱 유형의 주된 훼손 특성을 세분화하여 기준을 마련하였다. 우선 '자연재해형'은 산불로 인한 토양 불안정화나 산사태 등 물리적 지반 붕괴가 동반된 경우로 한정하였으며, '산림훼손형'은 병충해나 덩굴류 피복 등 자연적 요인이라 하더라도 지반

변화 없이 식생의 활력도만 저하된 경우로 구분하여 차별화하였다. 또한, 영농 활동 중단으로 인해 자연 천이 과정이 교란된 지역은 ‘농업방치형’으로, 채광·채염 등 목적형 개발 후 원지형이 변형된 상태로 남은 지역은 ‘자원채취형’으로 정의하였다. 마지막으로 개발계획 취소 등 도시계획적 요인으로 인해 나대지 상태로 유후화된 지역은 ‘토지유후형’으로 분류하여, 최종적으로 5개의 유형을 정립하였다. 이때 각 훼손유형의 명칭은 복잡한 생태적 기작을 나열하기보다, 훼손을 유발한 ‘지배적 원인’과 ‘현상’을 직관적으로 드러냄으로써 정책적 전달력과 활용성을 높이고자 하였다.

이러한 재분류 과정을 통해 도출된 유형별 해당 비오톱 및 주요 훼손 원인은 아래 <표 II-1-35>와 같다. 본 분류 체계는 기존의 거시적 분류 틀을 경기도 비오톱의 미시적 현황 자료에 맞게 조작적으로 재정의했다는 점에서 방법론적 의의를 갖는다.

<표 II-1-32> 훼손유형별 해당 비오톱 유형

훼손유형	해당 비오톱	주요 훼손 원인	구분 기준
자연재해형	산불 후 방치	자연재해 발생 후 복구 미비	[토양기반 불안정화] 물리적 지반 훼손 및 토양 불안정화 동반
산림훼손형	교목성 생육 훼손지, 관목·초본성 생육 훼손지, 덩굴성 생육 훼손지, 산림나지, 벌채 후 방치, 조림 실패지	과도한 벌채 및 남벌 병충해 피해 및 덩굴류 피복으로 인한 산림 활력도 및 건강성 저하	[식생 질적 훼손] 지반 안정 상태에서 식생의 생리적 활력 저하
농업방치형	초본우점 목논, 목본우점 목논, 논 휴경지, 밭 휴경지	영농 포기 및 고령화에 따른 경작 중단	[천이과정 교란] 경작지 관리 부재로 인한 비정상적 천이 진행
자원채취형	폐염전, 폐염전 식생지, 채석장	자원(토석, 소금) 채취 종료 후 방치	[의도적 지형 변형] 채취 목적의 인위적·물리적 지형 변화
토지유후형	미이용 간척지, 녹지형 유후지, 나지형 유후지, 폐허지	개발계획 변경·취소 또는 시설 폐쇄·이전	[사회경제적 유후화] 도시계획적 요인에 의한 나대지 상태 유지

(2) 복원 목표 유형 체계 구축

자연환경복원 추진 지침(2024.6)에서는 훼손원인, 소실된 자연생태계 기능 등을 고려하여 주된 복원 사업 목표에 따라 7개 복원 목표 유형을 제시하고 있다(환경부, 2024a).

<표 II-1-33> 기후에너지환경부 자연환경복원 추진 지침의 7개 복원목표 유형

복원목표 유형	정의
① 지역환경 개선형	환경오염원 제거 및 정화 등을 통해 추진하는 복원유형
② 보호지역 내 복원형	보호지역 근거법에 따른 복원 관리 및 체계를 고려한 복원유형
③ 자연휴식 공간형	생태계서비스(특히 문화적 측면) 확충을 위한 녹색공간 제공, 경관개선 등을 위한 복원유형
④ 탄소저장 중심형	녹색공간 확보를 통한 탄소저장 증진 중심의 복원유형
⑤ 서식처 연결성 증진형	생태통로, 대체서식지 마련 등 연결성 확대를 통한 생태축 연결 중심의 복원유형
⑥ 서식처 회복형	채식지, 번식지, 휴식처 등 야생생물의 다양한 서식환경 회복 중심의 복원유형
⑦ 특정종 보전형	특정종 보전을 위해 서식기반 확보를 통한 생태환경 회복 중심의 복원유형

본 연구에서는 「자연환경복원 추진 지침」에서 제시하는 7개 복원 목표 유형을 연구의 공간적 범위와 데이터 특성에 맞춰 3개 핵심 유형으로 통합·재구성하였다. 이는 광역 단위 분석의 효율성을 높이고 실질적인 복원 전략을 도출하기 위한 것으로, 그 구체적인 근거와 유형별 기준은 다음과 같다.

우선 유형 통합의 배경에는 데이터의 가용성과 공간적 한계가 고려되었다. 지침상의 세부 유형(자연휴식공간형, 특정종보전형 등)을 명확히 구분하려면 정밀 서식 정보나 실제 탐방 수요와 같은 현장 데이터가 필수적이거나, 경기도 전역을 대상으로 하는 본 연구에서는 비오톱 지도와 생태계서비스(ES) 평가 결과 등 이미 구축된 공간정보를 활용해야 하는 현실적 제약이 존재하기 때문이다. 생태계서비스 기반 접근의 효율성 또한 중요한 고려사항이었다. 수질과 보호지역 관리를 제외한 나머지 유형들은 본질적으로 기능 회복을 지향하므로, 이를 사전에 임의로 분류하기보다 통합된 유형 내에서 정량적 ES 평가를 통해 취약 기능을 식별하는 것이 더 과학적이다. 아울러 기존의 수질오염총량관리제도나 보호지역 관리계획 등 확립된 정책 체계와의 연계성을 확보하여 정책 집행의 실효성을 높이고자 하였다.

이러한 기준에 따라 재정립된 3가지 복원목표 유형의 구체적인 대상과 목표는 다음과 같다.

‘지역 환경 개선형’은 기존 지침의 제1유형을 수용한 것으로, 「수도법」 제7조에 따른 상수원보호구역이나 「환경정책기본법」 제38조에 의해 지정된 ‘특별대책지역’ 내의 훼손지를 대상으로 한다. 환경오염 및 생태계 변화가 우려되는 이들 지역의 특성을 반영하여 수질정화 기능의 회복을 최우선 목표로 설정하였다.

‘보호지역 내 복원형’은 기존 지침의 제2유형에 해당하며, 생태자연도 1등급 지역, 보호지역에 해당하는 별도관리지역, 그리고 한반도 핵심 생태축인 백두대간 및 정맥의 마루금으로부터 300 m 이내 구역을 포함한다. 여기서 300 m 기준을 적용한 것은 보호지역 주변의 완충 공간(Buffer Zone)을 확보하여 가장자리 효과(Edge effect)를 저감하고, 파편화된 서식지를 면(Area) 단위로 연결하여 생태축의 실질적인 이동 통로 기능을 강화하기 위함이다. 이는 기후에너지환경부(2024)의 「자연환경복원사업 추진 지침」에서도 훼손지 반경 300 m 이내의 참조생태계 유무와 생태축 연결성을 복원 우선순위 평가의 핵심 척도로 삼고 있다는 점에 근거한다. 따라서 생태적 가치가 우수한 이들 지역에서는 생물다양성의 보전과 파편화된 서식지의 물리적·기능적 연결성 확보를 핵심 과제로 삼는다.

‘기능 회복형’은 상기 두 유형에 포함되지 않는 나머지 모든 훼손지를 포괄하는 유형이다. 이는 기존 지침의 제3유형부터 제7유형까지를 통합한 것으로, 획일적인 목표 대신 생태계서비스(ES) 평가를 통해 각 훼손지에서 가장 공급량이 부족한 취약 기능을 규명하고, 이를 선별적으로 회복시키는 맞춤형 전략을 지향한다.

〈표 II-1-34〉 복원목표 유형 분류 기준

통합 유형	기존 유형	분류 기준	핵심 복원 목표
지역환경 개선형	①	상수원보호구역, 수질오염총량관리 특별대책지역	수질정화 기능 회복
보호지역 내 복원형	②	생태자연도 1등급, 별도관리지역, 백두대간·정맥(300 m 버퍼)	서식처 보전, 생물다양성
기능 회복형	③~⑦	상기 유형 제외 지역	ES 평가 기반 취약 기능 회복

(3) 기능 회복형의 취약 생태계서비스(ES) 평가 및 식별 방법

(가) 평가 개요

앞서 도출된 3개 복원 목표 유형 중 ‘지역 환경 개선형’과 ‘보호지역 내 복원형’은 법·제도적 입지 특성에 따라 핵심 복원 목표가 사전에 확정된다. 반면, 이들 지역에 해당하지 않는 ‘기능 회복형’ 훼손지는 획일적인 목표 적용이 어려우므로, 정량적인 데이터 분석을 통해 해당 부지에서 가장 결핍된 기능을 규명하는 과정이 필요하다.

이에 본 연구에서는 경기 기후 플랫폼 구축 시 산출된 생태계서비스(ES) 평가 결과를 활용하여 기능 회복형 훼손지의 취약 기능을 식별하였다. 평가 항목은 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」 및 기후에너지환경부(2024b) 가이드라인의 4대 유형(공급·조절·문화·지지)을 기준으로 하되, 타 유형과의 목표 중복성 및 방법론적 한계를 고려하여 선별하였다.

구체적으로 ‘수질정화’는 지역환경 개선형의 핵심 목표로, ‘서식처질’과 ‘종다양성’은 보호지역 내 복원형의 주된 관리 대상에 해당하여 제외하였으며, ‘대기정화’는 정량적 공간 평가 기법의 부재로 배제하였다. 이에 따라 최종적으로 수자원공급, 기저유량, 탄소저장, 탄소흡수, 열섬저감, 침식조절, 관광가치, 경관가치 등 8개 항목을 평가 대상으로 확정하였다.

〈표 II-1-35〉 기능 회복형 훼손지의 취약 ES 평가 대상

서비스 유형	ES 평가 대상
공급서비스	수자원 공급, 기저유량
조절서비스	탄소저장, 탄소흡수, 열섬저감, 침식조절
문화서비스	관광가치, 경관가치

(나) 생태계서비스 항목별 평가 모델 및 방법

본 연구의 생태계서비스 평가는 ‘경기 기후 플랫폼’ 구축 사업을 통해 산출된 정량적 공간 데이터를 기반으로 수행되었다. 우선 공급서비스인 ‘수자원 공급’은 경기도 전역을 대상으로 InVEST Seasonal Water Yield 모형을 적용하여 평가하였다. 월별 기후자료를 토대로 강수와 증발산의 계절적 변동성 및 공간적 분포 특성을 분석함으로써, 연간 단위의 수자원 공급 잠재력을 격자 단위 데이터로 구축하였다. 조절서비스 중 ‘열섬저감’과 ‘침식방지’ 역시 InVEST 모형을 활용하였다. ‘열섬저감’은 Urban Cooling 모델을 통해 불투수면 비율, 식생 피복, 증발산량 등을 복합적으로 반영하여 픽셀 단위의 저감지수를 산출하였으며, ‘침식방지’는 Sediment Delivery Ratio (SDR) 모델에 강우 인자와 지형 조건(경사 등)을 대입하여 토양 침식량 및 하천 유입 토사량을 추정하였다.

조절서비스 중 ‘탄소저장 및 흡수’ 기능은 항공 LiDAR 데이터를 활용하여 보다 정밀하게 평가하였다. 산림을 포함한 비오톱 영역의 항공 LiDAR 점군(Point Cloud) 자료를 지면과 비지면으로 분류하여 3차원 수목 높이(CHM) 정보를 취득하고, Local-Maximum 방법을 적용해 개별 수목 정보를 도출하였다. 이후 지상 LiDAR로 보정된 수고-흉고직경 관계식과 상대생장식을 통해 정밀한 바이오매스를 계산하고, 최종적으로 IPCC 가이드라인(GL) 기준의 탄소 전환계수를 적용하여 비오톱별 탄소 저장량을 산출하였다(IPCC, 2006).

문화서비스는 ‘관광가치’와 ‘경관가치’ 항목을 대상으로 평가하였다. ‘관광가치’는 경기도 내 주요 관광자원(자연공원, 명승, 생태휴양림 등)의 공간 범위에 50 m 격자 단위의 유동인구 데이터를 중첩하여 분석하였다. 이때 자원별 특성과 접근성을 고려하여 단위 면적(100 m²)당 연간 관광객 방문 규모를 추정하였다. ‘경관가치’는 CATENA(경관가치 매트릭스) 기법을 적용하였다. 토지피복에 따른 경관유형별 상대적 가치(1~10점)를 부여하고, 여기에 경사도와 고도 등 지형적 특성을 결합하여 최종적인 경관가치지수를 도출하였다.

(다) 취약 ES 식별 절차

기능 회복형 훼손지의 복원 목표 설정을 위한 취약 생태계서비스(ES) 식별은 정량적 데이터 분석을 기반으로 총 4단계의 절차를 통해 수행되었다. 첫째, 앞서 구축된 8종의 생태계서비스 공간 데이터를 활용하여 각 훼손지 구역(Polygon) 내의 서비스별 평균 공급량을 산출하였다. 이를 위해 공간 분석 기법인 구역 통계(Zonal Statistics)를 적용하여 훼손지별 고유한 생태계서비스 보유 현황을 데이터화하였다.

둘째, 산출된 공급량 데이터의 정규화(Normalization) 과정을 수행하였다. 각 생태계서비스 항목은 물리적 단위(ton, %, 명/yr 등)와 값의 범위가 달라 단순 비교가 불가능하므로, 전체 훼손지 분포 내에서의 상대적 위치를 나타내는 백분위 점수(0~100점)로 환산하여 항목 간 비교가 가능하도록 표준화하였다.

셋째, 정규화된 점수를 바탕으로 훼손지별 취약 기능을 도출하였다. 8개 항목 중 가장 낮은 점수를 기록한 항목은 해당 훼손지에서 타 기능 대비 공급이 가장 부족한 상태임을 의미하므로, 이를 복원이 시급한 ‘취약 ES’로 식별하여 복원 목표로 설정하였다. 마지막으로, 최저 점수가 동일한 항목이 복수로 나타날 경우에는 복원의 시급성과 정책적 중요도를 고려하여 수자원 공급, 탄소 저장, 열섬 저감, 기타 항목 순으로 우선순위를 적용해 최종 목표를 확정하였다.

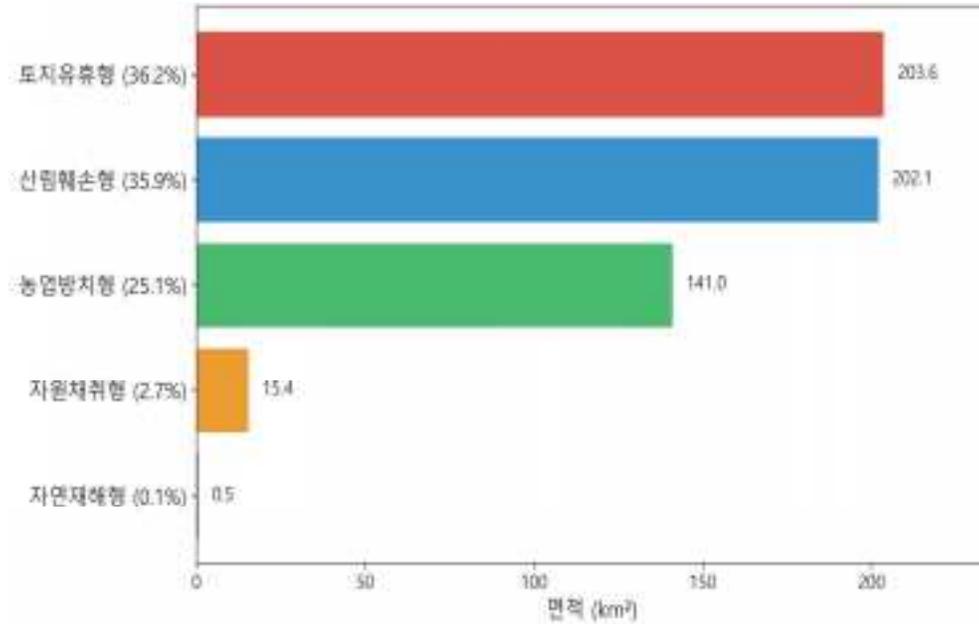
마) 분석 결과

(1) 훼손지 현황 및 분포

경기도 전역을 대상으로 비오톱 지도 기반의 훼손지를 추출한 결과, 총 124,032개소, 면적 562.7 km²의 훼손지가 확인되었다. 훼손 유형별 분포를 면적 기준으로 살펴보면, 토지유휴형이 36.2%(203.6 km²)로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 산림훼손형이 35.9%(202.1 km²)로 그 뒤를 이었다. 이어서 농업방치형이 25.1%(141.0 km²)를 차지하였으며, 자원채취형(2.7%, 15.4 km²)과 자연재해형(0.1%, 0.5 km²)은 상대적으로 낮은 비율을 보였다. 이는 경기도 내 훼손지가 주로 개발 중단이나 유희화, 또는 산림 내 인위적 간섭 때문에 발생하고 있음을 시사한다.

〈표 II-1-36〉 훼손유형별 현황

훼손유형	개수	면적(km ²)	비율(%)
토지유휴형	49,718	203.6	36.2
산림훼손형	37,884	202.1	35.9
농업방치형	36,279	141.0	25.1
자원채취형	94	15.4	2.7
자연재해형	57	0.5	0.1
계	124,032	562.7	100.0



〈그림 II-1-20〉 훼손유형별 면적 분포

(2) 지역별 분포

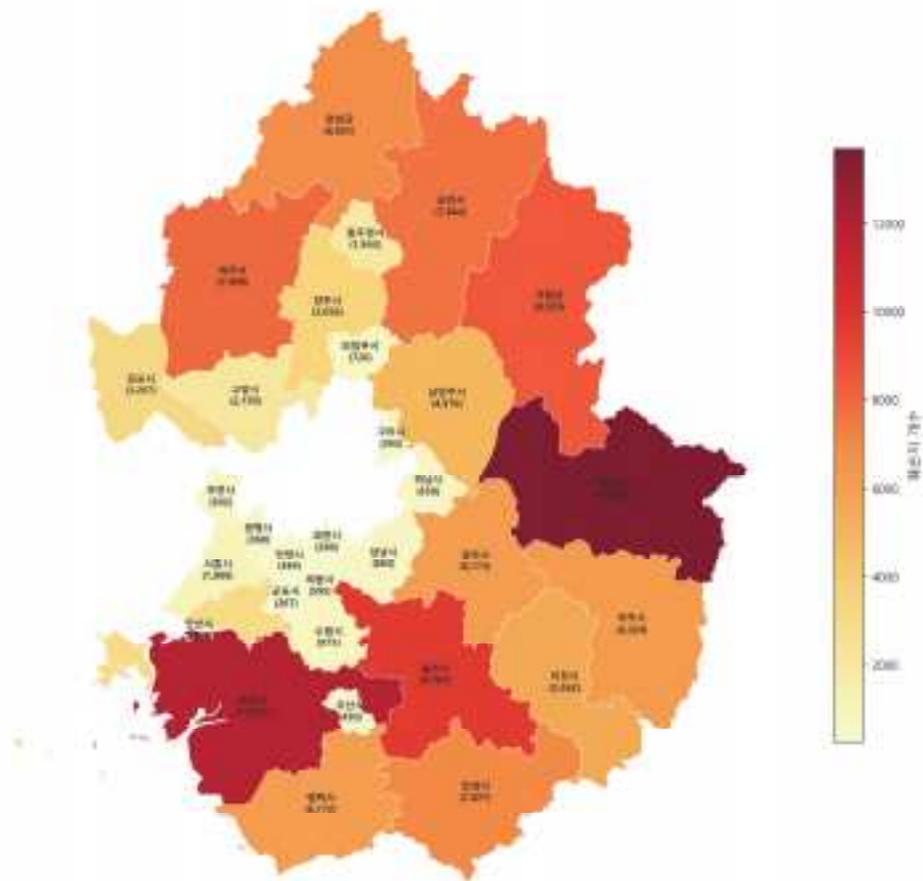
지자체별 훼손지 분포 특성은 개수와 면적 측면에서 다소 상이한 양상을 보였다. 훼손지 개수 기준으로는 양평군(13,682개)이 가장 많았으며, 화성시(11,997개), 용인시(9,701개) 순으로 나타났다. 반면 면적 기준으로는 연천군(113.3 km²)에 가장 넓은 훼손지가 분포하였고, 화성시(90.3 km²), 파주시(41.2 km²)가 그 뒤를 이었다. 특히 화성시는 개수와 면적 모두에서 상위권을 기록하여 훼손지 관리가 시급한 지역으로 분석되었으며, 연천군은 개수에 비해 면적이 넓게 나타나 대규모 훼손지가 분포하고 있는 것으로 파악되었다.

〈표 II-1-37〉 지자체별 훼손지 현황(면적 순)

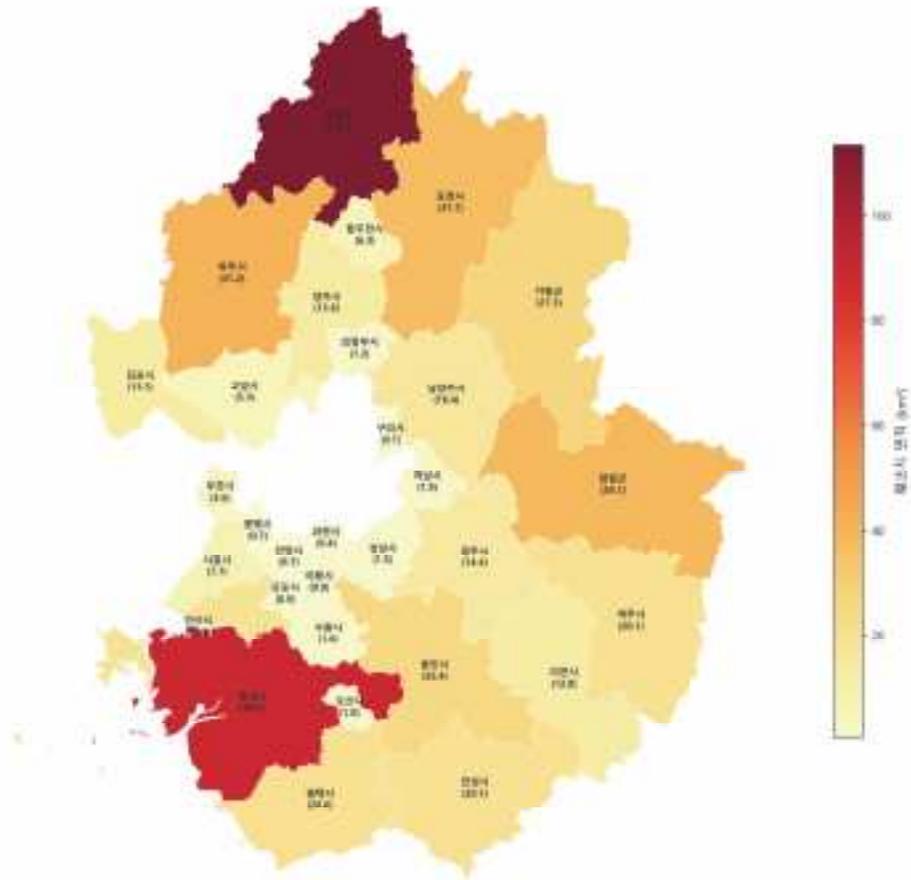
지자체	훼손지 개수	훼손지 면적(km²)
연천군	6,921	113.3
화성시	11,997	90.3
파주시	7,999	41.2
양평군	13,682	39.1
포천시	7,664	37.7
가평군	8,503	27.3
용인시	9,701	25.4
여주시	6,324	20.1
안성시	7,027	20.1
평택시	6,172	20.0
안산시	3,069	18.9
남양주시	4,976	16.4
광주시	6,173	14.4
양주시	3,656	13.6
김포시	3,267	13.3
이천시	5,562	12.8
시흥시	1,089	7.7
동두천시	1,943	6.3

지자체	훼손지 개수	훼손지 면적(km ²)
고양시	2,150	5.3
기타*	10	4.8
부천시	502	3.6
하남시	658	1.9
수원시	875	1.6
성남시	663	1.5
의정부시	726	1.2
오산시	450	1.0
의왕시	595	0.9
구리시	393	0.7
광명시	368	0.7
안양시	384	0.7
군포시	267	0.5
과천시	266	0.4
계	124,032	562.7

* 간척지·매립지 등 행정경계 외 지역



〈그림 II-1-21〉 경기도 시군구별 훼손지 분포 현황(개수)



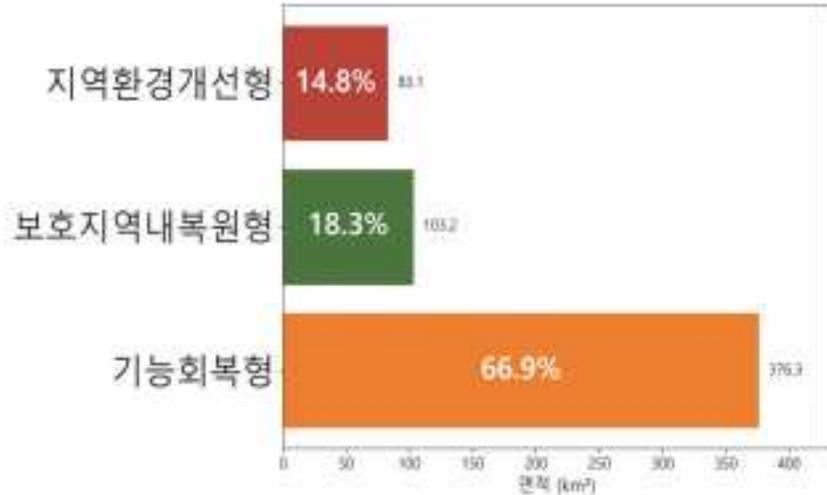
〈그림 II-1-22〉 경기도 시군구별 훼손지 분포 현황(면적)

(3) 복원 목표 유형별 훼손지 현황

도출된 훼손지를 3대 복원 목표 유형으로 분류하여 분석한 결과, ‘기능 회복형’이 전체 면적의 66.9%(376.3 km², 76,355개소)로 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 다음으로는 생태적 가치가 높은 지역인 ‘보호지역 내 복원형’이 18.3%(103.2 km², 17,547개소)를 차지하였으며, 수질 관리가 필수적인 ‘지역환경 개선형’은 14.8%(83.1 km², 30,130개소)로 나타났다. 이는 경기도 훼손지의 약 2/3가 특정한 법적 규제 지역 외에 분포하고 있어, 생태계서비스 기능 평가를 통한 맞춤형 복원 전략 수립이 중요함을 보여준다.

〈표 II-1-38〉 복원목표 유형별 현황

복원목표 유형	개수	면적(km ²)	비율(%)
기능 회복형	76,355	376.3	66.9
보호지역 내 복원형	17,547	103.2	18.3
지역환경 개선형	30,130	83.1	14.8
계	124,032	562.7	100.0

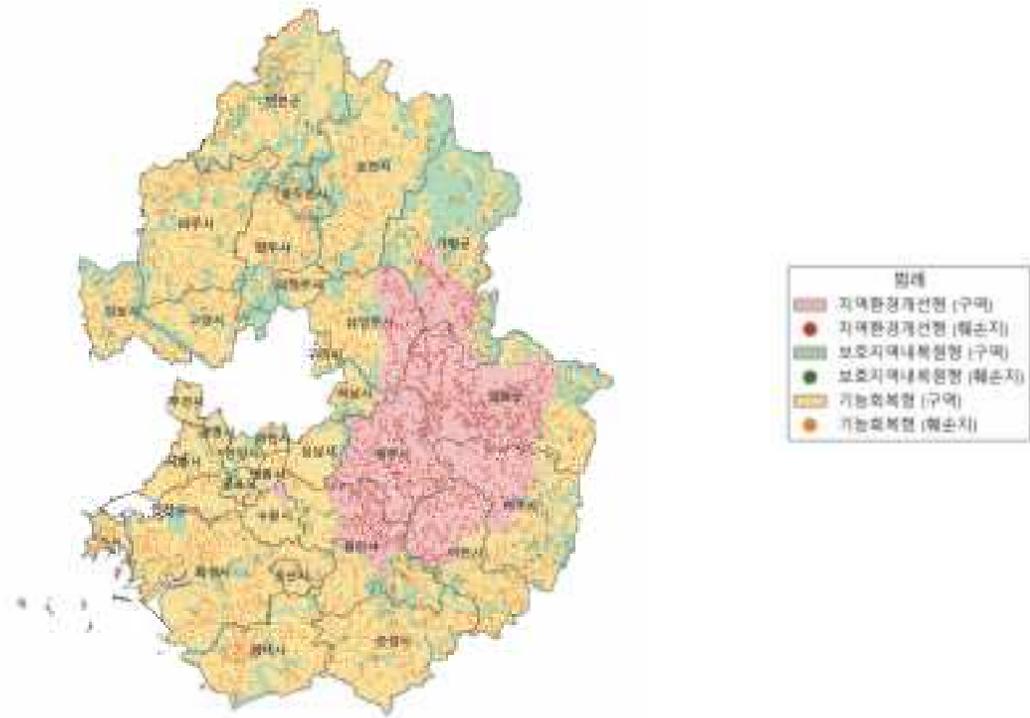


〈그림 II-1-23〉 복원 목표 유형별 면적 분포

(4) 복원 목표 유형별 특성 및 시사점

각 복원 목표 유형은 입지적 특성에 따라 다음과 같은 차별화된 복원 방향성을 갖는다.

- ① 지역환경 개선형 (14.8%): 상수원보호구역 등 법적 규제 지역 내에 분포하는 83.1km²의 훼손지이다. 이들 지역은 입지 특성상 수질 오염원 유입 차단이 시급하므로, 비점오염 저감 시설 및 수질정화 습지 조성을 통한 수질정화 기능 회복 전략이 우선 적용되어야 한다.
- ② 보호지역 내 복원형 (18.3%): 보호지역, 생태자연도 1등급, 백두대간-정맥 인근에 위치한 103.2km² 규모의 훼손지이다. 이 유형은 경기도 생태축의 핵심 거점에 해당하므로, 단순 녹화를 넘어 자생종 식재와 생태통로 확보를 통한 생물다양성 보전 및 서식지 연결에 집중해야 한다.
- ③ 기능 회복형 (66.9%): 전체 훼손지의 과반(376.3km²)을 차지하는 유형으로, 특정 법적 규제나 보호지역에 속하지 않는 일반 훼손지들이다. 이들은 지역별로 결핍된 생태계 기능이 상이하므로, 획일적인 접근보다는 취약 생태계서비스(ES) 진단에 기반한 맞춤형·기능적 복원 전략 수립이 필수적임을 시사한다.



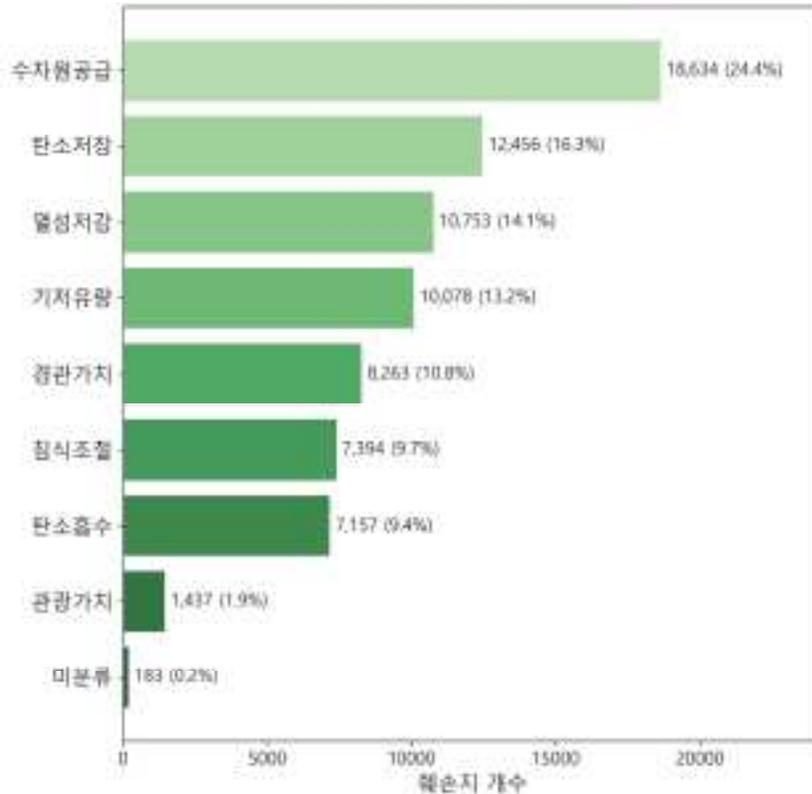
〈그림 II-1-24〉 복원목표 유형별 훼손지 분포 지도

(5) 기능 회복형의 취약 ES 분포

가장 큰 비중을 차지하는 '기능 회복형' 훼손지(76,355 개소)를 대상으로 취약 생태계서비스(ES)를 진단한 결과, 수자원 공급 기능이 취약한 지역이 24.4%(18,634 개소)로 가장 많았다. 이어 탄소저장(16.3%, 12,456 개소), 열섬저감(14.1%, 10,753 개소), 기저유량(13.2%, 10,078 개소) 순으로 취약성이 높게 나타났다. 그 외 경관가치(10.8%), 침식조절(9.7%), 탄소흡수(9.4%) 등이 뒤를 이었다. 이러한 결과는 경기도의 일반적인 훼손지 복원 사업 추진 시, 물 순환 기능(수원 함양 및 공급) 회복과 기후변화 대응(탄소 저장, 열섬 완화) 기능 강화를 위한 복원 기술 및 전략이 우선하여 고려되어야 함을 시사한다.

〈표 II-1-39〉 기능 회복형 훼손지별 취약 ES 식별 결과

취약 ES	개수	비율
수자원공급	18,634	24.4
탄소저장	12,456	16.3
열섬저감	10,753	14.1
기저유량	10,078	13.2
경관가치	8,263	10.8
침식조절	7,394	9.7
탄소흡수	7,157	9.4
관광가치	1,437	1.9
미분류	183	0.2
계	76,355	100.0



〈그림 II-1-25〉 기능 회복형 훼손지별 취약 ES 분포 비율

바) 복원 전략 수립

(1) 복원 목표 유형별 차별화 전략

도출된 3대 복원 목표 유형은 대상지가 지닌 입지적 특성과 법·제도적 요구사항에 따라 각기 다른 복원 철학과 전략이 있어야 한다. 본 연구에서는 훼손지 유형(자연재해, 산림훼손, 농업방치 등)과의 교차 분석을 통해 구체적인 실행 전략을 수립하였다.

우선, ‘지역환경 개선형’은 상수원보호구역이나 특별대책지역과 같이 수질 관리가 필수적인 지역을 대상으로 한다. 이 유형의 핵심 전략은 오염원의 유입 차단과 자연 정화 기능의 강화이다. 예를 들어 산사태 등 자연재해 발생지는 토사 유출로 인한 탁수 발생을 막기 위해 사면 안정화 및 식생 피복을 최우선으로 하며, 농업방치형 훼손지는 인공습지나 저류지로 전환하여 비점오염물질을 자연적으로 정화하도록 유도한다. 또한 도심 내 유흥지는 투수성 포장과 식생을 결합한 오염저감 녹지(Rain Garden 등)로 복원하여 초기 우수 유출을 관리한다.

‘보호지역 내 복원형’은 생태자연도 1등급 지역 및 주요 생태축에 위치하여 생물다양성 보전이 최우선 과제인 유형이다. 이곳에서는 인위적 간섭을 최소화하고 서식처의 질적 개선과 단절된 생태축의 연결에 집중한다. 산림 훼손지의 경우 자생 수종을 활용한 다층 구조의 숲을 조성하여 잠재자연식생(Potential Natural Vegetation)에 가깝게 복원하며, 폐채석장 등 자원채취형 훼손지는 원지형에 가깝게 복구하되 절벽부 등을 활용하여 멧금류나 박쥐 등 특정 생물의 서식처로 특화한다. 아울러 도로 등으로 단절된 구간은 생태통로를 설치하여 생태 네트워크의 연속성을 회복시킨다.

마지막으로 '기능 회복형'은 법적 보호지역이나 규제지역 외 일반 훼손지를 포괄하며, ES 평가에 기반하여 대상지별 취약 기능을 선별적으로 회복시키는 데 주안점을 둔다. 예를 들어, 수원 함양 기능이 취약한 산림은 침·활 혼효림 조성을 통해 수원함양림으로 유도하고, 탄소 흡수 및 경관 기능이 요구되는 농업방치 지역은 생태적 초지나 경관 농업지로 전환한다. 특히 도시 인근의 자원채취형 훼손지나 유희지는 기후대응 숲, 암석원 공원 등으로 재생하여 도시의 탄소 흡수원을 확충하고 기후탄력성을 높이는 방안을 적용한다.

〈표 II-1-40〉 복원목표 유형 및 훼손 원인별 복원 추진 전략

복원목표 유형	핵심 목표	훼손 유형	복원 방향	주요 복원 수단(안)
지역환경 개선형	수질정화 및 오염원 차단	자연재해형	토사유출 방지 및 안정화	사방시설, 사면녹화, 식생 피복
		산림훼손형	수질정화 기능 회복	수질정화습지, 완충녹지
		농업방치형	비점오염 저감	인공습지, 자연형 저류지 조성
		자원채취형	오염 확산 방지	토양개량, 광해 방지, 정화 식재
		토지유희형	비점오염원 관리	LID 기법(침투도랑, 빗물정원)
보호지역 내 복원형	생물다양성 보전 (서식지 연결)	자연재해형	생태계 자연회복 유도	최소개입, 모니터링
		산림훼손형	자생림(원식생) 복원	자생수종 다층 식재, 종다양성 증진
		농업방치형	습지생태계 복원	목논 습지화, 양서파충류 서식처 조성
		자원채취형	지형 복원 및 특화 서식처	훼손지 복구, 암벽성 조류 서식처
		토지유희형	생태축 연결	생태통로, 유도 울타리, 완충녹지
기능 회복형	취약 ES 맞춤형 복원 (기능 보완)	자연재해형	산림 재해 방지 기능 강화	사방댐, 산림유역관리, 예방 조림
		산림훼손형	수원함양 및 탄소흡수	혼효림, 탄소흡수 우수종 식재
		농업방치형	경관 및 생태농업 기능	경관작물 식재, 생태적 초지 조성
		자원채취형	복합 기능 공간(공원/탄소)	산림 레포츠, 문화공원, 탄소숲
		토지유희형	도시 기후탄력성 증진	기후대응숲, 도시공원, 텃밭

(2) 기능 회복형의 취약 ES별 세부 복원 방안

앞서 도출한 복원 목표 유형 중 전체 훼손지의 과반(66.9%)을 차지하는 '기능 회복형'은 대상지마다 저하된 생태적 기능이 다르므로, 획일적인 접근보다는 생태계서비스(ES) 평가 결과에 기반한 정밀한 맞춤형 처방이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 주요 취약 ES 항목을 규명하고, 각 기능 회복에 최적화된 구체적인 공학적·생태적 기술을 선별하였다.

우선 물 순환 기능이 취약한 지역은 '수자원 공급'과 '기저유량' 회복에 집중한다. 수자원 공급 확대를 위해서는 투수 블록이나 침투 도랑과 같은 저영향개발(LID) 기법을 적극 도입하고, 산림토양의 부식질 층을 확대 조성하여 토양 자체의 보수력을 증대시키는 전략을 취한다. 아울러 갈수기 하천 유지용수 확보가 시급한 기저유량 취약지에는 강우 시 빗물을 지하로 침투시키는 저류·함양 시설을 확충하고, 상류부 계류를 자연형으로 보전하여 유속 저감 및 자연 저수 기능을 강화한다.

기후 조절 기능은 '탄소 저장(Stock)'과 '탄소 흡수(Sequestration)'의 특성에 따라 관리 방향을 이원화한다.

이미 성숙하여 탄소 저장 기능이 높은 숲은 장기수(Long-lived trees) 위주의 육성 관리를 통해 벌기령을 연장하고 토양 유기물층의 훼손을 방지하는 ‘보전’에 무게를 둔다. 반면 탄소 흡수량이 부족한 곳은 생장률이 높은 속성수로 수종을 갱신하거나, 적절한 숲가꾸기(간벌)를 통해 잔존목의 성장 공간과 수광량을 확보함으로써 연간 탄소 격리량을 극대화하는 ‘적극적 관리’를 수행한다.

환경 조절 및 문화서비스의 경우, 도시열섬 저감을 위해 교목·관목·초본을 혼합한 다층 식재(Multi-layer)를 통해 증발산 냉각 효과를 높이고, 건축물 등 인공 구조물에는 벽면 및 옥상 녹화를 시행한다. 표토 유실 위험이 높은 침식 조절 취약지에는 지피식물을 피복시켜 뿌리 지지력을 강화하고, 사면 불안정 구간에는 돌망태나 식생매트 등 구조적 보강을 병행한다. 끝으로 관광 및 경관 가치 증진이 필요한 곳은 탐방로와 전망대를 조성하여 생태자원의 활용도를 높이되, 훼손 우려 지역에는 차폐 녹지를 조성하여 심미적 가치와 생태적 안정성을 동시에 확보한다.

〈표 II-1-41〉 기능 회복형 훼손지의 취약 ES 항목별 세부 적용 기술

취약 ES 항목	복원 목표	세부 기술 및 적용 방안
수자원 공급	수분 함양 및 침투능 향상	<ul style="list-style-type: none"> LID 기법 도입: 투수 블록, 침투 도랑, 빗물정원 설치 토양 개량: 산림 부식질층 확대로 보수력 증대
기저유량	갈수기 하천 유지용수 확보	<ul style="list-style-type: none"> 저류·침투 시설: 빗물 저장 및 지하수 함양 유도 계류 보전: 상류부 유속 조절 및 자연 저수 기능 강화
탄소 저장 (Stock)	현존 바이오매스 보전	<ul style="list-style-type: none"> 장기수 육성: 벌기령 연장을 통한 탄소 고정 유지 토양 보전: 임상 유기물층 훼손 방지 및 보호
탄소 흡수 (Flow)	연간 격리량 극대화	<ul style="list-style-type: none"> 수종 갱신: 생장률 높은 속성수 식재 숲가꾸기: 간벌을 통한 잔존목 성장 공간 확보
열섬 저감	증발산 냉각 및 그늘 효과	<ul style="list-style-type: none"> 다층 식재: 교목+관목+초본 복층 구조화 입체 녹화: 건축물 벽면 및 옥상 녹화 시행
침식 조절	표토 유실 방지	<ul style="list-style-type: none"> 지피 식재: 나지 노출 최소화 및 뿌리 지지력 강화 구조적 보강: 돌망태(Gabion), 식생매트, 산지 사방
관광/경관	생태자원 활용도 제고	<ul style="list-style-type: none"> 탐방 시설: 숲길, 전망대, 생태 해설 프로그램 운영 경관 식재: 경관 숲 조성 및 혐오시설 차폐 녹지

사) 결론 및 제언

(1) 연구 결과 요약

본 연구는 생태계서비스 개념을 도입하여 훼손지의 복원 목표 유형 분류 체계를 개발하고, 이를 경기도 전역에 시범 적용하여 그 실효성을 검증하였다. 분석 결과, 도내에서 총 124,032개소, 면적 562.7 km²에 달하는 훼손지가 추출되었으며, 유형별로는 토지유형(36.2%)과 산림훼손형(35.9%)이 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 도출된 훼손지를 3대 복원 목표 유형으로 재분류한 결과, 법적 규제 지역 외의 ‘기능 회복형’이 전체의 66.9%로 대다수를 차지하였으며, 이어 ‘보호지역 내 복원형’(18.3%), ‘지역환경 개선형’(14.8%) 순으로 분포하였다. 특히 기능 회복형 훼손지의 취약 생태계서비스를 진단한 결과, 수자원공급(24.4%), 탄소저장(16.3%), 열섬저감(14.1%) 기능이 상대적으로 취약한 것으로 분석되어, 향후 경기도 훼손지 복원 사업 추진 시 물 순환 체계 개선과 기후 조절 기능 회복이 핵심적인 해결 과제를 실증적으로 확인하였다.

(2) 연구의 의의

본 연구는 기존의 획일적인 녹화 위주의 복원 방식에서 탈피하여, 생태계서비스 평가에 기반한 과학적이고 정밀한 맞춤형 복원 전략 수립의 가능성을 제시하였다는 데 의의가 있다. 특히 기후에너지환경부의 「자연환경복원 추진 지침」 상의 7개 유형을 광역 단위 분석에 적합하도록 3개 핵심 유형으로 재구성함으로써, 정책의 현장 적용성과 집행의 실효성을 제고할 수 있는 방법론적 토대를 마련하였다.

(3) 향후 연구 방향

본 연구는 경기도 내 훼손지 복원 유형을 체계화하는 성과를 거두었으나, 정책의 정교함과 실현 가능성을 높이기 위해 다음과 같은 후속 연구가 요구된다.

첫째, 생태계서비스 수요 분석을 통한 유형 세분화 및 맞춤형 목표 설정이다. 본 연구는 데이터 가용성의 한계로 공급량 중심의 취약성 평가를 수행하여 비보호지역을 포괄적인 ‘기능 회복형’으로 분류하였다. 향후 연구에서는 지역 주민의 이용 수요(문화·조절서비스)와 생물종의 서식 필요성(지지서비스)을 정량화한 ‘수요 지도(Demand Map)’를 구축해야 한다. 이를 통해 ‘기능 회복형’ 내에서도 인간을 위한 ‘생활밀착형 복원(휴식, 기후대응)’과 자연을 위한 ‘생태적 복원(서식처, 종 보전)’을 명확히 구분하고, 수요-공급 불일치(Gap) 지역을 우선으로 선정하는 고도화된 의사결정 체계를 마련해야 한다.

둘째, 사업 실현 가능성을 고려한 다차원적 우선순위 평가 모델 개발이다. 생태적 시급성뿐만 아니라 복원 사업의 현실성을 담보할 수 있는 평가 지표가 보완되어야 한다. 훼손지의 토지 소유 현황(사유지 매입 용이성), 복원 소요 예산 대비 기대 효과, 접근성 등 사회·경제적 인자를 통합한 가중치 모델을 개발하여, 실제 정책 집행 시 예산 배분의 효율성을 높일 수 있는 기준을 제시할 필요가 있다.

셋째, 복원 효과 검증을 위한 모니터링 체계 의무화 및 적응적 관리 도입이다. 복원 목표 달성 여부를 판단하기 위해 사업 전·후의 생태계서비스 변화를 추적하는 장기 모니터링 체계를 제도화해야 한다. 아울러 모니터링 결과에 따라 유지관리 방식을 유연하게 변경하는 ‘적응적 관리(Adaptive Management)’ 가이드라인을 수립하여, 복원지의 생태적 기능이 지속적으로 유지·증진될 수 있도록 사후관리 체계를 구체화해야 한다.

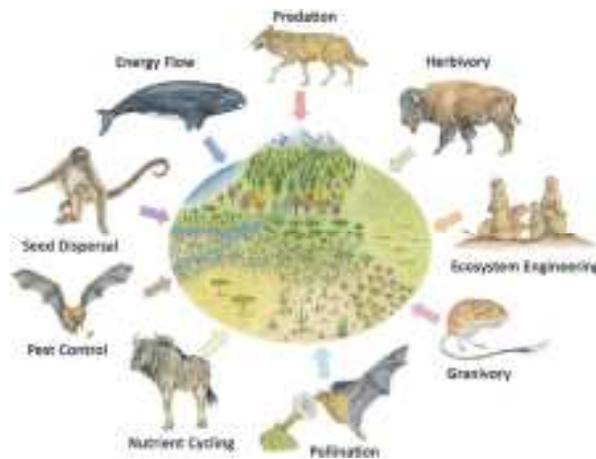
궁극적으로는 본 연구에서 정립된 분류 체계와 방법론을 전국 단위로 확대 적용하고, 지역별 특성에 맞는 데이터베이스(DB)를 구축함으로써 국가 차원의 체계적인 국토 환경 녹색 복원 전략 수립에 기여해야 할 것이다.

2) 생태계서비스 지표 평가 연구

가) 지표 선정 배경

생태계서비스 지표(Indicators of ecosystem services)에 대한 연구들은 토지피복, 식생 구조, 생산성 지표(NDVI)와 같이 정량화가 용이한 공간·원격탐사 기반 지표에 주로 의존해 왔다(Burkhard et al., 2012; de Araujo Barbosa et al., 2015). 최근에는 생태계 기능과 서비스 제공의 행위자로서 포유류의 역할을 정량화하여, 생태계서비스 및 환경건강의 지표종으로 활용하려는 시도가 증가하고 있다(Carey & Harrington, 2001; Dirzo et al., 2014). 산림 벌채나 산불 이후 사슴류와 양식동물의 재정착 능력을 조사한 연구 등은,

포유류의 기능적 역할을 반영한 포유류 군집 변화가 규제서비스, 유지서비스, 문화서비스 등 다양한 유형의 생태계 변동을 반영하는 기능적 지표가 될 수 있음을 제시하였다(Banks et al., 2011). 특히 소형 포유류의 경우, 종자 및 균류 포자의 확산, 먹이망 구조 유지, 중·대형 포식자의 먹이자원 제공 등 다양한 생태적 기능을 수행하며, 산림 기후변화 및 토지이용 변화에 대한 민감한 반응을 통해 환경건강 및 생태계서비스 잠재력을 진단하는 지표로 활용될 수 있음을 보여준다(Dirzo et al., 2014; Elliott et al., 2022). 본 연구에서는 야행성 비행 포유류인 박쥐를 대상으로 생태계서비스 평가의 지표종으로 활용하기 위한 기초적 분석을 수행하였다. 박쥐는 해충 조절, 수분 매개 및 종자 확산 등 다양한 생태계서비스를 제공할 뿐 아니라, 환경 변화에 민감하게 반응하는 생태학적 지표종으로 간주된다(Kunz et al., 2011; Tuneu-Corral et al., 2020). 박쥐는 기온, 습도, 입지 조건 등 서식환경 변화에 민감하게 반응하는 종으로서, 서식 환경 자료와 음향 녹음을 활용한 비침습적·연속적 모니터링은 공간·시간적 한계를 최소화할 수 있으며, 동굴환경과 같은 특수 서식지에서 발생하는 미기후 변동과 생태적 기능 변화를 감지하는 데 적합한 연구 방법으로 활용될 수 있을 것이다.



Mammals contribute a wide range of essential ecological functions, and their decline or extinction can diminish ecosystem processes and the services they provide(illustration: Sharyn Davidson)

〈그림 II-1-26〉 생태계 내에서 다양한 핵심 기능을 담당하는 포유류들의 예

나) 연구 대상 및 자료 수집 방법

본 연구에서는 안성 및 함평의 동굴을 대상으로 서식하고 있는 모든 박쥐목의 음향자료와 동굴 미기후(온·습도) 자료를 수집하여 박쥐 활동 특성과 동굴 환경의 안정성을 파악하였다. 안성과 함평의 박쥐 서식지는 폐광으로서 현장 육안조사 결과 관박쥐 등 3종과 속 수준으로 동정이 가능한 1 속(*Myotis*)의 박쥐를 확인 할 수 있었으며, 확인 된 박쥐는 모두 동굴 및 산림을 주요 서식지로 하는 식충성 박쥐로서 생태계 내에서는 해충 개체수 조절 등 다양한 생태계서비스 기능을 하고 있다. 수집된 음향자료는 안성의 경우 2025년 4월부터 7월까지의 기간 동안 일정 간격으로 녹음된 총 133,920건의 파일로 구성되었으며, 이 중 상용 프로그램을 이용하여 전처리를 통해 박쥐의 음성으로 분류하여 활용이 가능한 파일은 최소 64,031건으로 분류되었다. 함평의 경우 동일한 기간 내에 녹음된 총 217,414건의 파일로 구성되었으며, 이 중 최소 66,453건의 파일을 유효한 음향자료로 분류하였다. 동시에 기록된 미기후 자료는 음향 모니터링 장비가 작동한 동일한 기간 내 2시간 간격으로 수집되었으며, 동굴 입구와 내부 동면 구역 모두에서 연속적인 온·습도 변화를 확인하였다. 이를 바탕으로, 미기후 자료 분석 결과 계절적 변화에도 불구하고 동굴

내부 환경은 외부(입구) 환경에 비해 상대적으로 안정적인 온도와 높은 상대습도를 유지하는 것으로 나타났다.

〈표 II-1-42〉 음향모니터링 및 온습도 자료 수집 현황

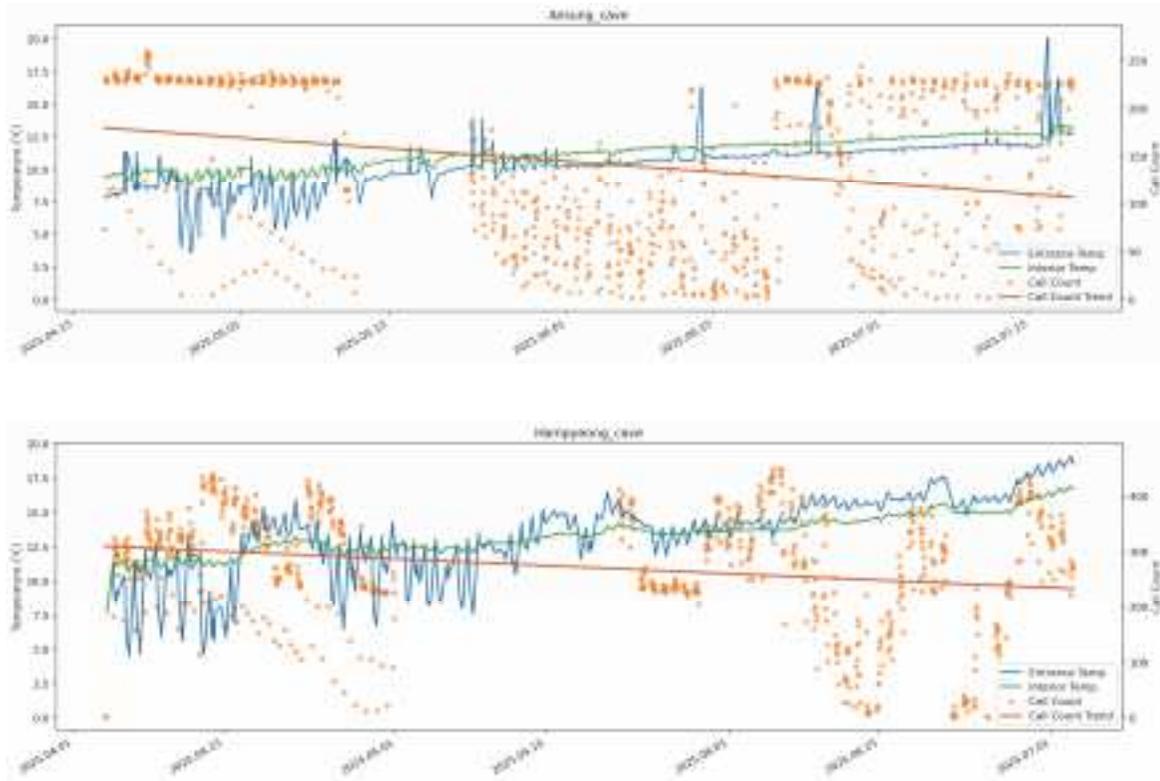
	안성	함평
수집기간	2025.04~2025.09	2025.04~2025.07
전체녹음 음향파일	133,920	217,414
분석가능 음향파일 수	64,031	66,453
온습도 자료	1,756	1,553

다) 수집 자료 분석

(입구 및 내부 온도의 시계열 분석) 안성과 함평 두 지역에서 확보된 음향자료와 미기후 자료를 기반으로 시계열적 변화를 분석하였다. 분석 결과 두 지역은 공통으로 동굴 내부의 안정적 미기후 특성을 보였으나, 박쥐 활동량과 입구 온도 변동 양상에서는 지역별 차이가 확인되었다. 함평 지역의 입구 온도는 안성에 비해 변동 폭이 크고 일시적인 급등 및 급락이 뚜렷하였다. 이는 외부 기온 변화가 동굴 입구에 더 직접적으로 반영되는 구조적 환경을 시사한다. 내부 온도의 경우 시간이 지나면서 완만하게 변동하는 계절변화 추세만 존재하였으며, 이에 따라 동면처로서의 안정적 미기후 특성이 유지됨을 확인하였고, 동굴 내부가 외부 환경을 완충하는 안정성을 지닌다는 공통점이 공통점으로 나타났다.

(음향 모니터링 장비를 활용한 활동 변화 분석) 박쥐의 활동량은 두 지역 모두 점진적인 감소 추세를 나타냈다. 이는 동면처로 활용하는 두 동굴에서 박쥐 개체군이 점차 떠나는 일반적인 생태 상태와 일치한다. 활동량을 파일녹음 횟수로 가정했을 때, 전체적으로 함평은 특정 시점에 집중적으로 동굴을 이용하는 패턴을 보였지만, 안성은 장기적으로 이용하는 형태가 나타났다. 실제로 동면기 두 동굴의 박쥐 군집은 함평은 수 마리, 안성은 수백 마리에 이르기 때문에, 이는 두 동굴의 구조적 특성, 공간적 개방성 및 장비 위치 등 포착 환경에 따라 다르게 기록된 것으로 판단된다.

(온도와 활동량과의 관계) 입구와 내부 온도와의 박쥐의 활동량(녹음파일 횟수 기준) 상관도는 낮은 것으로 판단된다. 특히 내부 온도는 안정적이기 때문에 활동량 변화와의 직접적 연관성이 낮게 나타나며, 입구 온도의 단기적 변동이 박쥐 행동 패턴과 더 유사한 변화를 보였다. 특히 활동량 감소의 주요 원인은 계절적 생리 상태(동면종료)의 영향을 받은 것으로 보이며, 이는 두 지역 모두 동면처로 활용하는 서식처임을 감안할 때, 추세선 감소 방향성과 일치한다.



〈그림 II-1-27〉 동면처 내 온습도 변화 및 음향모니터링 결과

라) 결론 및 제언

두 조사 구역에서의 박쥐 음향 자료와 동굴 미기후 자료를 연속적으로 수집 분석함으로써, 박쥐 활동과 서식환경의 변화를 정량적으로 파악할 수 있는 기초 자료를 확보하였다. 분석 결과, 동면처로 활용하는 두 지역 모두 동굴 내부는 외부 기후 변동에 비해 안정적인 온습도를 유지하는 것으로 나타나 동면처로서의 환경적 적합성이 확인되었으며, 이는 동굴이 제공하는 서식처 유지 기능의 생태계서비스 가치를 뒷받침한다(Perry, 2013). 또한 음향 자료는 계절변화에 따른 박쥐의 활동량 및 지역별 이용 특성의 차이 등 서식지 이용 패턴을 명확히 보여주어, 박쥐가 환경 변화에 대해 민감하게 반응하는 지표종으로 활용될 수 있음을 시사한다(Whiting, 2022).

앞으로는 박쥐 활동 자료와 외부 환경 요인을 통합 분석하여 생태계서비스와의 연계를 명확히 하고, 더 나아가 장기모니터링을 통한 기후변화·교란에 대한 반응성을 검증할 필요도 있을 것이다. 또한 본 연구에서 구축된 미기후-행동 기반 자료는 포유류를 활용한 생태계서비스 지표 개발을 위한 시범 연구로, 동굴생태계의 관리·보전 및 훼손지·복원지 평가를 위한 기반 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 생태계 계정(SEEA-EA) 도입을 위한 생태계서비스 시범 평가

1) 영국 생태계 계정 추진 과정

가) 평가의 시작(UK NEA 보고서 발간)

영국은 2011년 'UK National Ecosystem Assessment'를 통해 생태계서비스의 가치를 체계적으로 평가한 최초의 국가 중 하나로 이 평가에서는 생태계가 제공하는 물질적·비물질적 혜택(예: 식량 공급, 탄소 저장, 레크리에이션 등)을 정량화하고, 이를 경제적 가치로 환산하였다. 이를 통해 자연자본(Natural capital)의 중요성을 정책에 반영할 필요성을 강조하였다. UK NEA 보고서는 이후 생태계서비스 가치를 국가 정책 및 경제 계정에 통합하는 기초를 마련한 보고서로 볼 수 있다.

나) 자연자본 위원회(Natural Capital Committee, NCC) 설립·운영

UK NEA 이후, 자연 자본의 가치를 정책에 통합하기 위해 NCC를 설립했습니다. NCC는 생태계서비스를 국가 경제 계정에 반영하는 방안을 연구하고, 자연자본 계정(Natural Capital Accounts)의 틀을 제안했다. 생태계서비스(예: 대기질 개선, 수자원 공급 등)를 화폐 가치로 환산하고, 이를 국가 경제 지표(예: GDP)에 연계하는 방법론 개발을 개발하였으며, 2014년 NCC는 산림, 농지, 습지 등 주요 생태계 유형의 자산 가치를 추정하고 보고서를 발표하며, 생태계 계정의 초기 모델을 제시하였다.

다) 영국 통계청과의 협력

영국 통계청(Office for National Statistics, ONS)은 NCC와 협력하여 생태계 계정을 국가 계정 체계에 통합하는 작업을 진행하였다. ONS는 생태계서비스 화폐 가치를 정기적으로 추정해 발표하기 시작하였으며, 2018년 보고서에는 영국의 생태계서비스 연간 가치를 약 1,300억 파운드(한화 21조 원)로 추정하였다.

라) 환경계획과의 연계

영국 환경부(Defra)는 2017년 말 발표한 '25년 환경계획(25 Year Environment Plan)'을 통해 생태계서비스와 자연자본 관리의 중요성을 재확인하였으며, 이 계획에서는 생태계 계정을 활용해 환경정책의 효과를 측정하고 지속 가능한 발전을 도모하는 것을 목표로 한다.

마) 국제 표준과의 정합성

영국은 UN의 'System of Environmental-Economic Accounting(SEEA) 프레임워크를 채택해 생태계 계정을 표준화하였다. 2020년 들어 ONS는 SEEA 기반 생태계 계정 보고서를 정기적으로 발간하고 있다.

바) 최근 동향

영국은 2021년 환경법을 통해 생태계서비스와 자연자본의 가치를 법적으로 보호하고 관리하는 체계를 강화했습니다. 개발 프로젝트가 생물다양성 순이익(Biodiversity Net Gain, BNG)에 미치는 영향을 평가하고, 이를 생태계 계정에 반영해 보전 전략을 수립하였으며, 생태계 계정을 활용하여 개발 프로젝트의 환경 영향을 정량화하고, 생태계서비스 손실을 최소화하기 위한 정책 의사결정을 지원하는데 기여하도록 하였다.

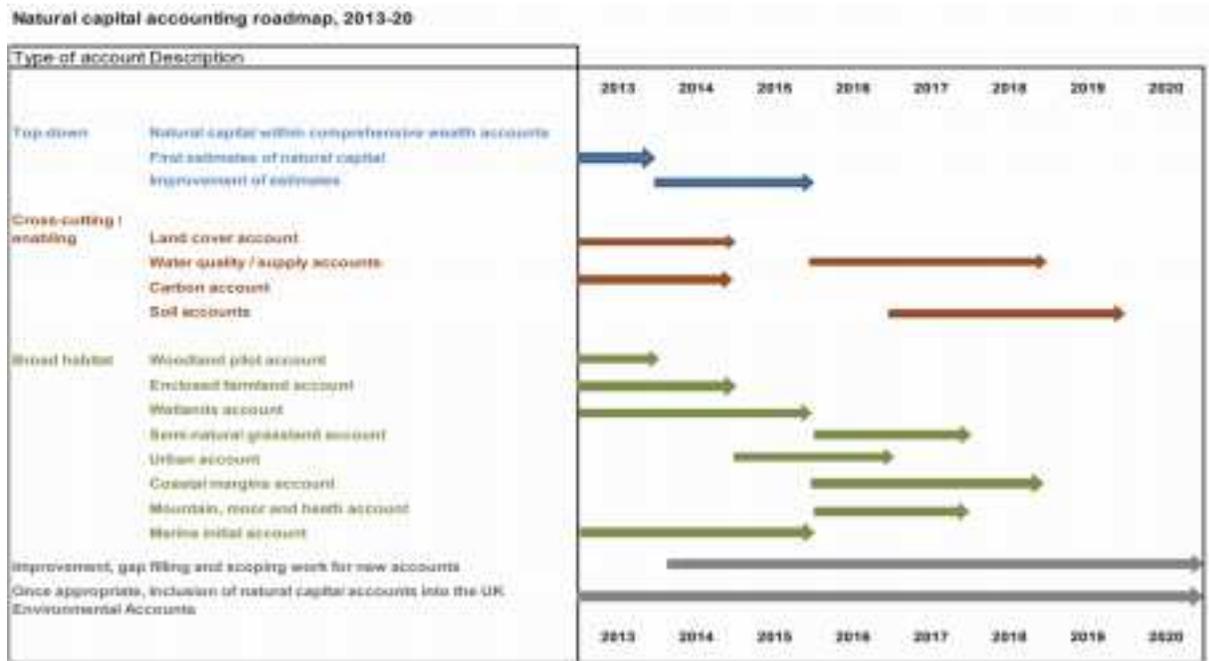
- 예: 농업 보조금 제도(Environmental Land Management Schemes, ELMS)는 생태계서비스 (예: 토양 보전, 생물다양성 증진)를 제공하는 농가를 지원하며, 이를 생태계 계정으로 모니터링

〈표 II-2-1〉 영국 생태계 계정 발전 과정

연도	주요내용
2011년: UK NEA 발표	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계서비스 경제적 가치 최초 평가 • 자연자본 중요성 강조, 정책 통합 기초 마련
2012~2020년: 자연자본위원회(NCC) 활동	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계 계정 틀 제안 • 생태계서비스(산림, 농지 등) 화폐 가치 추정
2016년 이후: ONS 생태계 계정 개발	<ul style="list-style-type: none"> • UN SEEA 기반 생태계서비스 정량화 • 연간 가치(2018년 약 1,300억 파운드) 정기 보고
2018년: 25년 환경계획	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계서비스 보전 및 자연자본 관리 목표 • 지역 단위 생태계 계정 시범 적용(예: 옥스퍼드셔)
2021년: 환경법 제정	<ul style="list-style-type: none"> • 생물다양성 순이익(BNG) 도입 • 생태계 계정 활용해 개발 영향 평가

사) 영국 자연자본 계정 개발 로드맵

2012년에 국가 통계청(ONS)과 Defra는 국가 자연 자본 계정 개발에 협력하기 시작하였으며, 여러 프로젝트 수행을 통해 2015년(ONS, 2015), 2020년에 자연 자본 계정 로드맵을 발간하였다. 영국 자연 자본 계정은 67개의 기관 275개 데이터 셀을 사용하였다.



〈그림 II-2-1〉 자연 자본 계정 로드맵(2013-2020)

최근 로드맵을 통해 제시된 성과로는 '13개 생태계서비스에 대한 정기적인 화폐 계정 생산', '스코틀랜드 국가 자연 자본 계정', '국가 계정 "Blue Book"에 자연 자본 계정을 포함', '8개 광범위한 서식지에 대한 서식지 계정', '팬데믹 정책 지원을 위한 분석 제공 능력', '별도의 이탄지 계정 및 복원 비용 계정', '영국 전역의 자연

상태 및 범위 계정'이 있다. 이후 향후 작업 계획에는 생태계서비스 추정 및 모니터링 확대, 국가 계정의 더 나은 상호작용을 위한 기존 지표 적용, 공간 해상도 증대, 기능적 관계 모델링, 경제-환경 계정체계 업데이트 등이 있다.

〈표 II-2-2〉 영국 생태계 계정화 로드맵에서의 향후 발전 방향

구분	설명
생태계서비스 추정 및 모니터링 확대	<ul style="list-style-type: none"> • 자연의 모든 이익을 측정하고 모니터링 하는 것은 무한한 작업임 • 지속해서 생태계 재화와 서비스의 범위를 확장하고 개선
물리적 열화(degradation) 추정	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계 자산의 기능 저하에 대한 자연자본 반영 한계 발생 • 자산의 기능 저하를 정량적으로 측정하고 이를 계정화 추진
공급-사용표(SUTs)	<ul style="list-style-type: none"> • 해당 연구에서 생산된 상품과 서비스를 어떤 자산(서식지)에서 발생하는지를 파악 • 국가 SUTs 연계와 통합을 통해 생태계서비스의 가치를 파악
비자연적 부정적 외부효과	<ul style="list-style-type: none"> • 자연자본 계정은 오염으로 인한 피해를 설명하지 못함 • 포괄적 부계정 생산을 위해 생산자와 연결된 대기오염의 연간 비용 생성을 지원 (기후변화로 인한 배출 비용 추정 포함, 기후변화의 순비용 모니터링 방법 개발)
공간 세분화	<ul style="list-style-type: none"> • 추정치의 공간세분화를 통해 정부, 지방당국, 기업, NGO 및 대중에게 정보 제공
기능적 관계 및 더 나은 예측	<ul style="list-style-type: none"> • 생태계 상태와 서비스와의 직접적 관계성이 없을 수도 있음 • 포괄적 부계정(inclusive wealth accounts) 생산을 위해서는 자산의 열화를 가격 변화와 별도로 추정해야 함 • 상태와 서비스의 관계에 관한 더 개선된 연구 필요

2) 영국 도시 생태계 계정

가) 개요 및 주요 변화

영국의 도시 자연자본 계정(Urban Natural Capital Accounts)은 전체 자연자본 계정(Natural Capital Accounts)의 일부로, 도시 지역 생태계서비스(예: 레크리에이션, 공기 정화, 도시 냉각 등)를 측정하고 가치 평가하는 데 초점을 맞췄다. 도시 자연자본 계정 역시 ONS(Office for National Statistics)와 Defra(Department for Environment, Food and Rural Affairs)의 협력으로 개발되었으며, UN SEEA(환경-경제 계정 시스템) 프레임워크를 기반으로 한다. 도시 계정은 도시 지역(인구 밀집 지역과 녹지/수역 포함)의 토지 규모, 상태, 서비스 가치를 추정하며, 정책적으로는 25년 환경계획(25 Year Environment Plan)과 연계되어 도시 녹지 인프라 강화, 기후 적응, 생물다양성 증진을 지원하도록 하고 있다.

〈표 II -2-3〉 연도별 영국 도시 생태계 계정 발전 단계

연도	주요내용	세부설명
2011	Defra 백서 《The Natural Choice: securing the value of nature》 발간. 자연자본 계정 생산 약속	<ul style="list-style-type: none"> 정부 계정에 자연자본 포함을 선언. 도시 녹지(공원, 수역 등)를 포함한 생태계 가치 평가 기반 마련 ONS와 협력으로 2013년 초기 변화, 2020년까지 로드맵 수립
2012	ONS-Defra 자연자본 계정 개발 협력 시작; 2020년 로드맵 발간	<ul style="list-style-type: none"> 국가 규모 계정 개발 개시. 도시 지역 포함 광범위 자연자원 측정(토지 범위, 상태, 서비스 가치) 학제적 접근으로 정부·학계·NGO 협력 강조
2017	eftec(Economics for the Environment Consultancy) 등에 의한 도시 계정 방법론 개발	<ul style="list-style-type: none"> 도시 정의(인구 밀집 지역 주변 버퍼 포함)와 가치 평가 방법(헤도닉 가격법 등) 수립 후속 도시 계정의 기반 마련, 도시 녹지 접근성·상태 지표 개발
2018	첫 도시 생태계 계정(UK Natural Capital: Ecosystem Accounts for Urban Areas) 발간	<ul style="list-style-type: none"> 도시 면적 31%가 자연 토지/녹지; 서비스 가치: 소음 조절, 도시냉각(0.5°C), 부동산 가치 £130억. 25년 환경계획 일환, 실험적 통계로 시작, SEEA 준수
2019	UK Natural Capital: Urban Accounts 계서판 발간	<ul style="list-style-type: none"> 도시 계정 초기 버전, 생태계서비스(식량 생산, 재생에너지, 공기오염 제거) 가치 평가
2022	자연자본 계정 로드맵 2022 발간	<ul style="list-style-type: none"> 도시·지역 수준 데이터 생산 강조(지방 정부·NGO 수요 반영) 도시 녹지 인프라(도로변·공원) 측정. Dasgupta Review 대응으로 열화 추정 추가
2023	도시 자연자본 계정 UK: 2023 발간: 방법론 가이드 업데이트.	<ul style="list-style-type: none"> 도시 토지 200만 헥타르(UK 8%); 총 자산 가치 £7,920억(2020년). 레크리에이션 건강 혜택 첫 포함(£3,240억) 공기 오염 제거 오류 수정 코로나 영향 반영(방문 20% 감소). SEEA EA 준수 강화
2024	UK 자연자본 계정 2024 발간: 도시 열 조절 서비스 지방 수준 데이터 첫 제공.	<ul style="list-style-type: none"> 도시 서식지 8% (1990년 6%에서 증가) 도시 열 조절 가치 £4.86억(2024년) 지방 자치단체 데이터로 정책지원 강화. State of Natural Capital Report for England 2024: 도시 온도 상승·홍수 위험 강조
2025	UK 자연자본 계정 2025 발간: ENCA(Enabling a Natural Capital Approach) 지침 업데이트.	<ul style="list-style-type: none"> 도시 서식지 여전 8%; 태양광 발전 24% 도시 기여 레크리에이션 건강 혜택 도시 최대 지방 수준 상호작용 데이터 제공 ENCA: 도시 녹지 인프라(다기능 공간) 강조, 정책 적용(건강·경제 개발·기후 적응) The role of natural capital in the UK's green economy 보고서(5월): ONS 데이터 인용, Defra ELMs(환경 토지 관리) 예산 £8.06억 언급

나) 목적 및 의의

도시 생태계 계정, 특히 주제별 계정이 도시계획, 도시관리, 투자결정 같은 공공 정책을 알리는 기회로 사용되어야 한다고 강조했다. 따라서 이러한 잠재적 사용은 도시 생태계 계정이 어떻게 작성되는지에 영향을 미쳐야 한다. 투자 결정 측면에서, 자연 기반 해결책과 관련된 미래의 변화를 결정하는 데 있어 계정의 잠재적 역할이 강조된다. 의사결정에서의 잠재적 사용을 보다 잘 지원하기 위해, 도시 생태계 계정에는 생태계 자산의 관리 및 복원에 대한 지출과 생태계서비스에서 파생된 이익의 지역 환경 정의적 정의(즉, 지역 환경정의 고려사항)를 포함한 보조 데이터가 포함되어야 한다.

3) 생태계 유형에 따른 도시 생태계 계정화 방법론 분석

가) 생태계 규모 계정화 방법 검토

생태계 유형 분류 측면에서, 도시 생태계 구분은 SEEA EA의 권장 사항을 따르고, IUCN GET 생태계 유형 분류를 참조로 기본적으로 사용하도록 하고 있다. EU 역시 다음과 같은 도시 생태계 유형으로 구분하고 있다. "정착지 및 기타 인공 지역" 생태계 유형은 도시 지역과의 관계에 상관없이 광물 채굴지, 도로 또는 철도, 또는 모든 종류의 매립지 등을 포함한 모든 인공 토지 피복을 의미한다. 또한, 도시적 특성이나 농촌적 특성과 관계없이 모든 종류의 건축물도 포함한다. 이는 모든 종류의 인간 유물이나, 맥락과 관계없이 단일 인공 물체를 허용하고, 도시 특성을 갖고 있는 주변 녹지 및 블루 오픈 스페이스는 포함하지 않는다. 생태계 계정 목적을 위해 "정착지 및 기타 인공 지역" 생태계 유형이 개념적 차이로 인해 도시 생태계를 대표한다고 가정할 수 없다. 넓은 의미에서 도시 생태계의 개념은 도시 지역을 형성하는 밀집된 건설 지역과 거기에 밀접하게 관련된 주변의 녹지 및 블루 오픈 스페이스를 의미한다. 이 개념에 따르면, 도시 생태계에서 건설 지역은 농업 생태계, 숲 및 담수 생태계와 같은 복합적인 모자이크를 구성하는 여러 구성 요소 중 하나에 불과하다(Maes et al., 2020a). "정착지 및 기타 인공 지역"과 "도시 생태계"에 대한 생태계 계정 지역 정의는 두 가지 다른 접근 방식을 따라야 합니다. 이는 EU 전역 방법론에서 상세히 설명하고 있다(Vallecillo et al., 2022). 첫 번째 경우, 이 접근법은 다른 생태계 유형과 자산을 생태계 계정 지역에서 구분하지 않으므로, 전체 EU-27 및 EFTA 회원국 영토와 같은 전체 생태계를 대상으로 하는 공간적으로 포괄적인 접근법이 적용됩니다. 그러나 두 번째 경우, 분석 범위가 도시 생태계(즉, 도시 생태계 계정)로 구체화되어야 하며, 이 경우 분석의 범위는 고도로 도시화된 지역과 그 주변으로 좁혀지며, 그 범위가 생태계 계정 지역을 정의한다.

최근 도시 생태계 계정 시범 사례에서는 생태계 계정 지역을 정의하기 위한 여러 가지 대안이 제안되었다. 하나는 인구 제약과 지역 및 도시적 특성을 구분하는 데 사용되는 지방의 행정적 경계를 기반으로 하는 것이다(Heris et al., 2021). 이는 지역 도시 정책을 포함한 정책사용의 일환으로 도시 생태계 계정 작성에 적합하다. 도시 생태계 규모 계정을 위한 생태계 경계 설정 구분에 관한 주요 논점과 이슈 내용은 아래와 같다(SEEA-EA).

① 도시 생태계와 인공 표면 간 구별: 도시 생태계는 도시 지역을 형성하는 인공 표면보다 더 넓은 범위를 포함한다(Vallecillo et al., 2022). 동시에 인공 표면은 도시 지역 밖에도 존재하며, SEEA EA는 도시 지역을 대표하는 특수한 특성을 인식하여 주제별 지도 개발을 허용하고 있다.

② 도시 생태계를 경관 모자이크로 구분: 도시 생태계는 인공 표면뿐만 아니라 다양한 "자연" 생태계 유형(예: 숲, 초원) 및 다른 생태계 자산들을 포함하는 경관 모자이크를 나타낸다. 이는 생태계 자산을 상호 배타적인 공간적 발생으로 정의하는 SEEA EA의 공간적 관점과 모순된다. 도시 생태계를 경관 모자이크로 재조정하는 것은 주제별 계정을 통해 가능하지만, 이 측면은 아직 명확히 정리되지 않고 있다.

③ 도시 생태계 계정 지역을 정의하는 최소 크기 및 기타 기준: SEEA EA는 도시 생태계를 정의할 공통된 기준 세트를 제시하지 않는다. 그 결과, 계정 목적과 다른 국가들에서는 다양한 기준을 적용하여 도시 생태계를 비조화적으로 구분하고 있다. 그에 따라 데이터 교환이 불가능해질 수 있다.

④ 도시 생태계의 하위 기능 그룹으로의 군집화: 다른 생태계와 마찬가지로 도시 생태계는 하위 기능 그룹으로 군집/분할되어야 한다(동일한 생태계 지역으로 분류됨). 이는 EU-wide Methodology에서 인정되고 있으며,

SEEA EA는 IUCN Global Ecosystem Typology를 포함한 다른 생태계들처럼 온도 및 수자원과 같은 생리적 기울기로 군집화된 숲과 같은 다른 생태계를 인정한다. 그러나 도시 생태계의 경우에는 다른 하위 기능 그룹에 따라 불공정한 비교를 피할 수 없기 때문에 하위 기능 그룹으로 군집화되지 않는다.

⑤ 단일 도시 생태계의 세부 생태계 유형으로의 내부 구분: 단일 도시 생태계 계정 지역을 도시 생태계 모자이크로 구성된 더 세부적인 생태계 유형으로 분해할 수 있어야 한다. 이는 도시 생태계의 일반적인 정의와 하위 기능 그룹으로 군집화하는 것과 마찬가지로, 세부 생태계 유형에서의 내부 구분이 다양한 이해관계자들 간의 조정하에 이루어져야 하며, 향후 비교, 데이터 교환을 허용해야 한다.

⑥ 도시 생태계 자산의 구분과 보고 단위, 국가 및 지역 정책 간 일관성: SEEA EA 생태계 계정은 원래 국가 및 국제 정책 범위를 위해 개발되었다. 그러나 도시 생태계 계정이 지역 정책 요구를 충족시킬 수 있는 큰 잠재력으로 인식되고 있다. 따라서 도시 생태계 자산과 보고 단위의 정의는 국가 및 지역 정책 범위 모두에 적합해야 한다.

영국에는 도시 지역을 구성하는 요소에 대한 다양한 정의가 있다. 이러한 교차적 서식지 분석에서, 건물 지역만을 지칭하는 좁은 의미의 "도시 서식지" 정의보다 더 넓은 의미의 도시 범위 정의를 사용하였다. 건물에 있는 도시 환경과 도시 녹지 공간 내에 존재하는 삼림 및 초원과 같은 다른 광범위한 서식지 간의 중요한 상호작용을 포착하려는 영국 계정의 목표에 부합하는 방식이다. 2021년 영국 도시 서식지의 면적 또는 "도시 규모"를 추정하기 위해 Economics for the Environment Consultancy(eftec)에서 만든 방법론을 따랐다. 이 도시 규모 계산 방법을 적용하여 영국 생태 및 수문학 센터 토지 피복 지도(LCM) 2021에서 이 지역 내 8개의 광범위한 서식지의 범위를 추정했다. 도시 규모 정의를 넘어 다양한 외부 데이터 자료를 사용하여 생태계서비스를 추정했으며 이러한 자료는 도시 범위를 정의하는 방법이 다르므로 완전히 비교할 수 없다. 영국에서는 1) 도시 서식지의 좁은 의미, 2) 녹지 및 수변 공간, 그리고 3) 제공서비스(접근성)으로 구분하여 규모 계정을 작성하고 있다.

<표 II -2-4> 영국 도시 지역 내 광활한 서식지의 범위, 2021년 예(출처 Source: Office for National Statistics, UK Centre for Ecology and Hydrology, and Economics for the Environment (eftec) and others

넓은 서식지	면적(헥타르)	전체 도시 면적의 비율
울타리로 둘러싸인 농지	351,034	17.2
삼림지	94,385	4.6
반자연 초지	23,865	1.2
담수, 습지, 범람원	17,837	0.9
해안 경계	6,560	0.3
산, 황무지, 관목지(heath)	5,078	0.2
선박	2,711	0.1
기타 총 서식지	501,470	24.6
도시 서식지	1,535,646	75.4
총 도시 면적	2,037,116	100.0

〈표 II-2-5〉 영국에서 가장 가까운 기능적 녹지 공간 유형까지의 평균 거리(미터), 2021년

규모(헥타르)	영국	스코틀랜드	웨일즈	대 브리튼 섬
블루 스페이스	20,471	1,656	1,432	23,559
기능적 녹지 공간	106,510	11,335	3,721	121,566
대중이 접근 가능한 기능적 녹지공간				
공원과 정원	41,198	4,387	1,080	46,665
운동장	22,292	2,212	1,174	25,678
묘지	5,972	686	239	6,896
종교부지	3,433	492	205	4130
비공개 접근이 가능한 기능적 공간				
골프장	15,355	1,899	222	17,476
지역사회 재배 공간	6,831	145	258	7,234
볼링 그림	258	217	22	497
기타 스포츠 시설	11,171	1,297	520	12,988
평균거리(미터)	영국	스코틀랜드	웨일즈	대 브리튼 섬
종교부지	781	921	839	796
골프장	3,008	2,230	2,913	2,938
운동장	750	811	659	751
공원이나 정원	867	900	1,147	881
묘지	1,810	1,728	1,718	1,799
기타 스포츠 시설	1,014	1,023	1,220	1,023
볼링그린	1,510	1,257	1,635	1,493
공동재배공간	1,035	3,493	1,387	1,258

나) 생태계 상태 계정 방법론

도시 생태계 상태 계정은 도시 지역의 생태계 상태를 모니터링하여 생태계서비스(예: 공기 오염 제거, 레크리에이션 건강 혜택) 제공 능력을 평가합니다. 상태지표는 UN SEEA 정의에 따라 생태계의 구성·구조·기능적 특성을 반영한다. 생태계 상태에 중요한 것은 기준 상태이다. 기준 상태는 과거, 현재 및 미래의 생태계 상태를 비교하여 시간에 따른 상대적인 변화를 측정하기 위해 사용되는 조건이다. 이는 생태계 상태 변수의 상위 기준을 설정하는 데 사용되는 생태계 상태를 나타낸다.

도시와 도시 생태학은 진정한 사회-생태-기술적 시스템입니다(Picket et al., 2016). 사회-생태-기술적 시스템으로서, 생태적 차원 외에도 사회적 및 기술적 차원은 도시 생태계에서 중요한 역할을 한다(Elmqvist et al., 2018). 이는 인간과 그들의 과정/기능, 특히 인공 구조물 및 과정(예: 인간의 이동성, 폐기물 생성 등)도 도시 생태계의 동역학을 완전히 이해하기 위해 모니터링해야 하며, 생태계 상태, 서비스 공급 및 수요에 어떻게 영향을 미치는지를 파악해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 도시 생태계의 경우, 생태계 상태의 개념은 다음과 같은 조정을 포함해야 한다.

도시 생태계에서, 원시적 즉 '손상되지 않은' 상태나 인간의 수정이나 변경이 없다고 해서 최적의 생태학적 완전성과 관련될 필요는 없다. 따라서 원시적 상태가 생태계의 유효한 기준이 될 수 없다. 생태학적 완전성,

회복력 및 건강, 이는 도시 생태계 상태를 뒷받침하는 개념으로, 인간을 핵심 구성 요소로 포함해야 한다. 도시 생태계는 인간이 주요 구성 요소로 존재하는 인간 활동 생태계이며, 이는 도시 생태계 상태의 모니터링과 평가에서 반영되어야 한다(Alberti et al., 2003).

최적의 도시 생태계 건강과 회복력은 생태계서비스에 대한 사회적 수요를 충족시키는 능력과 생태계의 장기적인 기능을 보장하는 능력을 요구한다. 이는 도시 생태계 상태 모니터링이 인간이나 기술 관련 변수, 생태계 회복력 및 건강에 대한 영향을 포함하는 생물학적 및 비생물학적 변수들이 어떻게 영향을 미치는지를 알려야 함을 의미한다. 결과적으로 도시 생태계 상태를 모니터링할 때, 도시 생태계 및 그에 의존하는 생태계 상태가 어떻게 영향을 미치는지에 대한 정보가 포함되어야 한다. 또한, 도시 생태계 상태가 지역 생태계서비스 공급에 미치는 영향뿐만 아니라, 도시에서 생산된 생태계서비스에 대한 수요에도 어떻게 영향을 미치는지를 고려해야 한다.

생태계 상태 계정과 개발과 관련된 주요 방향 내용은 다음과 같다.

① 생태계 상태와 생태계 규모 계정 구분: 생태계 하위 유형을 구분할 때 생태계 상태와 규모 계정 간의 구분이 흐려질 수 있다. 후자는 집합체 수준에서 상태 변수에 해당하는 특성의 기울기로 정의될 수 있다. 계정 문제를 피하기 위해 완전한 구현 전에 추가 규칙이 필요할 수 있다.

② 생태계 상태 변수 및 기준 상태의 공통 최소 그룹 선택: 도시 생태계의 경우, 생태계 상태 변수와 생태계서비스 흐름 간의 관계를 더 명확히 해야 한다. 생태계 상태와 서비스 계정의 목표 간 균형이 필요하며, 이는 상태 변수의 선택에 과도한 제약을 피할 수 있도록 해야 한다. 적합한 변수 세트 선택은 참조 수준을 식별할 가능성에 의해 제한된다. 인간 활동이 지배적인 생태계의 경우, 생태계서비스의 최적 공급(최적 상태의 결과)은 기준 수준을 정의하는 적합한 접근법일 수 있다.

③ 인간 활동 생태계를 사회-생태-기술적 시스템으로 설명하기 위한 상태 변수: 도시 생태계는 다른 인간 활동 생태계와 마찬가지로 사회-생태-기술적 시스템으로, 인간과 그들의 기술은 중요한 구성 요소입니다. SEEA EA 생태계 상태 계정은 도시 생태계의 경우 확장이 필요하며, 상태 변수의 선택은 자연적 특성과 엄격히 관련된 생태학적 변수의 범위를 넘게 된다.

④ 생태학적 완전성의 고전적 합리성에 기반하지 않은 인간 활동 생태계의 기준 조건: 인간 활동 생태계의 기준 생태계 상태는 고전적인 생태학적 완전성 개념에 기반하지 않으며, 이는 복원 개념에도 동일하게 적용된다. 이는 인간 활동 생태계에 일반적으로 부착되지 않으며 적용되지 않는다. 도시 생태계의 경우, 개념의 적응이 필요하다.

⑤ 생태계 상태 지표의 종합 지수로의 집합: 상태 지수로의 집합은 통계적 표준에서 선택적인 단계이다. SEEA EA는 생태계 상태 지표를 지수로 집합하는 가장 적합한 방법에 대해 열려 있다. 완전한 구현 전에 국가 및/또는 지역 당국 간에 공통된 접근법이 합의되어야 한다.

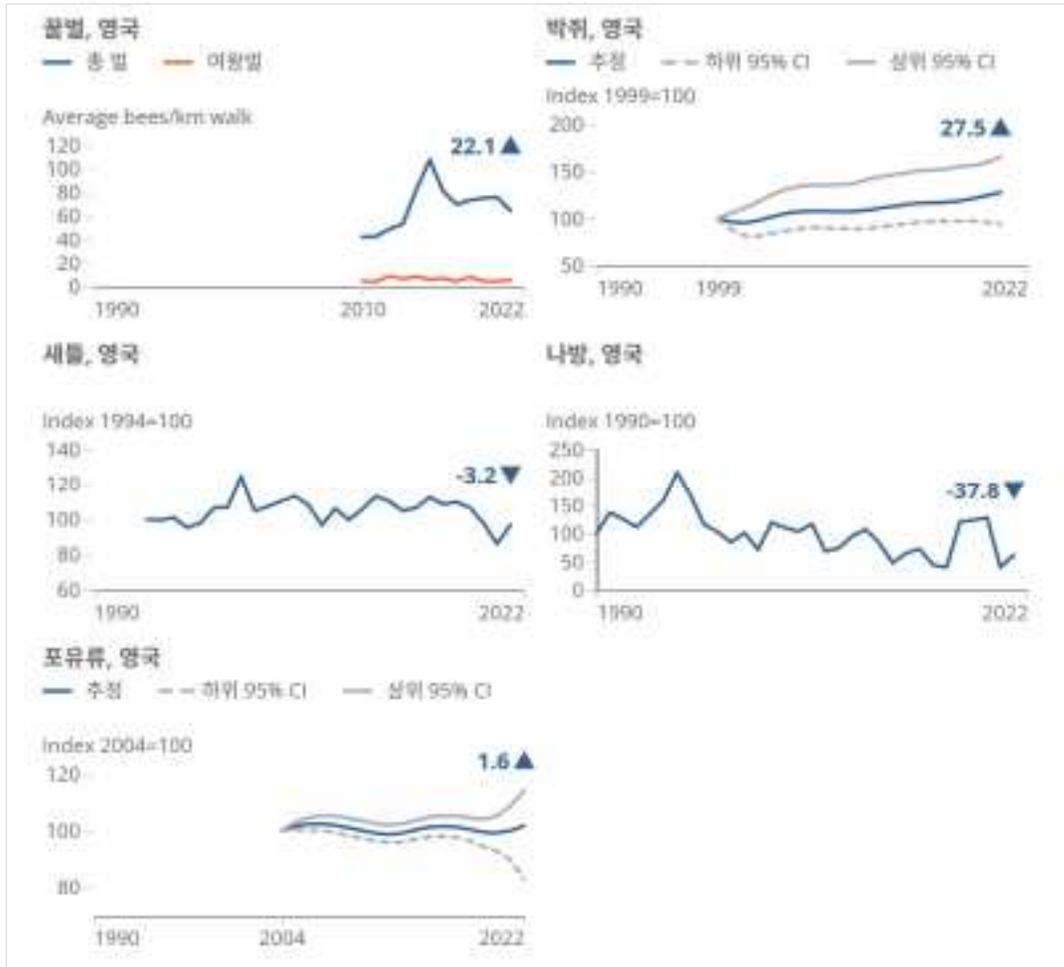
⑥ 생태계 상태 계정을 통한 생태계 악화에 대한 완전한 고려 (C): 도시 생태계는 이미 지역 및 글로벌 수준에서 다른 생태계에 큰 압력(직접적 및 간접적 영향)을 미친다. 이 압력은 도시 생태계 상태 계정에 반영되어야 하며, 도시 생태계가 생태계 악화에 미치는 영향을 보다 잘 알 수 있는 정보를 제공해야 한다.

생태계 상태 계정은 크게 1) 물리적 상태, 2) 화학적 상태, 3) 구성적 상태, 4) 구조적 상태, 5) 기능적 상태, 6) 경관 및 해양으로 구분된다.

〈표 II-2-6〉 도시 생태계 계정 지표(예)

구분	상태지표	단위
물리적 상태	주민 1인당 불투수성 비율 (불투수성 비율)	ha/인구
	주민 1인당 발생된 폐기물	kg 폐기물/인구
	정상화된 차이 습기 지수 (NDMI)	단위 없음
	소음 공해 노출	주민 수
화학적 상태	대기 오염 물질 농도 (NO ₂ , PM _x , O ₃ , SO ₂ , CO)	μg/m ³
	대기 오염 농도 (PM10 및 PM2.5)	μg/m ³
	연간 AQ 통계 (대기질)	μg/m ³
	토양 유기 탄소 저장량	kg C/ha
	토양 내 중금속	μg/g
구성적 상태	자생 수목 식물 종	종 수 (특징)
	도시 조류 종 다양성	종 수
	침입 외래종에 의한 압력	단위 없음
	녹지-최대 연간 NDVI	단위 없음
구조적 상태	나무 캐노피 덮개 비율	%
	녹지공간비율 및/또는 주민1인당 녹지공간비율	% 또는 ha/인구
	반자연적 및 자연적 하천 주변 토지 피복	%
기능적 상태	식물 증발산	mm/d
	녹지 네트워크 무결성	%
	녹지 네트워크 단편화	%
경관 및 해양	하천 주변 단편화	미터
	패치 다양성	단위 없음
	토지피복 형태의 Shannon 다양성 지수	단위 없음

영국 도시 생태계 상태지표를 구성종 지표(Compositional species indicators) 경관지표(landscape indicators)로 구분하여 측정하고 있다. 구성종 지표로는 박쥐, 꿀벌, 나방, 조류, 포유류가 있다.



〈그림 II-2-2〉 영국 도시 생태계 계정(생물다양성)

경관지표로는 아래와 같이 생울타리와 도시 수목면적이 있다. 생울타리 계정은 면적과 거리로 산정되어 제시된다. 도시 수목은 도시 작은 숲(Urban small woods), 도시 수목 그룹(Urban groups of trees), 도시 오픈스페이스에 외로이 서 있는 나무(Urban lone trees in open land) 3가지로 구성된다. 단위는 ha로 표시된다.

	Area (000 ha)	Length (000 km)
	Urban	Urban
England	8.5	31.0
Scotland	1.3	6.3
Wales	1.7	5.9
Great Britain	11.5	43.1

Source: Forest Research

〈그림 II-2-3〉 영국의 생울타리 면적과 길이(상태지표 예시)

	Urban small woods (000 ha)	Urban groups of trees (000 ha)	Urban lone trees in open land (000 ha)
England	56.8	67.3	11.8
Scotland	5.2	6.7	0.8
Wales	11.7	16.3	2.4
Great Britain	73.7	90.3	15.0

Source: Forest Research

〈그림 II-2-4〉 영국의 도시수목 면적(상태지표 예시)

또한 산불이나 불법 투기와 같은 일부 환경 압력 지표는 생태계 상태에 대한 잠재적 영향을 광범위하게 측정한다. 이러한 지표들은 생태계 상태를 직접적으로 측정하지 못하기 때문에 환경경제계정체계(SEEA)는 이러한 지표를 보조 지표 또는 대리 지표로 분류한다.

다) 생태계서비스 계정 방법

생태계서비스는 경제적 및 기타 인간 활동에서 사용되는 생태계의 기여를 의미한다. 생태계 용량은 현재 생태계 상태, 관리 및 사용 하에서, 동일한 또는 다른 생태계서비스의 미래 공급에 부정적인 영향을 미치지 않는 가장 높은 사용 수준으로 생태계 자산이 생태계서비스를 생성할 수 있는 능력이다(United Nations, 2021). 생태계 용량의 체계적 정의와 그것이 생태계 상태 개념과 연결되는 것에 대해 여전히 논의가 진행되고 있다. 인간이 중요한 구성 요소인 도시 생태계와 같은 인간 활동 생태계의 경우, 최적의 생태계 용량을 식별하는 것은 최적의 생태계 상태를 식별하는 데에도 도움이 될 수 있다.

도시 생태계는 서비스가 아닌 생태계 용량을 체계적인 접근법으로 다루는 것은 여러 가지 장점이 있다. 예를 들어, 이는 임계점을 포함한 생태계 용량과 관련된 한계를 고려하게 할 수 있다(United Nations, 2021). 또한, 몇 가지 서비스의 공급이 개별 생태계 용량에 따라 제한되면 다른 생태계 용량에 부정적인 영향을 미치지 않도록 보장할 수 있다. SEEA EA는 생태계 자산의 규모와 상태가 생태계 용량과 생태계서비스 공급에 영향을 미친다고 명시하고 있다(United Nations, 2021). 반면, 생태계서비스의 사용은 생태계 상태에 영향을 미치며(United Nations, 2021), 그 결과 생태계 용량과 미래의 생태계서비스 공급을 추정하는 데 중요하다. 따라서 생태계서비스 계정의 일환으로 생태계 용량을 추정하려면 지속 가능한 생태계서비스 흐름을 보장하는 것이 필요하다.

① 생태계 용량 정의에 대한 합의 및 생태계 규모 및 상태 계정과의 연관성: 생태계 용량과 생태계 규모 및 상태의 개념 간의 연관성은 더 깊이 고려되어야 하며, 구체적 측면으로는 생태계 용량의 체계적 정의의 합의, 특히 생태계 악화와 최적(기준) 상태 정의 및 측정에 관한 부분이 더 분석되어야 한다.

② 생태계서비스 및 자산의 보완적 가치 평가: 교환 가치를 제외한, 의사결정에 도움이 될 수 있는 다른 보완적인 가치 평가 방법들이 아직 개발되지 않았으며, 이는 불이익 및 부정적인 외부 효과의 평가를 포함한다.

③ 중간 생태계서비스 계정을 위한 명확한 원칙과 실천: 생태계 자산 간의 생태계서비스 흐름을 인식하는 것이 중요하다. 비록 최종 서비스가 아닐지라도, 자산 간의 교환과 상호 의존 관계를 추적하는 데 도움이 될 수 있다. 이를 통해 계정 체계는 서비스 공급에서 생태계 자산 간의 연계를 설명하는 생태적 생산 함수의 개발을

지원할 수 있다. 따라서 최종 서비스가 아닐지라도 이러한 중간 계정에 대한 명확한 원칙과 실천을 설정하는 것이 필요하다.

〈표 II-2-7〉 2020년 서비스별 영국 국가별 도시 연간 물리적 흐름 분석

구분	생태계서비스 항목	단위
공급	식량 생산	kg
	재생에너지-지역 태양광 발전	기가와트
조절	탄소격리	톤(CO ₂)
	대기오염 저감	톤
	소음저감	혜택받는 건물 수
	도시냉각	고온일수
문화	관광과 레크리에이션	방문자 수
	건강 혜택	혜택받는 사람 수

3) 국내 도시 자연 자본 생태계 계정화를 위한 시범 평가

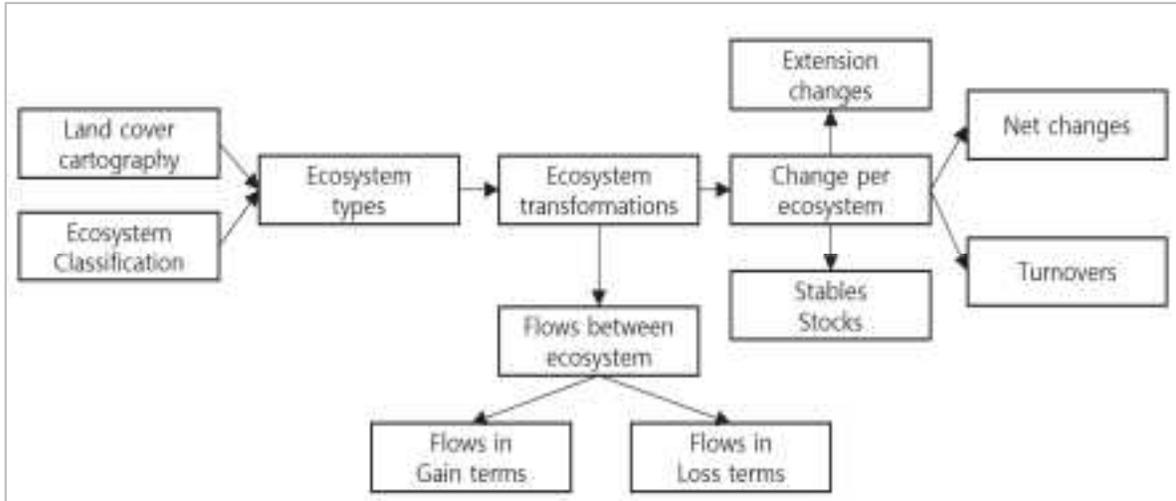
가) 토지피복도를 이용한 도시 생태계 규모 계정

본 연구에서는 IUCN GET을 기준으로 '집중적 토지이용(Intensive land-use)'에 대한 국가 전체 차원에서 변화를 파악하였다. 집중적 토지이용은 도시적 토지이용의 대표적인 생태계로 구분된다. 아래의 표는 기후에너지환경부 대분류 토지피복도와 IUCN GET(Biome) 수준에서의 비교를 보여주고 있다(Keith et al., 2020).

〈표 II-2-8〉 기후에너지환경부 토지피복도와 IUCN GET와의 분류 차이 분석 결과(농경지)

기후에너지환경부 대분류 토지피복도		IUCN GET Biome(s)		
도시화 지역 (불투수층)	주거시설, 상업/공업시설, 교통시설 등 건조물이 있는 지역	T7.	집중적 토지이용(육상)	인간 활동을 기반으로 하는 농업 및 도시 생태계, 경작지 및 기반시설
농업지역	논/밭 농경, 과수/가로수 재배, 축산 시설 등이 있는 지역			농업 기반의 인공 생태계; 영양분 순환
산림	집단 수목이 있는 토지	T1.	열대-아열대 숲	열대/온대림 및 관목지; 광합성 및 탄소 저장 기능
		T2.	온대-한대림 및 삼림지대	
		T3.	관목지 및 관목림(육상)	
초지	초본 식물이 덮인 토지(자연 또는 인공)	T4	사바나 and 초원(육상)	사바나와 초원; 방목 및 화재 순환 기능
습지	수분을 유지하는 축축한 토지	TF1	습지(육상-담수 전이지대)	습지; 수문 순환 및 여과 기능
나지	식생이 없는 맨땅.	T5	사막과 반사막	사막 및 반사막; 극지방 및 고산지대를 포함한 극한 환경에 대한 적응
		T6	극지와 고산(대륙)	
수역	물이 고인 지역(호수, 저수지, 늪 등)	F1	강과 시냇물	담수 강과 호수; 해양 대륙붕과 대양; 수중 순환
		F2	호수(담수)	
		M1	해양 선반	
		M2	원양 해수(해양)	

생태계 규모 계정 작성을 위해서는 먼저 토지피복도와 같은 공간자료를 활용하여 생태계 유형을 체계적으로 분류한다. 이후 유형별 변화량, 즉 증가, 감소 및 순변화량(Net change)을 산정함으로써 생태계 변화를 정량적으로 파악할 수 있다. 계정표(Accounting statement)와 교차행렬표(Cross-Tabulation Matrix)를 활용하면 생태계 유형 간 전환 양상도 체계적으로 분석할 수 있다. <그림 II-2-38>은 계정 산출을 위한 절차와 주요 과정을 도식화한 것이다.



<그림 II-2-5> 생태계 규모 계정 절차

(1) 1990~2000년 생태계 전환 특성

1990년과 2000년 사이 동안의 규모 전환 면적을 보면 도시(13,303 km²), 초지(5,803 km²), 나지(4,037 km²)는 증가하지만, 산림(-756 km²), 농경지(-19,585 km²), 수역(-1,292 km²)은 감소한 것으로 나타났다. 세부적으로 살펴보면, 도시 생태계는 1990년 대비 2000년에 상대적으로 면적 증가율이 가장 높았으며, 초기 면적 21,310 km² 기준으로 62.4% 증가(+13,303 km²)를 기록하였다. 나지와 습지는 각각 31.4%, -20.5%의 변화율을 나타냈으며, 산림생태계는 시작 대비 추가 및 감소 면적이 유사하여 변화율(-0.1%)이 매우 낮게 나타났다. 생태계 유형별 내부적 면적 유지율을 살펴보면, 산림생태계는 전체 면적의 약 90%가 유지되어 안정적인 특성을 보였으며, 다음으로 농경지와 도시는 각각 63.7%와 59.1%의 면적이 유지되었다. 반면, 나지(14.3%)와 초지(18.4%)는 상대적으로 변화폭이 큰 것으로 나타났다.

<표 II-2-9> 생태계 규모 계정표 1990-2000

(단위: km ² , %)	생태계 유형						
	시가화건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역
생태계 규모 1990	21,310	237,865	669,716	38,022	7,399	12,892	20,883
초기 대비 규모 저감	8,711	86,359	66,970	31,044	4,987	11,047	7,543
초기 대비 규모 증가	22,014	66,774	66,214	36,847	3,467	15,094	6,251
초기 대비 순규모변화(증가-저감)	13,303	-19,585	-756	5,803	-1,520	4,047	-1,292
초기 대비 순규모변화(%)	62.4	-8.2	-0.1	15.3	-20.5	31.4	-6.2
생태계 규모 2000	34,613	218,280	668,960	43,825	5,879	16,939	19,591
안정적 생태계 재고	12,599	151,506	602,746	6,978	2,412	1,845	13,340
안정적 생태계 재고(%)	59.1	63.7	90	18.4	32.6	14.3	63.8

각 생태계 유형 사이의 전환 특성을 보면, 도시 생태계 면적 증가에 가장 크게 기여한 생태계는 농경지인 것으로 나타났다. 농경지생태계는 산림과 초지에서 상당 부분 전환이 이루어졌으며, 추가 및 감소 면적이 유사하게 나타나 순 변화량(Net Change)은 낮은 수준으로 분석되었다. 초지 생태계는 내부적 변화가 상대적으로 큰 유형으로, 농경지 및 산림생태계로부터의 전환 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 습지생태계는 농경지(습지 → 농경지) 및 수역(수역 → 습지)과의 면적 전환이 주요 요인으로 분석되었다. 나지 생태계는 변화폭이 큰 유형으로, 유지 면적 대비 전환 면적이 큰 것으로 나타났으며, 도시 및 농경지로의 전환뿐만 아니라 기존 농경지가 나지로 전환되는 면적 또한 상당히 큰 것으로 확인되었다(표 II-2-55).

〈표 II-2-10〉 생태계 변화 매트릭스 1990-2000

	시가화건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역	시작 (1990)
시가화건조지역	12,599	4,322	1,354	1,255	126	1,348	306	21,310
농업지역	12,963	151,506	45,953	17,015	571	8,006	1,851	237,865
산림지역	3,860	40,776	602,746	16,930	261	3,467	1,676	669,716
초지	1,630	12,493	15,513	6,978	64	1,012	332	38,022
습지	523	2,546	460	165	2,412	419	874	7,399
나지	2,198	4,819	1,635	1,055	128	1,845	1,212	12,892
수역	840	1,818	1,299	427	2,317	842	13,340	20,883
종료 (2000)	34,613	218,280	668,960	43,825	5,879	16,939	19,591	

(2) 2000~2010년 생태계 전환 특성

2000년과 2010년 두 시기 사이의 생태계 변화 특성을 순변화 기준, 농경지(-5.5%), 초지(-35.0%), 습지(-28.8%), 나지(-2.4%)의 면적은 감소했지만, 도시(20.3%)와 산림생태계(3.5%)는 면적이 증가한 것으로 나타났다. 특히 산림생태계는 과거 1990년과 2000년 사이에는 -0.1%로 미미하게 감소하였으나, 이 시기에는 3.5% 많이 증가한 것으로 나타났다. 각 생태계 유형별 내부 면적 유지 비율은 도시 74.8%, 농경지 77.4%, 숲 95.4%, 초지 35.8%, 습지 55.2%, 나지 45.7%로 나타나, 전반적으로 과거에 안정적인 면적을 유지 경향을 보였다.

〈표 II-2-11〉 생태계 규모 계정표 2000-2010

(단위: km ² , %)	생태계 유형						
	시가화건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역
생태계 규모 2000	34,614	218,277	668,960	43,826	5,878	16,937	19,591
초기 대비 규모 저감	8,735	49,312	31,084	28,137	2,633	9,193	3,486
초기 대비 규모 증가	15,769	37,248	54,190	12,816	939	8,785	2,833
초기 대비 순규모변화(증가-저감)	7,034	-12,064	23,106	-15,321	-1,694	-408	-653
초기 대비 순규모변화(%)	20.3	-5.5	3.5	-35.0	-28.8	-2.4	-3.3
생태계 규모 2010	41,648	206,213	692,066	28,505	4,184	16,259	18,938
안정적 생태계 재고	25,879	168,965	637,876	15,689	3,245	7,744	16,105
안정적 생태계 재고(%)	74.8	77.4	95.4	35.8	55.2	45.7	82.2

유형별 전화 특성을 보면 도시생태계는 이전 분석과 마찬가지로 농경지에서 도시로의 전환이 가장 크게 나타났다. 또한 농경지는 도시뿐만 아니라 산림생태계와의 면적 전환에서도 크게 기여를 한 것으로 확인되었다. 초지생태계는 대폭 감소하였는데, 이는 일부 초지가 산림으로 전환된 결과로 판단된다. 습지생태계 감소의 원인은 농경지로의 전환(1,414 km²)이 주요 원인으로 나타났다. 또한 나지생태계는 도시생태계로의 전환 면적이 큰 것으로 나타났으며, 기존 나지의 유지 면적(7,744 km²) 대비 변화(3,746 km²) 폭이 상당한 것으로 확인되었다.

〈표 II-2-12〉 생태계 변화 매트릭스 2000-2010

	시가화건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역	시작 (2000)
시가화건조지역	25,879	4,460	1,601	897	84	1,454	239	34,614
농업지역	7,228	168,965	31,709	5,582	273	3,392	1,128	218,277
산림지역	2,259	20,674	637,876	5090	124	2,225	712	668,960
초지	1,881	7,151	18007	15,689	37	826	235	43,826
습지	286	1,414	188	247	3,245	224	274	5,878
나지	3,746	2,811	1,525	806	60	7,744	245	16,937
수역	369	738	1,160	194	361	664	16,105	19,591
종료 (2010)	41,648	206,213	692,066	28,505	4,184	16,529	18,938	

(3) 2010~2020년 생태계 전환 특성

최근 2010년과 2020년 10년 사이의 생태계 전환 특성을 살펴보면, 도시 생태계 면적은 이전 기간과 유사하게 증가한 것으로 나타났다. 습지생태계는 84.8%의 면적이 유지되면서 순증가를 보였다. 그 밖의 생태계 유형은 농경지 -6.2%, 산림 -0.9%, 초지 -0.3%, 나지 -4.7%로 변화하였다. 각 생태계 유형별 기존 면적 유지 비율(Persistence)은 도시 95.1%, 농경지 90.6%, 산림 98.0%, 초지 80.8%, 습지 54.7%, 나지 68.0%로 나타나, 도시와 산림이 상대적으로 안정적인 면적을 유지했지만, 습지와 나지는 비교적 변화폭이 큰 것으로 확인되었다.

〈표 II-2-13〉 생태계 규모 계정표 2010-2020

(단위: km ² , %)	생태계 유형						
	시가화건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역
생태계 규모 2010	41,647	206,213	692,065	28,506	4184	16530	18939
초기 대비 규모 저감	2,028	19,375	13,728	5,483	1,894	5,286	3,020
초기 대비 규모 증가	16,640	6,552	7,680	5,410	5,443	4,515	4,574
초기 대비 순규모변화(증가-저감)	14,612	-12823	-6048	-73	3549	-771	1,554
초기 대비 순규모변화(%)	35.1	-6.2	-0.9	-0.3	84.8	-4.7	8.2
생태계 규모 2020	56,259	193390	686017	28433	7733	15759	20,493
안정적 생태계 재고	39,619	186,838	678,337	23,023	2,290	11,244	15,919
안정적 생태계 재고(%)	95.1	90.6	98.0	80.8	54.7	68.0	84.1

세부 생태계 유형별 전환 특성을 살펴보면, 도시생태계로 전환된 면적에서 가장 크게 이바지한 유형은 농경지로, 7,147 km²를 차지하였으며, 산림 3,750 km², 나지 3,207 km²가 뒤를 이었다. 농경지생태계는 도시로의 전환 면적이 가장 컸으며, 산림 면적 4,722 km²가 농경지로 전환된 것으로 나타났다. 산림생태계는 도시와 농경지로 각각 3,750 km², 3,664 km²가 전환되어 유사한 면적 변화를 보였다. 초지 생태계는 상당한 면적이 도시로 순 변화되는 특징을 나타냈다.

습지생태계는 농경지와 전환 특성이 두드러졌는데, 습지에서 농경지로 변환된 면적은 749 km²였으며, 반대로 농경지에서 습지로 변환된 면적은 2,172 km²로 나타났다. 나지 생태계는 도시로의 전환 면적이 가장 컸으며, 이후 농경지와 습지로의 전환도 상당한 것으로 확인되었다. 수역 생태계는 습지로의 전환 면적이 가장 크며, 그 외 농경지와 산림으로의 전환도 일부 나타나는 특징을 보였다(표 II-2-59).

〈표 II-2-14〉 생태계 변화 매트릭스 2010-2020

	시가화건조지역	농업지역	산림지역	초지	습지	나지	수역	시작 (2010)
시가화건조지역	39,619	579	297	195	359	360	238	41,647
농업지역	7,147	186,838	4,722	2,129	2,172	1,824	1,381	206,213
산림지역	3,750	3664	678,337	2,346	788	1,337	1,843	692,065
초지	1,919	636	2,104	23,023	306	278	240	28,506
습지	185	749	20	142	2,290	243	555	4,184
나지	3,207	487	378	508	389	11,244	317	16,530
수역	432	437	159	90	1429	473	15,919	18,939
종료 2020	56,259	193,390	686,017	28,433	7,733	15,759	20,493	

나) 도시생태계 상태 지표 선정 및 시범 평가

도시생태계 상태 지표는 EU 지표 및 전문가 논의를 통해 9개의 지표를 선정하였다. 각 지표에 대한 평가를 통해 국내 도시 상태 계정 적용 가능성을 검토하고, 변화 추세를 파악하였다. 공간적 단위는 도시 계정의 특성상 데이터 수집이 가능한 행정구역 단위로 설정하였다.

〈표 II-2-15〉 도시생태계 상태 계정 지표 선정(안)

지표		단위	자료 기간	활용 가능 자료출처	
①	극한 기상 현상	폭염일수	일	'90~'20	기상청 관측자료
		열대야 일수	일	'90~'20	기상청 관측자료
②	대기오염 배출	톤	'90~'20	기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터	
③	폐기물 발생	톤	'96~'20	기후에너지환경부 전국폐기물발생및처리현황	
④	폐수발생량	m³/일	'96~'21	기후에너지환경부 산업폐수 발생 및 처리현황	
⑤	대기질 농도	미세먼지 경보 일수	일	'15~'20	기후에너지환경부 에어코리아
		황사 경보 일수	일	'07~'20	기후에너지환경부 에어코리아
⑥	수목 건강성	-	'90~'20	미국 지질조사국 위성영상 기후에너지환경부 토지피복도	
⑦	녹지 연결성 지수	-	'90~'20	국가교통정보센터 전국 표준 노드 링크 기후에너지환경부 토지피복도	
⑧	도시공원 및 녹지 면적	km²	'10~'20	LX한국국토정보공사 작성자료 한국국토정보공사 도시계획현황	
⑨	도시녹지 접근성	%	'20	영국 환경부 산하 Natural England에서 제시한 영국의 그린 인프라 표준 자료 참고	

도시생태계 계정을 위한 상태지표를 선정하여 통갯값 등을 이용한 추세 분석을 한 결과는 다음과 같다.

① 극한기상 현상: 국내 연평균 폭염일수는 1990년 16.67일에서 2020년 9.26일로 약 44.4% 감소하였다. 지난 30년간 국내 연평균 폭염일수는 1993년 최저치 0.26일을 기록했지만, 1994년에는 31.12일로 최고치를 기록하였다. 2018년에는 두 번째로 많은 30.7일의 폭염일수를 보였으며, 이후 지속적으로 감소하는 추세를 보였다. 광역시도 단위의 연평균 폭염일수는 지난 30년간 제주를 제외한 모든 광역시도에서 감소한 것으로 나타났다.

국내 연평균 열대야 일수는 1990년 11.14일에서 2020년 10.89일로 약 2.2% 감소하였다. 지난 30년간 연평균 열대야 일수가 가장 적은 연도는 1993년으로 0.37일을 기록하였고, 다음 해인 1994년에는 24.50일로 가장 많은 열대야 일수를 기록하였다. 지난 30년간 6곳을 제외한 모든 광역시도에서 열대야 일수가 증가한 것으로 나타났다.

② 대기오염 배출: 1999년 330.55만 톤에서 2020년 351.70만 톤으로 변화하여 지난 22년간 약 6.4% 증가하였다. 지난 22년간 국내 대기오염 배출량은 연평균 381.17만 톤으로, 최소 330.55만 톤(1999년)에서 최대 451.95만 톤(2016년)까지 변동한 것으로 나타났다.

연도별 추이에 따르면, 1999년부터 2013년까지 국내 대기오염 배출량은 약 14.4% 증가하였다. 2014년의

국내 대기오염 배출량은 366.69만 톤으로 2000년 초반 수준으로 대기오염 배출량이 감소하였으며, 2016년에는 451.95만 톤을 배출하여 지난 20년간 대기오염 최대 배출량을 기록하였다. 이후 2020년까지 국내 대기오염 배출량은 감소하는 추세를 보였으며, 2020년 351.70만 톤으로 2016년 대비 약 22.2% 감소하였다.

③ 폐기물 발생: 국내 폐기물 발생량은 1996년부터 2020년까지 지속적으로 증가하는 추세를 보였다. 1996년에는 63.94백만 톤이었던 국내 폐기물 발생량은 2000년 85.51백만 톤으로 지난 5년 동안 약 33.73% 증가하였으며, 2005년과 2017년을 제외한 모든 연도에서 폐기물 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 2020년의 국내 폐기물 발생량은 195.43백만 톤으로 1996년 대비 약 205.4% 증가, 2000년 대비 약 129.5% 증가하였다. 모든 광역시도에서 폐기물 발생량은 1996년부터 2020년까지 증가하였으며, 지난 25년간 광역시도별 폐기물 발생량의 증가율은 평균 240.4%, 최소 68.6%, 최대 500.9% 증가한 것으로 도출되었다.

④ 폐수발생량: 국가 폐수발생량은 2000년 7,906,726^m/일, 2005년 9,180,698^m/일, 2010년 5,229,147^m/일, 2015년 5,088,925^m/일, 2020년 4,841,508^m/일로 점차 감소하는 추세를 보였다. 2000년은 전남 폐수발생량이 2,977,110^m로 가장 많았고, 제주는 5,817^m로 가장 적었다. 2000년대 초 전남은 광양제철소, 광양만 경제자유구역의 활발한 개발 등으로 대규모 산업활동이 증가하면서 폐수발생량이 증가했던 것으로 추정된다. 2020년에는 경기가 90.68%로 가장 큰 감소율을 기록했고, 충남은 약 706.5%의 가장 큰 증가율을 보였다.

⑤ 대기질 농도: 관측기간을 고려하여 미세먼지 경보일수는 2015년부터 2020년까지의 기간을, 황사 경보일수는 2007년부터 2020년의 기간을 대상으로 미세먼지 및 황사 경보일수의 변화 추세를 확인하였다. 국내 미세먼지(PM-10) 경보일수는 2015년부터 2020년까지 총 58일로, 2016년 16일, 2017년 12일, 2018년 25일로 집중되었다. 이후 2019년과 2020년에는 각각 0일과 1일로 감소하였다. 초미세먼지(PM-2.5) 경보 일수는 같은 기간 총 53일로, 2019년에 51일이 발령되어 경보의 96%가 집중되었고, 2020년에는 0일로 감소하였다. 국내 황사 경보 일수는 2007년부터 2020년까지 총 84일로, 2010년에는 경보의 50%가 집중된 42일을 기록한 후 2011년 2일로 급감하였다. 이후 2015년(4일)과 2016년(1일)을 제외한 연도에서는 경보가 발생하지 않았다.

⑥ 수목 건강성: 1990년, 2010년, 2020년의 전국 광역시도 평균 수목 건강성은 각각 0.72, 0.76, 0.83이었다. 1990년에는 강원도의 수목 건강성이 0.78로 가장 높았고, 다음으로 전북, 충북, 경남, 부산, 경북, 전남 등의 순이었고, 서울이 0.59로 가장 낮았다. 2010년에는 제주의 수목 건강성이 0.81로 가장 높았고, 다음으로 강원, 충북, 전남, 대전, 경기, 전북 등의 순이었고, 서울이 0.71로 가장 낮았다. 2020년에는 강원도의 수목 건강성이 0.86으로 가장 높았고, 다음으로 충북, 제주, 경기, 전북, 경북, 울산 등의 순이었다. 2020년 서울의 수목 건강성은 0.8로 전국 광역시도 중 가장 낮은 수준이었지만, 2010년 전국 광역시도 평균 수목 건강성보다 높은 수치에 해당한다.

⑦ 녹지 연결성 지수: 연결성 지수의 시계열 변화는 대분류 토지피복도 자연지역(산림, 초지, 습지, 나지, 수역)의 1990년 대비 2020년까지 광역시도 별로 변화한 토지피복을 기반으로 분석을 수행(면적, 패치 수 포함)하였다. 분석 결과, 자연지역 면적은 8개 지역에서 감소(제주 최대 비율 감소: -25.2%)하였으며 9개 지역에서는 증가(광주 최대 비율 증가: 13.6%)한 것으로 나타났다. 자연지역 패치 수는 제주를 제외한 16개 지역에서 모두 감소(광주 최대 비율 감소: -70.6%) 하였다. 자연지역 연결성은 면적 증가율과 패치 수의 감소율이 가장 좋은 광주가 194.1% 증가한 것으로 나타나는 등 8개 지역에서 증가하였고, 서울이 84.8%

감소하는 등 경기, 부산, 제주, 인천 등 9개 지역에서 감소하였다.

⑧ 도시공원 및 녹지 면적: 2010-2020년 단기 변화에서 전국의 도시공원 및 녹지 면적 변화는 전반적으로 상반된 변화율을 나타낸다. 도시공원의 증가와 녹지의 감소에 대한 전국적 변화 양상은 1인당 도시공원 및 녹지 면적 변화에서도 같게 나타났으나 변화 정도에 대해서는 시도별로 차이가 있었다. 도시공원 면적 변화율에서 서울(52.7%▲)과 울산(34.1%▲)은 감소하였고 1인당 도시공원 면적 변화율 또한 서울(49.4%▲), 울산(34.4%▲)은 다른 지역 대비 낮게 나타났다. 그 외 지역은 +5% 이상으로 상당한 개선이 이루어졌다. 이는 2020년 일몰제 시행에 따른 미집행 공원의 단계적 해지에 의한 것으로 해석된다.

녹지 면적 변화율의 경우 부산(5.5%▲)과 충남(14.4%▲)은 -5% 이상으로 현저한 저하를 나타냈고, 그 외 지역은 ±5% 미만으로 변화가 없다. 1인당 녹지 면적 변화율에서 충남(27.5%▲), 제주(14.3%▲)가 가장 큰 폭으로 감소하였고 대부분 지역에서 ±5% 미만으로 변화가 없다. 제주 및 경기 지역의 녹지 면적 변화율이 소폭 증가에도 불구하고 해당 지역의 1인당 녹지 면적은 각각 14.3%▲, 11.5%▲씩 감소한 것으로 나타났다.

⑨ 도시 녹지 접근성: 2020년 기준으로 3분, 5분, 15분 생활권 내에서 도시 녹지에 도달할 수 있는 전국 광역시도 인구 비율 평균은 각각 48.3%, 48.8%, 65.7%였다. 15분 생활권에서 접근성이 좋았지만, 3분과 5분 생활권에서 접근성은 상대적으로 낮아 소규모 생활권 내 녹지가 상대적으로 부족한 것을 알 수 있다. 17개 광역시도 중 3분 생활권 녹지 접근성이 가장 높은 지역은 경기(61.4%)였다. 다음으로 제주(58.5%), 강원(58.3%), 전남(56.6%), 경남(55.4%) 등의 순이었다. 이와는 달리 세종(30.3%), 대구(35.2%), 전북(36.7%)은 40% 미만의 하위지역에 해당하였다. 17개 광역시도 중 5분 생활권 녹지 접근성이 가장 높은 지역은 강원(63.8%)이었다. 그다음으로는 전남(61.6%), 경기(59.2%), 경북(56.6%), 경남(56.3%) 등의 순이었다. 이와는 달리 대구(31.9%), 세종(36.4%), 전북(36.4%), 인천(38.4%)은 40% 미만의 접근성 하위지역에 해당하였다. 17개 광역시도 중 15분 생활권 녹지 접근성이 가장 높은 지역은 경남(87.6%)이었다. 다음으로 전남, 부산, 강원, 경북 등의 순이었다. 이와는 달리 인천(44.6%)과 전북(47.7%)은 50% 미만의 접근성 하위지역에 해당하였다.

4) 고찰 및 시사점

국내에서는 생태계 계정과 관련한 전반적인 제도적 장치와 연구가 부족한 실정이며, 따라서 도시 생태계 계정의 구축에서도 많은 어려움이 존재한다. 도시 생태계 계정이 가지는 특성을 고려하여 도시 생태계 계정 체계를 구축하려면 다음과 같은 요소가 검토되어야 한다.

① 데이터 소스와 기술 인프라: 공간 데이터(GIS, 원격탐사), 생태 지표(생물다양성, 토양·수질 상태), 경제 데이터(시장 가격, 손실 비용)를 통합해야 하며, 생태계 유형 분류(IUCN Global Ecosystem Typology)와 서비스 분류(CICES)를 사용할 수 있는 연구개발 필요

② 경계 설정과 범위 정의: 도시 생태계 영역(Ecosystem Accounting Area, EAA)을 명확히 하며, 행정 경계나 기능적 도시 영역(OECD Functional Urban Areas)을 기준으로 할 경우 데이터 확보가 수월할 수 있다. 그러나 이러한 경계 설정에도 많은 단점이 존재하므로 목적과 실정에 따른 도시 생태계 계정 경계의 설정이 필요

③ 이해관계자 참여: 정부, 전문가(생태학자, 경제학자), 지역 주민(특히 원주민 문화 가치 반영)을 포함한 협력 구조가 필요하며, 예산과 거버넌스(운영위원회)를 마련할 필요가 있음

④ 평가 및 보고 도구: 물리적 측정(면적, 서비스 양)과 화폐 가치화(교환 가치, 복지 가치)를 위한 모델(예: InVEST, iTree)이 요구됩니다. 불확실성 평가(신뢰 구간, 시나리오 분석)를 포함합니다.

도시 생태계 계정 구축 과정에서 발생할 수 있는 여러 문제가 있으므로 이를 최소화하기 위해 다음과 같은 사항들을 유의할 필요가 있다.

- ① 데이터 불확실성과 한계: 데이터 시기 불일치나 해상도 부족으로 인한 오차를 명시적으로 보고해야 함
- ② 중복 산정 방지: 생태계서비스(최종 서비스만 가치화)와 자산 분류를 상호 배타적으로 유지해야 하며, 지원 서비스(예: 수분 순환)를 최종 서비스(예: 홍수 조절)와 중복 평가하지 말아야 함
- ③ 경계 및 스케일 문제: 행정 경계가 생태 경계와 불일치할 수 있으므로, 서비스 수입/수출(예: 상류 유역 홍수 조절)을 고려가 요구됨
- ④ 문화·사회적 가치 존중: 화폐 가치화가 모든 가치를 포착하지 못하므로, 질적 평가(원주민 지식)를 병행함.

도시 생태계 계정을 위한 단계적 절차는 SEEA EA 프레임 기반으로 하며 일반적으로 다음과 같은 절차를 따른다.

〈표 II -2-16〉 SEEA EA 체계 기반 도시 생태계 계정화 절차와 예시

단계	설명	사례 적용 예시
1. 계획 및 거버넌스 수립	목적 정의(예: 도시 홍수 관리), 이해관계자 참여, 예산·일정 계획	호주 웨스턴 시드니 파일럿: 운영 위원회 구성, 정책적 질문(생물다양성 영향) 우선순위 설정
2. 경계 및 자산 분류	EAA 설정, 생태계 유형(도시 숲, 습지 등) 지도화. GIS 사	영국: 건축 지역 버퍼 적용, 8개 서식지 분류(토지 피복 지도 기반)
3. 현황 평가 (규모 & 상태)	면적 변화 추적, 지표(생물다양성, 압력 요인) 측정. 기준 수준 비	핀란드 탐페레: 2012-2018 녹지 면적 변화 지도화, InVEST 모델로 상태 평가.
4. 서비스 평가 (Services Account)	물리적 흐름(양)과 화폐 가치화(교환/피해 회피 비용). 공급-이용 테이블 작	미국: 도시 생태계서비스 (홍수 조절, 에너지 절감) 물리·화폐 평가
5. 자산 가치화 (Monetary Asset)	미래 흐름 NPV(순현재가치) 계산, 할인율 적용(예: 3-7%)	영국: 100년 기간, 탄소 가격·건강 비용으로 자산 가치 산정
6. 보고 및 평가	결과 보고(표, 지도, 대시보드), 동료검토, 업데이트	노르딕 도시 파일럿: 지자체 협력으로 정책 보고서 발간, 데이터 갭 식별

도시 생태계 계정(Urban Ecosystem Accounts)은 도시 환경에서 생태계 자산과 서비스를 체계적으로 계정화하는 프레임워크로, UN의 환경경제계정체계(SEEA) 등에서 발전된 개념이다. 이는 도시화가 가속화되는 가운데 생태계의 가치를 경제·사회적 의사결정에 반영하는 데 핵심적이다. 도시 생태계 계정의 중요성은 다음과 같다.

- ① 지속 가능한 도시 관리 지원: 도시 생태계 계정은 녹지 공간, 수자원, 생물다양성 등의 가치를 정량화하여 정책 결정에 활용할 수 있게 한다. 이를 통해 도시계획에서 생태계서비스를 간과하지 않고 보호·강화할 수 있으며, 장기적으로 도시의 지속가능성을 높이게 된다.

② 경제적 가치 통합과 자원 효율성 제고: 도시 생태계는 미시적 기후조절, 홍수방지, 공기 정화 등의 서비스를 제공하지만, 이를 기록하고 평가하지 않으면 과소 평가되어 훼손될 위험이 크다. 따라서 계정을 통해 이러한 서비스를 경제 지표에 반영하면, 투자와 예산 배분이 더 효율적으로 이뤄져 지역 경제를 지원하게 된다.

③ 커뮤니티 건강과 웰빙 향상: 도시 주민들의 정신적·신체적 건강을 위해 자연 접근성과 레크리에이션 기회를 강조한다. 예를 들어, 녹지 공간은 스트레스 감소와 환경 교육을 촉진하며, 기후 변화 대응(예: 강우 유출 관리)에도 이바지한다. 이는 특히 인구 밀집 도시에서 공공 보건 측면에서 중요하다.

④ 기후변화와 환경 위기 대응: 도시화로 인한 생태계 훼손을 방지하고, 생태계서비스를 강화함으로써 기후 적응력을 높인다. 계정 시스템은 이러한 변화를 추적하여 적시에 대응을 가능하게 하며, 국제적 표준화(예: UN SEEA)를 통해 글로벌 협력을 촉진한다.

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립

III

지속가능 환경계획 수립을 위한 생태계서비스 공급-수요 지표 개발

1. 도시 생태계서비스 균형 관리를 위한 수요 지표 개발 및 취약성 분석
2. 생태계서비스 국민 인식 및 만족도 분석을 통한 수요 지표 개발 및 평가 검증
3. 생태계서비스지불제계약 효과성 시범평가

1. 도시 생태계서비스 균형 관리를 위한 수요 지표 개발 및 취약성 분석

도시의 무분별한 확장과 개발 압력은 생태계 구조와 기능을 훼손하여 서비스 공급량을 감소시키고, 이는 곧 인간의 복지 수준에 직접적인 영향을 미친다. 도시 지역은 인구와 경제 활동이 집중되면서 탄소 배출, 수질 오염물질 발생 등 생태계서비스에 대한 수요가 높게 나타나지만, 도시 내부의 녹지와 수역은 제한적이어서 서비스 공급 능력은 상대적으로 낮은 구조를 보인다. 이에 따라 서비스 공급-수요의 만성적 불균형, 즉 생태계서비스 적자(deficit)가 발생하고 있다.

국제적으로는 Baró et al.(2015)이 유럽 여러 도시를 대상으로 탄소 저장과 대기오염 정화의 공급-수요를 비교하여 도시 내부의 공급 부족과 외부 생태계에 대한 의존성을 지적하였으며, Schirpke et al.(2019)은 공급-흐름-수요 개념을 연계해 다중 서비스 간 상호작용을 분석하였다. 국내에서도 기후에너지환경부의 생태계서비스 평가·지도 구축 사업(환경부, 2020) 및 이훈종(2020, 2021, 2022)의 연구를 통해 국가·광역 단위의 서비스 공급평가 기반은 어느 정도 마련되었으나, 수요 지표를 포함한 시·군·구 수준의 정량 분석 및 취약성 진단은 아직 초기 단계이다.

이번 연구에서는 전국 229개 기초자치단체를 대상으로 탄소 및 수질정화 서비스의 공급-수요 현황을 정량적으로 평가하며, 탄소 수치 및 영양물질(T-P, T-N) 수치의 공간 분포와 자급률을 산정하여, 도시 및 산업 지역의 취약성을 진단한다. 이 분석 결과를 토대로 도시 생태계서비스 수요 지표의 시범 평가 결과를 제시하며 이를 도시 환경계획, 공간계획 등과 연계할 수 있는 정책 방안에 대해 고민해 보고자 한다.

가. 이론적 배경 및 선행 연구

생태계서비스(Ecosystem Services)는 생태계가 인간에게 제공하는 직간접적 혜택을 의미하며, 새천년 생태계평가(MEA, 2005) 이후 국제적으로 개념이 정립되었다. 생태계서비스 공급(supply)은 생태계가 단위 시간 동안 제공할 수 있는 서비스의 물리적 양이며, 수요(demand)는 사회·경제 활동을 통해 필요하거나 소비되는 서비스의 양이다. 공급과 수요의 관계를 분석하는 생태계서비스 평가 및 지도화 방법론(ESVM)은 서비스 제공 지역(Service Providing Area, SPA)과 혜택 지역(Service Benefiting Area, SBA) 간의 공간적 합치 또는 불일치(mismatches)를 파악하는 데 중점을 둔다. 도시와 산업 지역은 일반적으로 높은 수요(배출·오염·이용량)와 제한된 공급(녹지·수역 부족)을 특징으로 하며, 그 결과 탄소 및 수질 정화 서비스에서 공급 <수요인 지역이 광범위하게 나타난다. 도시 지역과 같이 생태발자국이 높은 지역은 서비스 수요를 충족시키기 위해 외부 지역(예: 산림)으로부터 서비스를 유입 받는 '중심부 수요형'의 특성을 보이며, 이는 도시의 환경 취약성을 진단하는 데 중요한 단서가 된다.

국내에서 생태계서비스 개념이 본격적으로 정책에 도입된 것은 2010년대 이후이다. 기후에너지환경부는 2018년부터 2020년까지 3차에 걸쳐 '생태계서비스 평가 시범사업'을 추진하였으며, 이를 통해 국내 실정에 맞는 평가 방법론과 지표 체계를 개발하였다. 특히 시범사업 III에서는 기초자치단체 단위의 평가 프레임워크를 제시하고, 공급·조절·문화 서비스에 대한 정량 평가를 시도하였다. 학술 연구 측면에서 이훈종(2020, 2021, 2022)은 수도권 및 전국 도시를 대상으로 탄소·수질·대기질 등 조절 서비스의 공급-수요 불균형을 체계적으로

분석하였다. 이 연구들은 도시지역이 생태계서비스의 '순수요지'로서 주변 산림·농촌 지역에 의존하는 구조적 특성을 실증적으로 규명하였으며, 본 연구의 방법론적 토대가 되었다. 오충현 등(2016)은 충남 지역을 대상으로 생태계서비스 지불제(PES: Payment for Ecosystem Services) 도입 가능성을 검토하였으며, 상류-하류 간 수혜-부담 관계에 기반한 보상 메커니즘을 제안하였다.

정책적으로는 2020년 개정된 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」에 생태계서비스 개념이 명시적으로 도입되었으며, 제5차 국가환경종합계획(2020-2040)에서도 생태계서비스 가치 평가 및 정책 반영을 핵심 과제로 설정하고 있다. 또한 2022년부터 시행된 탄소중립기본법과 그 하위 계획들은 지자체별 탄소중립·녹색성장 기본계획 수립을 의무화하고 있어, 본 연구에서 제시하는 기초자치단체 단위 탄소 수지 분석의 정책적 활용 가능성이 높아지고 있다. 국제적으로는 TEEB(2010)를 통해 생태계서비스의 경제적 가치를 정책 결정에 반영하는 접근이 확산하였으며, 2022년 12월 채택된 쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크(GBF)의 Target 11이 생태계서비스(자연의 기여, nature's contributions to people) 복원, 유지 및 증진을 명시하고 있다(CBD, 2022). 또한 자연 관련 재무정보 공개 협의체(TNFD)의 최종 권고안이 2023년 9월 발표되면서 기업의 생태계서비스 의존도 및 영향 평가가 주요 의제로 부상하였다(TNFD, 2023). 이러한 국제 동향은 국가와 지자체 단위의 생태계서비스 현황 파악이 단순한 연구 차원을 넘어 정책 이행과 국제 보고의 기초 자료로 기능해야 함을 시사한다.

나. 분석 자료 및 방법

1) 분석 프레임워크

생태계서비스 수지(balance)는 공급(S)에서 수요(D)를 차감한 값으로 정의되며, 수지가 양(+)이면 생태계서비스 공급이 수요를 초과하여 상대적으로 '양호'한 상태를, 수지가 음(-)이면 공급이 수요를 맞추지 못하여 '부족' 또는 '매우 부족'한 상태를 의미한다.

$$\text{수지(Balance)} = \text{공급(Supply)} - \text{수요(Demand)}$$

서비스별로 전국 합계, 시도별 자급률, 기초자치단체별 상하위 그룹을 도출하고, 5분위 등급화를 통해 공간적 패턴을 해석하였다. 자급률은 (공급/수요) × 100으로 산정하며, 100%를 초과하면 해당 지역이 서비스 공급 여력이 있음을 의미한다.



〈그림 III-1-1〉 생태계서비스 수요-공급 분석 프레임워크

2) 활용 자료

가) 탄소 부문

탄소 부문의 공급 지표는 기후에너지환경부 지역 온실가스 통계(2022년)의 LULUCF(토지이용·토지이용변화 및 임업) 부문 온실가스 흡수량(Gg CO₂ eq/년)을 사용하였다. 수요 지표는 동일 출처의 총배출량(에너지·공장·농업·폐기물 등 포함)을 활용하였다. 원본 데이터에서 LULUCF 흡수량은 음수로 표기되어 있어, 본 분석에서는 절댓값으로 변환하여 공급량으로 사용하였다.

나) 수질 부문

수질 부문의 수요 지표는 WAMIS(물환경정보시스템) 오염총량관리시스템의 T-P(총인) 및 T-N(총질소) 발생량(kg/일)을 사용하였다. 공급 지표는 정화량(발생량 - 배출량)으로, 생태계·하천의 잠재적 자연 정화능을 추정하는 지표로 활용하였다. 모델 검증을 위해 기후에너지환경부 수질측정망의 T-P, T-N 실측 농도(mg/L) 데이터를 활용하여 수지 등급과 실제 수질 상태의 정합성을 검토하였다.

〈표 III-1-1〉 분석에 활용된 자료 목록

구분		지표	출처	단위
탄소	공급	LULUCF 흡수량	기후에너지환경부 지역 온실가스 통계(2022)	Gg CO ₂ eq/년
	수요	총배출량		Gg CO ₂ eq/년
수질	총인	공급	WAMIS 오염총량관리시스템(2022)	kg/일
		수요		kg/일
	총 질소	공급		kg/일
		수요		kg/일
	실측	수질		T-P, T-N 농도

다) 분석 방법 및 등급화

기초자치단체별로 탄소·T-P·T-N에 대해 공급에서 수요를 차감하여 수지를 산정하였다. 시도별 자급률은 (공급 합계 / 수요 합계) × 100으로 산정하였다. 5분위 등급화는 서비스별 단위면적 당 수지값(수지/km²)을 5분위로 나누어 ‘매우 양호’, ‘양호’, ‘보통’, ‘부족’, ‘매우 부족’의 5개 등급을 부여하였다. 이는 지자체 간 면적 차이로 인한 편향을 바로잡기 위함이다.

수질 부문의 모델 검증은 T-P 및 T-N 수지 등급별 실측 농도 차이를 비교하여 통계적 유의성을 확인하는 방식으로 수행하였다. Kruskal-Wallis 검정은 이상치에 강건한 비모수 검정 방법으로 등급 간 중앙값 차이의 유의성을 평가하며, Kendall's tau(τ) 순위상관 검정을 추가로 적용하여 등급이 나빠질수록 실측 농도가 일관되게 증가하는 경향이 통계적으로 유의한지 확인하였다.

다. 탄소 생태계서비스 공급-수요 분석

1) 전국 현황

국가 온실가스 인벤토리 보고서(온실가스종합정보센터, 2024)에 따르면, 우리나라의 2022년 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)은 724.3백만 톤 CO₂ eq로 2018년 배출 정점(783.9백만 톤 CO₂ eq) 대비 7.6% 감소하였으며, 순배출량(LULUCF 포함)은 686.5백만 톤 CO₂ eq로 나타났다.

본 연구에서 229개 기초자치단체를 대상으로 분석한 결과, 총 공급량(LULUCF 흡수량)은 약 38,677 Gg CO₂ eq/년이며, 총 수요량(총배출량)은 약 692,251 Gg CO₂ eq/년으로 산정되었다. 이는 국가 인벤토리의 총배출량 724,300 Gg CO₂ eq 보다 약 32,000 Gg(약 4.4%) 낮은 수치인데, 이 차이는 지역 온실가스 통계에서 ‘기타’로 분류되어 특정 지역에 할당하기 어려운 배출원(국제항공·해운 연료, 군사시설, 전국 단위 특수 배출원 등)이 제외되었기 때문이다. 전국 자급률은 약 5.6%로, 현재 전국 산림이 흡수하는 탄소는 총배출량의 약 1/18 수준에 불과하여 산림 흡수만으로는 배출량을 상쇄하기에 구조적으로 부족한 상황이다.

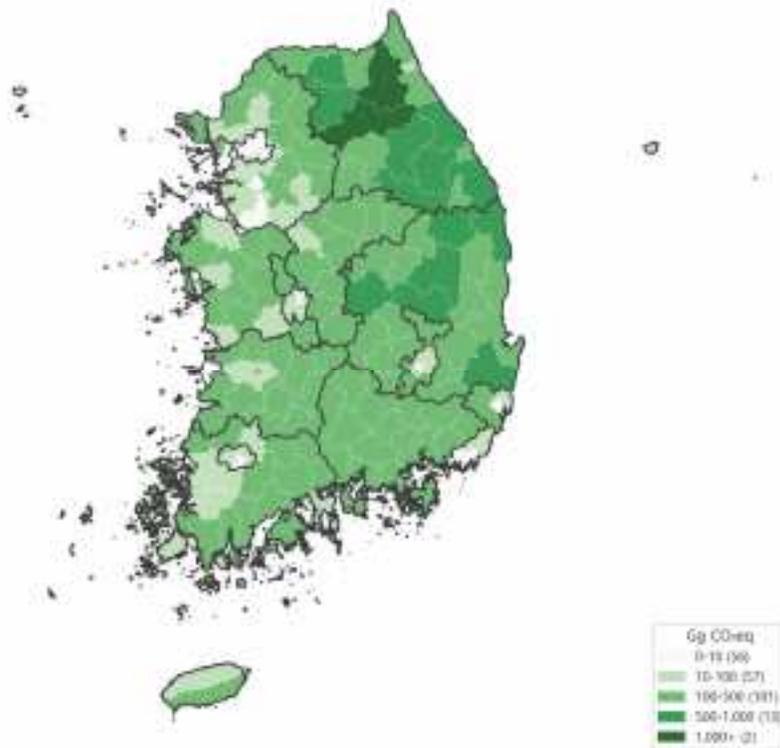
〈표 Ⅲ-1-2〉 전국 탄소 생태계서비스 현황(2022년)

항목	값	비고
총 공급량(LULUCF 흡수량)	38,677 Gg CO ₂ eq/년	산림·농경지 등 흡수
총 수요량(총배출량)	692,251 Gg CO ₂ eq/년	에너지·공정·농업·폐기물
전국 자급률	약 5.6%	공급/수요 × 100
수지 양호 지역	22개 (약 10%)	공급 > 수요
수지 부족 지역	207개 (약 90%)	공급 < 수요

229개 기초지자체 중 수지가 양(+)인 지역은 22개(약 10%)에 불과하며, 수지가 음(-)인 지역은 207개(약 90%)로 대부분의 지자체가 탄소 서비스 적자 상태에 있는 것으로 나타났다.

2) 공급(흡수량) 분포

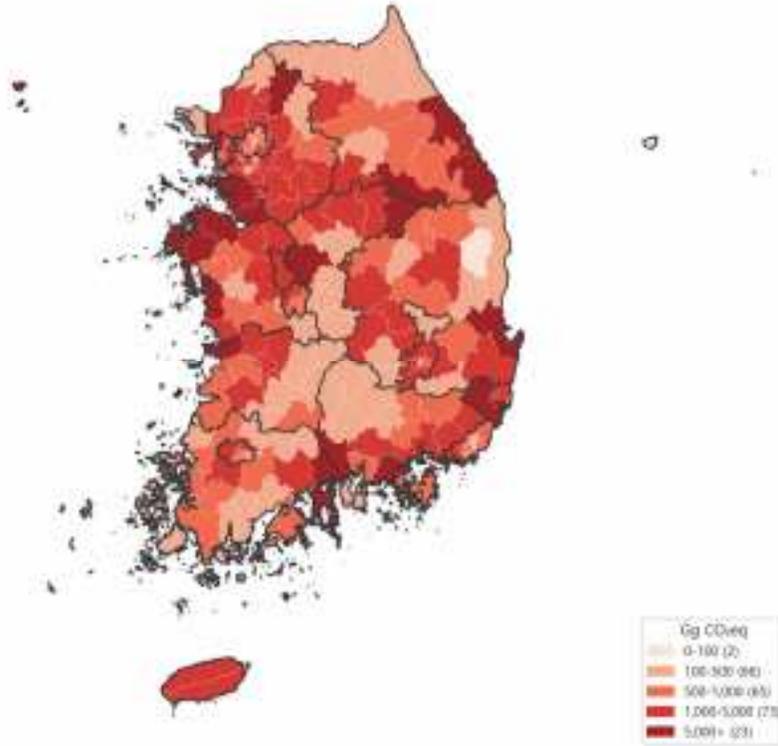
탄소 공급 상위 지역은 산림이 넓은 산간 지역에 집중되어 있다. 강원 홍천군(1,153 Gg CO₂ eq), 강원 인제군(1,099 Gg CO₂ eq), 강원 평창군(949 Gg CO₂ eq), 경북 울진군(825 Gg CO₂ eq), 강원 영월군(783 Gg CO₂ eq) 등이 상위 5개 지역으로, 이들 지역은 광범위한 산림을 보유하고 있으며 국가 차원에서 중요한 탄소흡수원 역할을 하고 있다.



〈그림 Ⅲ-1-2〉 기초자치단체별 탄소 공급량(LULUCF 흡수량) 분포

3) 수요(배출량) 분포

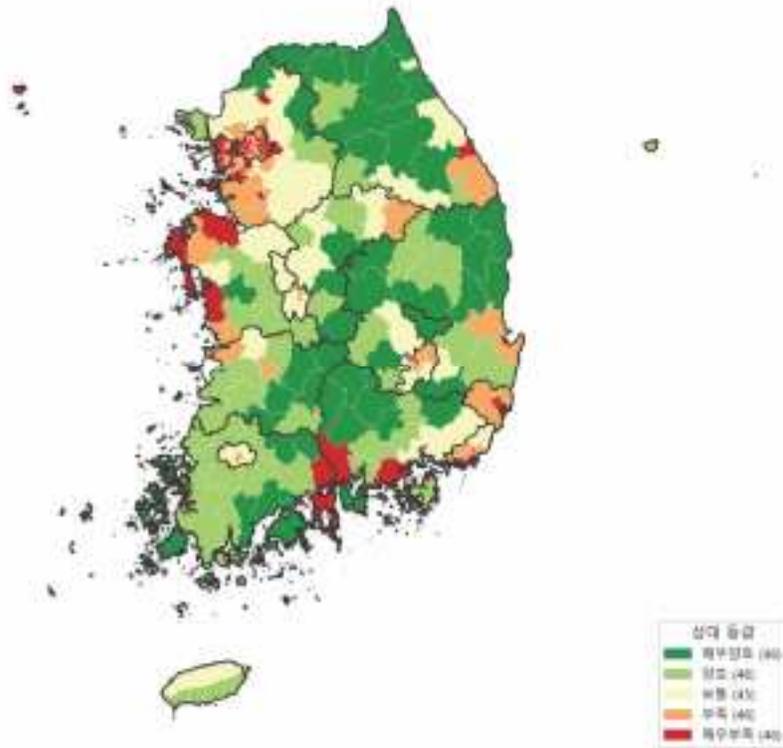
탄소 수요 상위 지역은 대규모 산업단지·발전소 밀집 지역에 집중되어 있다. 충남 당진시(60,908 Gg CO₂ eq), 전남 광양시(47,074 Gg CO₂ eq), 전남 여수시(32,565 Gg CO₂ eq), 경북 포항시(29,485 Gg CO₂ eq), 충남 태안군(27,493 Gg CO₂ eq) 등이 상위 5개 지역으로, 철강, 석유화학, 발전시설 등 에너지 다소비·탄소 집약적 산업이 위치한 지역이 탄소 수요 상위를 차지하고 있다.



〈그림 III-1-3〉 기초자치단체별 탄소 수요량(총배출량) 분포

4) 수지(공급-수요) 분석

탄소 수지 분석 결과, 자연 흡수량이 총배출량을 초과하는 '양호' 지역은 강원 인제군(+843 Gg CO₂ eq), 강원 홍천군(+543 Gg CO₂ eq), 경북 울진군(+514 Gg CO₂ eq), 경북 영양군(+406 Gg CO₂ eq), 강원 화천군(+380 Gg CO₂ eq) 등으로 나타났다. 반면, 공급이 수요에 크게 미치지 못하는 '매우 부족' 지역은 충남 당진시(-60,809 Gg CO₂ eq), 전남 광양시(-46,942 Gg CO₂ eq), 전남 여수시(-32,477 Gg CO₂ eq), 경북 포항시(-29,008 Gg CO₂ eq), 충남 태안군(-27,382 Gg CO₂ eq) 등으로 나타났다.



〈그림 III-1-4〉 기초자치단체별 탄소 수지(공급-수요) 5분위 등급

5) 시사점

본 분석 결과는 우리나라 기초자치단체의 탄소 생태계서비스가 구조적인 적자 상태에 있음을 보여준다. 전국 229개 기초자치단체 중 수지가 양(+)인 지역은 22개(10%)에 불과하며, 이들은 대부분 강원·경북의 산림 중심 지역이다. 반면 나머지 207개(90%) 지역은 배출량이 지역 내 흡수량을 초과하여 탄소흡수 측면에서 주변 산림 지역에 의존하는 구조로 되어 있다.

특히 주목할 점은 탄소 수지 적자의 공간적 집중 현상이다. 충남 당진시(-60,809 Gg), 전남 광양시(-46,942 Gg), 여주시(-32,477 Gg), 경북 포항시(-29,008 Gg) 등 상위 10개 적자 지역이 전국 탄소 수지 적자의 상당 부분을 차지한다. 이들 지역은 대규모 화력발전소, 제철소, 석유화학단지가 있는 산업 거점으로, 지역 산림의 흡수 역량으로는 배출량을 감당할 수 없는 구조적 한계를 지닌다.

정부는 2025년 11월 제5차 탄소중립녹색성장위원회에서 2035년 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 2018년 순배출량(742.3백만 톤 CO₂ eq) 대비 53-61% 감축으로 확정하였다(관계부처합동, 2025). 이는 기존 2030 NDC(40% 감축)보다 한층 강화된 목표로, 2035년 목표 순배출량은 289.5-348.9백만 톤 CO₂ eq 수준이다. 그러나 현재 전국 탄소 자급률 5.6%는 산림 흡수원 확충만으로는 이러한 감축목표 달성이 구조적으로 불가능함을 시사한다. 2035 NDC에서도 흡수원 부문은 38.3~39.3백만 톤 수준으로 제시되어 있어, 결국 배출원 자체의 획기적 감축과 CCUS(탄소포집·활용·저장) 기술 상용화가 병행되어야 목표 달성이 가능하다. 산림을 획기적으로 확대하더라도 국토 면적의 제약과 토지 이용 경합으로 인해 흡수량 증대에는 물리적 한계가 존재한다.

도시 녹지 및 그린인프라 확충은 탄소흡수 측면에서 정량적 기여는 제한적이거나, 도시민의 기후변화 인식 제고, 열섬 완화, 생물다양성 서식처 제공 등 복합적 편익을 창출한다는 점에서 정책적 의의가 있다. 다만 도시 내 녹지 조성만으로 해당 도시의 탄소 적자를 해소할 수 있다는 과도한 기대는 경계해야 하며, 보다 현실적인 접근은 배출 저감과 역외 흡수원 보전에 대한 재정적 기여(PES 등)를 병행하는 것이다.

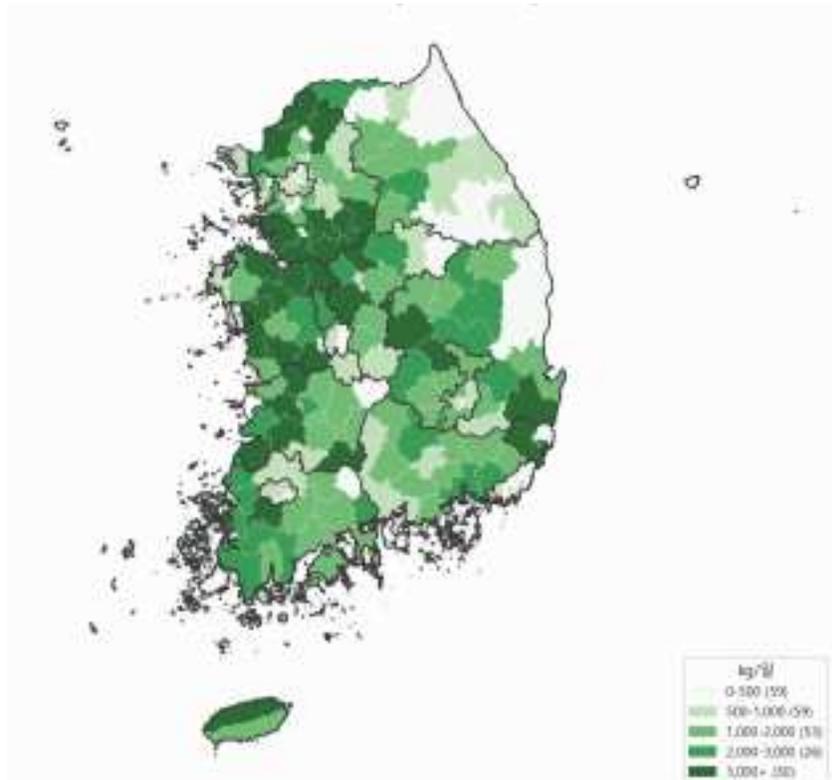
마지막으로, 본 분석에서 산림 중심 지역(강원 인제군, 홍천군, 경북 울진군 등)이 전국의 탄소흡수를 담당하고 있음이 확인되었다. 이들 지역은 탄소흡수원 공급자로서 국가 탄소중립에 기여하고 있으나, 이에 대한 경제적 보상 체계는 아직 미흡하다. 생태계서비스 수혜 지역(도시·산업 지역)과 공급 지역(산림 지역) 간의 형평성 있는 비용 분담 체계 마련이 향후 주요 정책 과제로 부각된다.

라. 수질 생태계서비스 공급-수요 분석

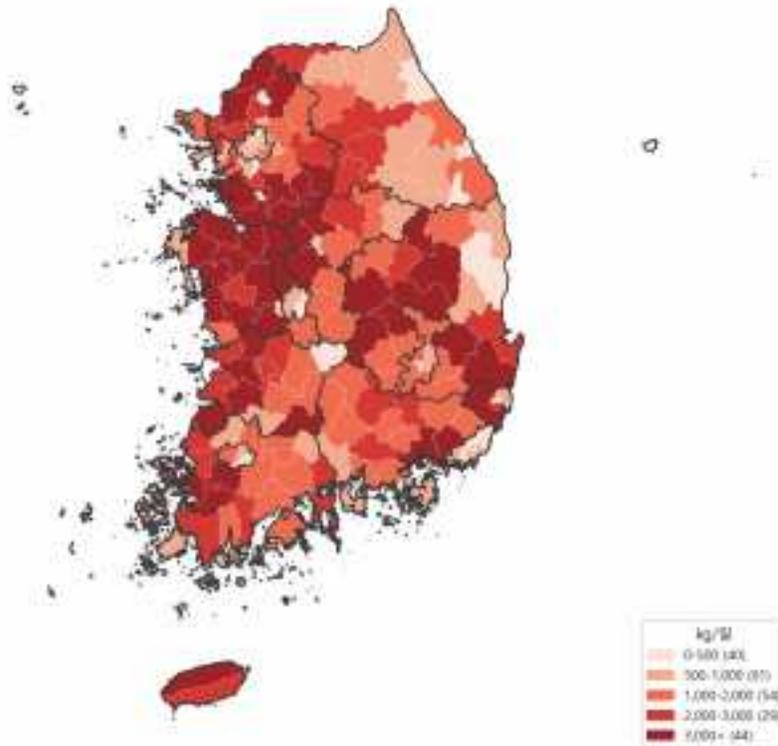
1) T-P(총인) 서비스 분석

가) 전국 현황

2022년 기준 전국 T-P 생태계서비스의 현황을 분석한 결과, 총 공급량(정화량)은 약 347,485kg/일이며, 총 수요량(발생량)은 약 411,099kg/일로 나타났다. 이에 따른 전국 자급률은 약 84.5%로, 정화량이 발생량의 상당 부분을 상쇄하고 있으나 여전히 약 15% 수준의 초과 부하가 존재하여 하·폐수처리시설 및 기타 수질 관리 수단에 대한 의존이 필요한 구조이다.



〈그림 III-1-5〉 기초자치단체별 총인(T-P) 공급량(정화량) 분포



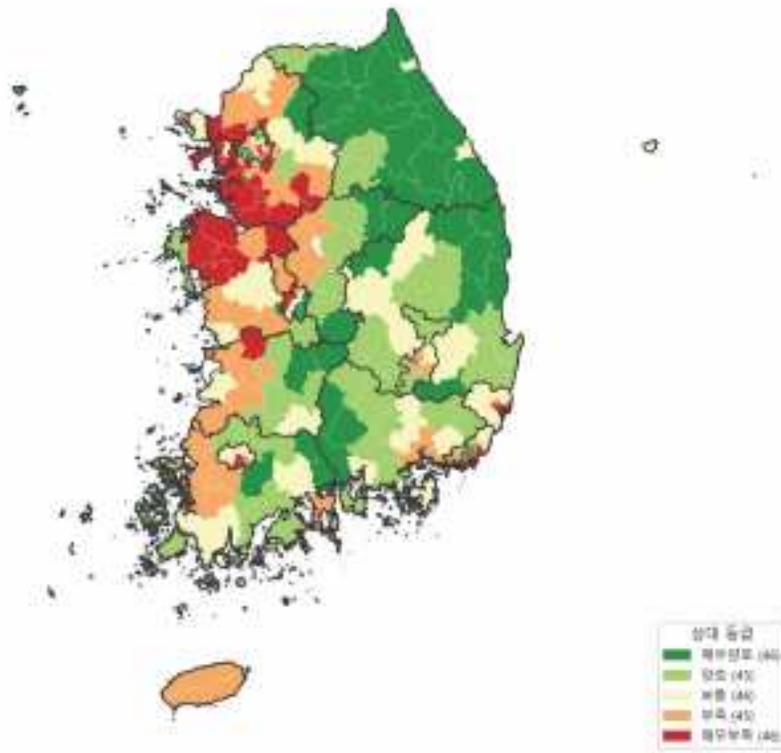
〈그림 Ⅲ-1-6〉 기초자치단체별 총인(T-P) 공급량(발생량) 분포

〈표 Ⅲ-1-3〉 전국 T-P 생태계서비스 현황(2022년)

항목	값	비고
총 공급량(정화량)	347,485 kg/일	WAMIS 정화량
총 수요량(발생량)	411,099 kg/일	WAMIS 발생량
전국 자급률	약 84.5%	공급/수요 × 100

나) 공급·수요 및 수지 패턴

T-P 공급(정화량) 상위 지역은 경기 평택시, 충북 청주시, 경기 화성시, 안성시, 충남 천안시 등으로, 농경지와 산림이 넓어 자연 정화 기능이 큰 지역들이다. T-P 수요(발생량) 상위 지역 역시 경기 평택시, 충북 청주시, 경기 화성시, 안성시, 충남 천안시 등으로, 축산·도시 활동이 결합된 복합 오염원 지역이다.

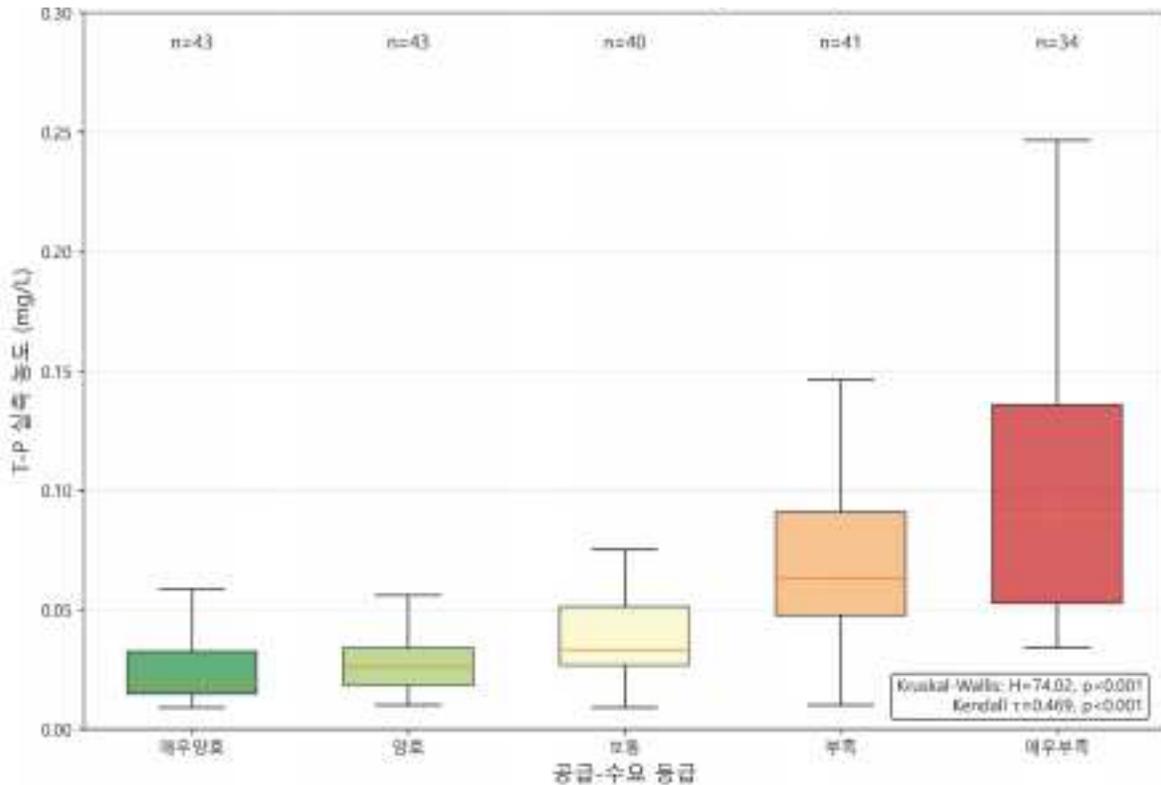


〈그림 III-1-7〉 기초자치단체별 총인(T-P) 수지(공급-수요) 5분위 등급

T-P 수지(공급-수요)는 모든 지자체에서 음수이지만, 상대적으로 부족 정도가 작은(‘양호’) 지역과 매우 큰(‘매우 부족’) 지역 간의 격차가 뚜렷하다. 상대적으로 양호한 지역(수지 상위)은 부산 수영구, 대구 중구, 서울 동작구·양천구·관악구 등으로 발생량 자체가 낮아 정화 부담이 적은 도시 내 구 단위 지역이며, 상대적으로 부족한 지역(수지 하위)은 경기 화성시, 충남 서산시, 제주 제주시, 경기 고양시, 충남 천안시 등으로 농축산·도시·산업 활동이 결합된 대규모 배출 지역이다.

다) 모델 검증

T-P 수지 등급과 실측 T-P 농도를 비교한 결과, 등급이 나쁠수록 실측 농도가 유의하게 높게 나타나는 경향이 확인되었다(Kruskal-Wallis 검정, $H=74.02$, $p<0.001$). 또한 Kendall's tau 검정 결과, 등급이 나빠질수록 실측 농도가 일관되게 증가하는 경향이 확인되어($\tau=0.469$, $p<0.001$) 모델 등급이 실제 수질 상태를 순서대로 잘 반영하고 있음이 검증되었다. 실측 T-P 농도가 낮은(수질 양호) 지역은 전북 진안군(0.009 mg/L), 부안군, 서울 중구, 대전 동구 등이며, 실측 농도가 높은(수질 불량) 지역은 전남 여수시(0.391 mg/L), 부산 부산진구, 해운대구, 수영구, 경기 안산시 등이다. 이는 T-P 기반 수질 서비스 수지 등급이 실제 수질 상태를 상당 부분 반영하고 있음을 보여준다.

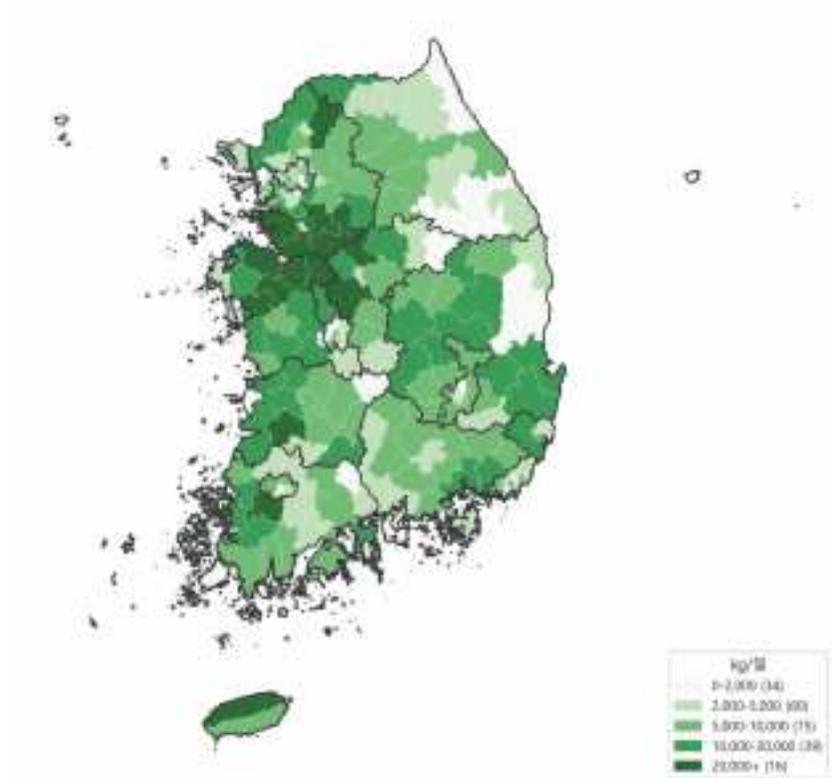


〈그림 III-1-8〉 총인(T-P) 5분위 등급별 실측 농도 비교

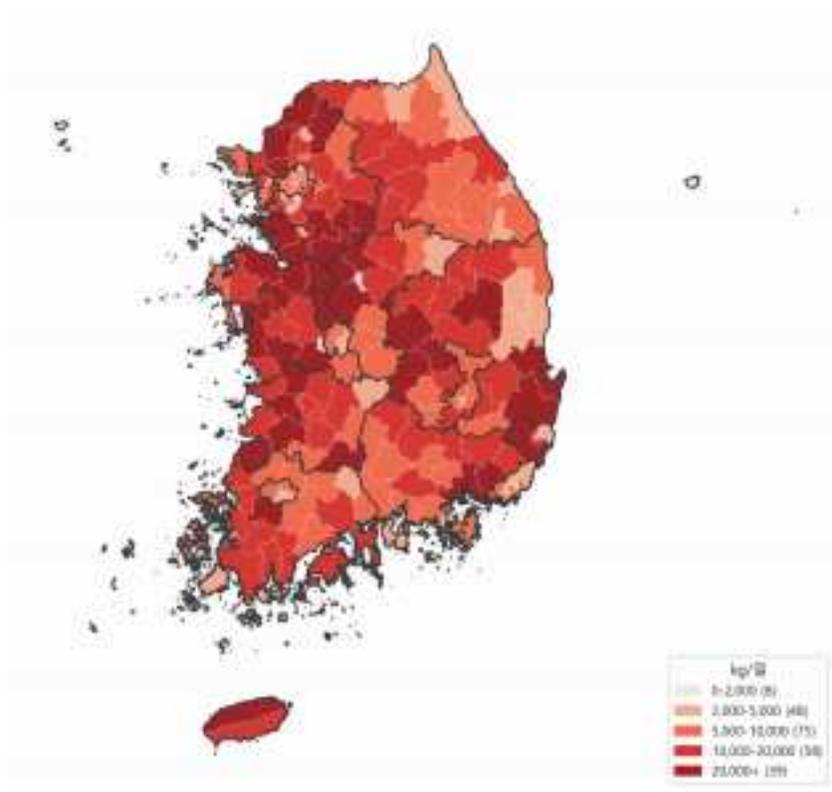
2) T-N(총질소) 서비스 분석

가) 전국 현황

2022년 기준 전국 T-N 생태계서비스의 현황을 분석한 결과, 총 공급량(정화량)은 약 1,739,964 kg/일이며, 총 수요량(발생량)은 약 2,733,112 kg/일로 나타났다. 이에 따른 전국 자급률은 약 63.7%로, T-N은 T-P에 비해 자연 정화율이 낮고 잔존 부하가 큰 특성을 보이며, 비점오염원(농업, 축산 등)의 영향을 크게 받는 것으로 분석된다.



〈그림 III-1-9〉 기초자치단체별 총질소(T-N) 공급량(정화량) 분포



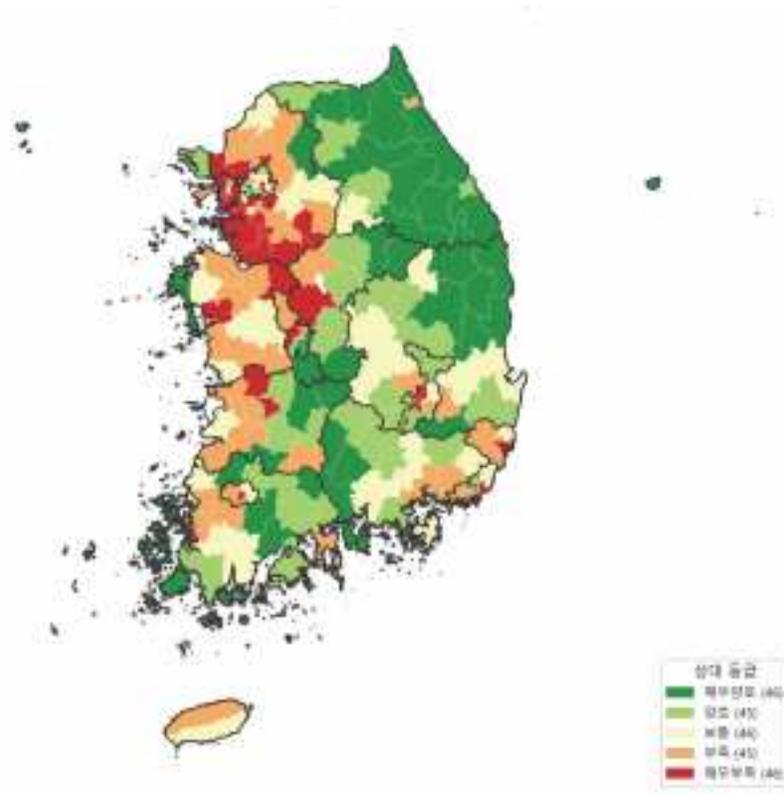
〈그림 III-1-10〉 기초자치단체별 총질소(T-N) 공급량(발생량) 분포

〈표 Ⅲ-1-4〉 전국 T-N 생태계서비스 현황(2022년)

항목	값	비고
총 공급량(정화량)	1,739,964 kg/일	WAMIS 정화량
총 수요량(발생량)	2,733,112 kg/일	WAMIS 발생량
전국 자급률	약 63.7%	공급/수요 × 100

나) 공급·수요 및 수지 패턴

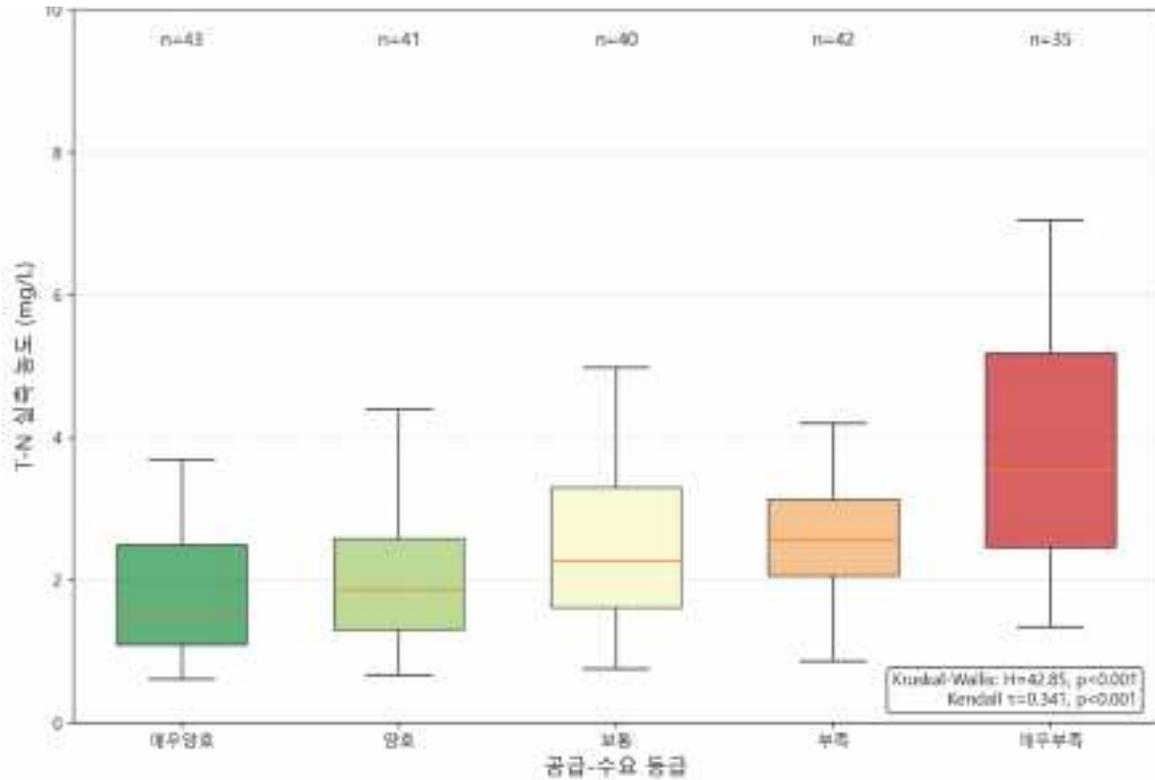
T-N 공급 및 수요 상위 지역은 T-P와 유사하게 경기·충남·충북의 일부 시에서 발생량과 정화량 모두 높은 구조가 나타난다. 수지 면에서는 수지 상위(부족 정도 상대적으로 작음) 지역이 부산 수영구, 대구 중구, 서울 금천구·동작구·양천구 등이며, 수지 하위(부족 정도 매우 큼) 지역은 서울 성동구, 서울 강서구, 경기 고양시, 충북 청주시, 경기 화성시 등이다. 도시·공단·대규모 주거지역이 혼재한 곳에서 질소 정화 서비스 수지의 심각한 부족 현상이 관찰된다.



〈그림 Ⅲ-1-11〉 기초자치단체별 총질소(T-N) 수지(공급-수요) 5분위 등급

다) 모델 검증

T-N 등급과 실측 T-N 농도 비교 결과, 등급이 낮은 지역에서 실측 농도가 전반적으로 높게 나타났으며, 이러한 차이는 통계적으로 유의하였다(Kruskal-Wallis 검정, $H=42.85$, $p<0.001$). 또한 Kendall's tau 검정에서도 등급이 나빠질수록 실측 농도가 일관되게 증가하는 경향이 확인되어($\tau=0.341$, $p<0.001$) T-N 수지 등급이 실제 수질 상태를 순서대로 잘 반영함을 알 수 있다. 실측 T-N 농도가 낮은(수질 양호) 지역은 강원 속초시(0.43 mg/L), 전남 완도군, 강원 고성군, 양양군 등이며, 실측 농도가 높은(수질 불량) 지역은 인천 부평구(10.25 mg/L), 경기 부천시, 광주 동구, 제주 제주시, 서울 노원구 등이다.

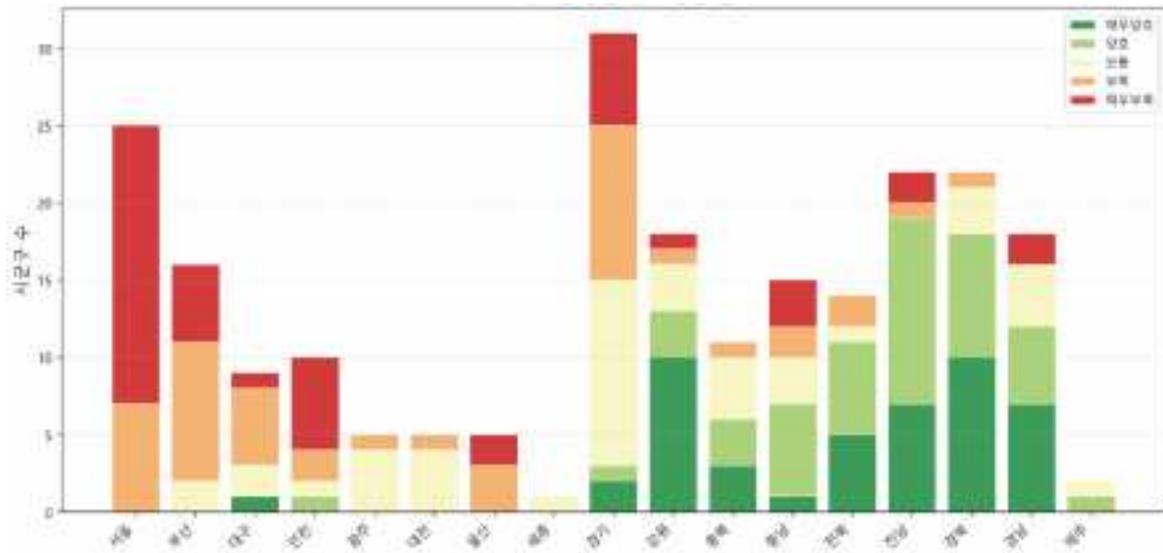


〈그림 Ⅲ-1-12〉 총질소(T-N) 5분위 등급별 실측 농도 비교

마. 시도별 종합 현황 및 도시 취약성 진단

1) 시도별 탄소 자급률

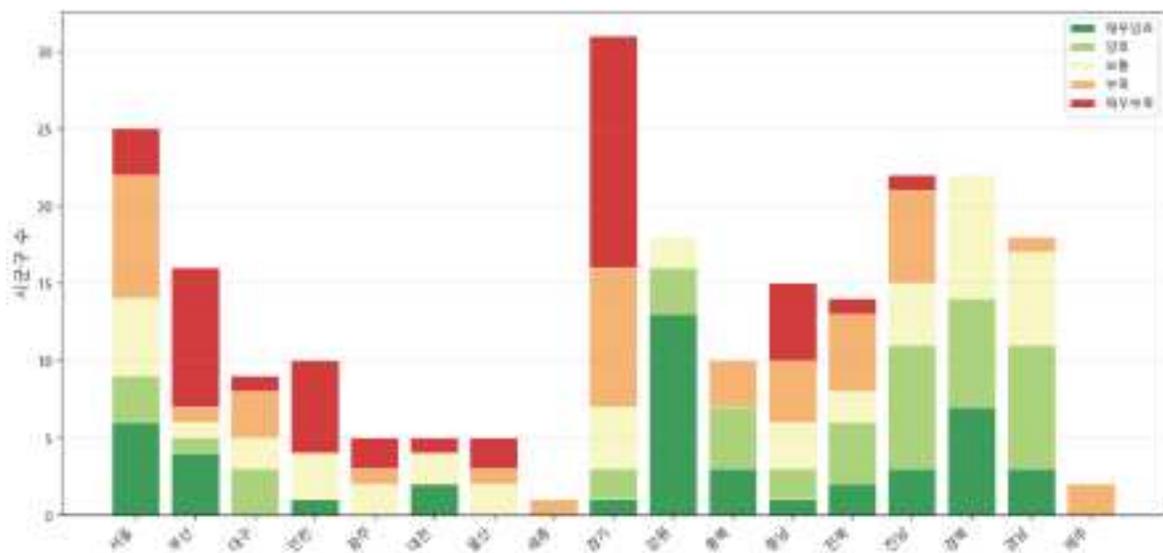
시도별 탄소 자급률을 분석한 결과, 강원(18.43%)과 경북(18.08%)이 산림 중심 지역으로서 상대적으로 높은 자급률을 보이나, 여전히 배출 상쇄에는 부족한 수준이다. 전북과 충북은 10% 이상 수준을 보이며, 경기(2.89%), 전남(3.29%), 충남(1.31%), 울산(1.01%), 인천(0.66%), 서울(0.43%) 등 대도시·산업단지 밀집 시도는 5% 미만, 일부는 1% 미만의 자급률을 나타냈다. 특히 서울(0.43%)과 인천(0.66%)은 자체 산림 흡수만으로는 사실상 탄소 배출을 상쇄할 수 없음을 보여준다. 이는 도시 지역이 주변 산림·농촌에 의존하는 '중심부 수요형' 구조로 되어 있음을 재확인해 준다.



〈그림 Ⅲ-1-13〉 시도별 탄소 공급-수요 등급 분포

2) 시도별 총인(T-P) 자급률

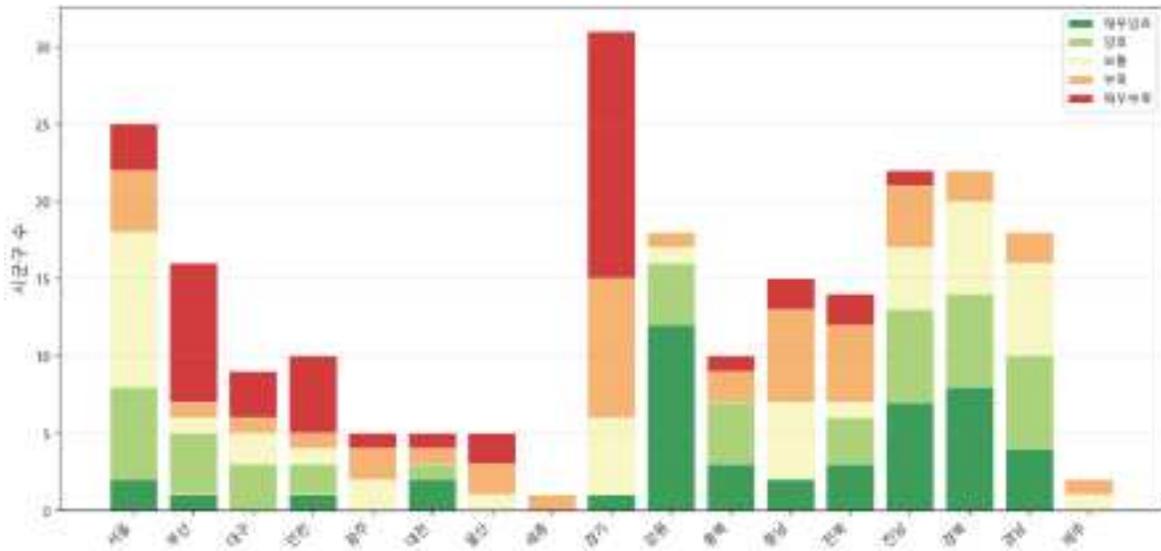
시도별 T-P 자급률을 분석한 결과, 대체로 모든 시·도가 75~90% 수준의 자급률을 보였다. 서울(91.07%), 대구(89.36%), 대전·세종·울산(88%대) 등은 도시형 시도임에도 자급률이 비교적 높게 나타나는데, 이는 발생량 자체가 상대적으로 낮거나 정화 능력이 상대적으로 높기 때문으로 해석할 수 있다. 반면 강원, 제주, 인천은 75% 전후로, 상대적으로 낮은 자급률을 보였다.



〈그림 Ⅲ-1-14〉 시도별 총인(T-P) 공급-수요 등급 분포

3) 시도별 총질소(T-N) 자급률

시도별 T-N 자급률을 분석한 결과, 세종(72.15%), 충남(69.15%), 부산(68.50%), 경기(66.82%) 등은 비교적 높은 자급률을 보이지만, 강원(48.63%), 광주(53.65%), 인천(56.32%) 등은 절반 내외 자급률로 질소 부하가 구조적으로 높거나 정화능이 제한적인 것으로 분석된다.



〈그림 III-1-15〉 시도별 총질소(T-N) 공급-수요 등급 분포

4) 도시·산업 지역 취약성 요약

분석 결과를 종합하면, 대도시권(수도권, 광역시)은 탄소·T-N 서비스에서 공통적으로 공급-수요 불균형이 심각한 것으로 나타났다. 서울의 경우 탄소 자급률이 0.43%에 불과하며, 인천(0.66%), 울산(1.01%), 충남(1.31%), 광주(1.44%), 부산(1.64%) 등 주요 광역시도 2% 미만의 극히 낮은 탄소 자급률을 보였다. 이는 대도시 지역이 에너지 소비와 경제활동의 중심지로서 막대한 탄소 배출을 발생시키는 반면, 도시화로 인해 흡수원인 산림·녹지가 절대적으로 부족하기 때문이다.

산업 거점 지역의 취약성은 더욱 심각하다. 충남(1.31%)은 당진화력발전소 등 대규모 발전시설로 인해 도 단위 중 가장 낮은 탄소 자급률을 기록하였으며, 전남(3.29%) 역시 광양제철소, 여수석유화학단지 등의 영향으로 산림 면적이 넓음에도 불구하고 낮은 자급률을 보였다. 이들 지역은 국가 경제에 핵심적인 역할을 하지만, 생태계서비스 관점에서는 가장 취약한 지역으로 분류된다.

일부 도 단위에서는 산림 지역(공급 초과)과 도시·산업 지역(수요 초과)이 혼재하며, 도 단위 내의 공간적 불균형이 크게 나타났다. 예를 들어 경기도의 경우 북부 산림 지역(가평, 양평 등)은 탄소 수지가 양호하나, 남부 도시·산업 지역(수원, 화성, 평택 등)은 심각한 적자를 보인다. 경북도 마찬가지로 울진·영양 등 동부 산림권역과 포항·구미 등 산업 권역 간 극명한 대비를 이룬다.

수질 서비스의 경우, 총인(T-P) 자급률은 전반적으로 75-91% 수준으로 비교적 양호하나, 총질소(T-N)

자급률은 48-72%로 지역 간 편차가 크다. 특히 강원도는 총질소(T-N) 자급률이 48.63%로 가장 낮는데, 이는 축산업 비중이 높아 질소 발생량이 많지만, 산악 지형으로 인해 정화 기능이 상대적으로 제한되기 때문으로 추정된다. 광주(53.65%), 대구(61.89%), 인천(56.32%) 등 대도시권 역시 총질소(T-N) 자급률이 낮아 질소 부하에 대한 관리가 필요하다.

복합 취약지역, 즉 탄소와 수질(T-N) 서비스가 동시에 부족한 지역도 확인된다. 인천, 광주 등은 탄소 자급률 2% 미만, T-N 자급률 60% 미만으로 두 서비스 모두에서 취약성을 보이며, 이들 지역은 생태계서비스 증진을 위한 우선적 정책 개입이 요구된다.

이러한 결과는 도시지역이 주변 산림·농촌에 의존하는 ‘중심부 수요형’ 구조로 되어 있음을 재확인해 준다. 도시와 산업단지는 생태계서비스의 최대 수혜자이면서 동시에 최대 수요자로서, 이들 지역의 지속가능성은 주변 생태계의 건전성에 직접적으로 연동되어 있다. 따라서 개별 지자체 단위의 대응만으로는 한계가 있으며, 광역적 관점에서 공급 지역과 수요 지역 간의 협력 체계 구축이 필수적이다. 실제로 중국에서는 유역 단위로 상류-하류 간 수질 보전 협약을 체결하여 생태 보상을 추진한 사례가 있다(Wang et al., 2016).

한편, 본 연구에서 적용한 수요-공급 수지 모델은 T-P($\tau=0.469$, $\rho<0.001$)와 T-N($\tau=0.341$, $\rho<0.001$) 모두에서 실측 수질 농도와 유의한 순위상관을 보여, 모델 등급이 실제 수질 상태를 순서대로 잘 반영함이 검증되었다. 이는 WAMIS 기반의 발생량-정화량 수지 접근법이 기초자치단체 단위의 수질 생태계서비스 평가에 유효한 방법론임을 실증적으로 뒷받침하며, 향후 정책적 의사결정의 과학적 근거로 활용될 수 있다.

〈표 III-1-5〉 시도별 생태계서비스 자급률 종합

시도	시군구 수	탄소 자급률(%)	T-P 자급률(%)	T-N 자급률(%)	비고
서울	25	0.43	91.07	62.79	극심한 탄소 적자
부산	16	1.64	79.43	68.50	도시형
대구	9	6.45	89.36	61.89	도시형
인천	10	0.66	75.67	56.32	극심한 탄소 적자
광주	5	1.44	86.91	53.65	도시형
대전	5	3.18	88.96	66.30	도시형
울산	5	1.01	88.48	62.76	도시+산업
세종	1	5.97	88.61	72.15	행정중심복합도시
경기	31	2.89	86.04	66.82	도시+농촌 혼합
강원	18	18.43	75.98	48.63	산림 중심
충북	11	10.83	87.20	63.88	도농 복합
충남	15	1.31	84.49	69.15	대규모 산업단지
전북	14	12.69	86.73	65.71	도농 복합
전남	22	3.29	82.63	63.25	도농 복합
경북	22	18.08	83.74	61.27	산림 중심
경남	18	7.71	82.63	61.26	도농 복합
제주	2	6.53	75.91	62.29	도서 지역
전국	229	5.59	84.53	63.66	-

바. 정책적 시사점 및 제도 개선 방향

1) 도시·기초자치단체 단위 관리 전략

가) 탄소 수지 적자 지역 대응

대부분의 도시·산업단지가 탄소 수지 적자 상태에 있으므로, 도시 녹지 및 그린인프라(GI) 확충이 시급하다. 공원·가로수·옥상녹화·수직정원 등을 통해 도시 내 탄소흡수원을 확대하고, 에너지 전환 및 교통·건물 부문 감축 정책을 연계해야 한다. 아울러 기초단위 온실가스 감축 목표 설정 및 모니터링 체계를 구축하여 지역 맞춤형 기후 대응 정책을 추진해야 한다.

나) 수질 취약지역 대응

T-P 및 T-N 서비스 부족 지역을 대상으로 축산·농업 비점오염원 관리를 강화해야 한다. 가축분뇨 자원화, 저감시설 확충 등을 통해 발생량을 줄이고, 하천변 완충녹지, 인공습지, 저류지 등 자연기반해법(NbS)을 도입하여 자연정화 능력을 증진해야 한다. 산지·상류 권역의 서식처·생태계 보전을 강화하여 지지 서비스 기반을 유지하는 것도 중요하다.

2) 생태계서비스지불제(PES) 및 지역 간 협력

앞에서 확인된 바와 같이, 산림 중심 지역은 탄소 흡수와 수질 정화라는 핵심 생태계서비스를 공급하는 반면, 도시·산업 지역은 이러한 서비스의 최대 수혜자이다. 그러나 현재 공급 지역에 대한 경제적 보상 체계는 미흡하여, 생태계서비스 공급자와 수혜자 간의 형평성 문제가 제기된다. 생태계서비스 지불제(PES)는 이러한 문제를 해결하기 위한 시장 기반 정책 수단으로, 서비스 수혜자가 공급자에게 직접 또는 간접적으로 비용을 지불하는 방식이다(Wunder, 2005).

본 연구 결과를 바탕으로, 탄소 수지 양호 지역(강원 인제군, 홍천군, 경북 울진군 등)을 대상으로 탄소 흡수원 보전에 대한 PES 도입을 검토할 필요가 있다. 자원 조달 방안으로는 탄소 수지 적자 지역(도시·산업 지자체)의 수혜자 부담금, 배출권거래제 수익금의 일부 활용, 또는 탄소세 도입 시 세수의 일정 비율 배분 등을 고려할 수 있다. 보상 체계는 기본 지불(산림 기준)과 가산 지불(추가적 보전 활동에 대한 인센티브)을 결합하는 방식이 효과적일 것이다.

다만 PES 제도화를 위해서는 법적 근거 마련이 선행되어야 한다. 현행 자연환경보전법에 생태계서비스 개념이 명시되어 있으나, 지불제 운영을 위한 구체적 규정은 부재하다. 향후 동법 시행령 또는 별도 특별법을 통해 PES의 대상 서비스, 보상 기준, 자원 조달, 거버넌스 체계 등을 규정할 필요가 있다.

사. 향후 과제

본 연구는 기초자치단체 단위의 탄소 및 수질 생태계서비스 수요-공급 현황을 정량적으로 분석하였으나, 향후보다 정교한 정책 지원을 위해서는 몇 가지 후속 연구가 필요하다. 첫째, 생태계서비스 평가의 주기적 모니터링 체계 구축이 요구된다. 현재 분석은 2022년 단일 시점을 기준으로 하였으나, 토지이용 변화와 사회경제적 여건 변동에 따른 공급-수요 변화를 추적하기 위해서는 연간 또는 격년 단위의 정기적 평가 시스템이

마련되어야 한다. 둘째, 기후변화 시나리오에 따른 미래 전망 분석이 필요하다. SSP-RCP 시나리오를 적용하여 기온 상승, 강수 패턴 변화, 극한 기상 현상 증가가 산림 탄소 흡수량과 수질 정화 기능에 미치는 영향을 예측함으로써 중장기 적응 전략 수립에 이바지할 수 있다. 셋째, 생태계서비스의 경제적 가치 평가 고도화가 요구된다. 본 연구에서는 물리량 기반의 수지 분석에 초점을 맞추었으나, 정책적 의사결정 지원을 위해서는 탄소 사회적 비용, 수질 정화 대체비용 등을 활용한 화폐화 평가가 병행되어야 한다. 넷째, 지역 맞춤형 생태계서비스 증진 전략 수립 연구가 필요하다. 본 연구에서 도출된 취약지역별 특성(도시형, 산업 단지형, 도농복합형 등)에 따라 차별화된 녹색인프라 확충, 오염원 관리, 생태복원 우선순위를 제시하는 후속 연구가 요구된다. 다섯째, 통합 수자원 취약성 분석의 고도화가 필요하다. 본 연구에서 다룬 수질 정화 서비스 외에 수량 공급, 홍수 조절, 지하수 함양 등 다양한 수문 생태계서비스를 포괄하고, 물 이용량 및 물 스트레스 지표와 연계한 종합적인 수자원 취약성 평가 체계를 구축할 필요가 있다.

2. 생태계서비스 국민 인식 및 만족도 분석을 통한 수요 지표 개발 및 평가 검증

생태계서비스에 대한 '수요'는 인간 사회 또는 개인이 필요로 하는 특정 생태계서비스의 양 또는 수치를 의미하며, 수요와 공급이 일치하지 않는 경우 인간 삶의 질에 부정적 영향을 줄 수 있다. 또한 '생물다양성' 대비 '생태계서비스'에 대한 인식이 낮아 연구 결과에 대한 정책 활용 및 도시 공간계획 반영에 한계점이 존재한다. 따라서 생태계서비스 개념에 대한 인식과 생태계서비스 지표별 만족도 조사를 통해 생태계서비스 수요에 대한 정도를 파악할 수 있으며 중장기 데이터 분석 결과를 바탕으로 정책 방향성을 설정하고자 2022년부터 '생태계서비스 국민 인식 및 만족도 설문조사'를 시작하였다. 이를 통해 우리 국민이 본인이 거주하는 주변 지역의 생태계에 대해 얼마나 인식하고 있고 어느 정도 만족을 하고 있는지와 같은 '실제 수요'에 대한 근거를 마련하여 관련 분야의 인식증진과 생태계 보전 정책 등에서 활용하고자 한다. 설문조사 결과는 다양한 인구통계학적 요소의 교차 분석을 통해 실제 수요를 반영할 수 있는 정책 근거를 마련할 수 있을 것으로 본다. 2025년의 설문조사는 조사 시작 전 내부 연구진들을 통한 의견 수렴을 통해 설문 문항을 수정했고, 해외 문헌 검토를 통해 문항을 추가하기도 하였다. 설문 결과는 다양한 교차 분석을 통해 검토 후 기후에너지환경부와 함께 보도자료로 배포하였다.

가. 설문조사 항목 검토 및 문항 조절

1) 설문조사 질문지 수정

2025년 설문조사 시작에 앞서 팀원들을 대상으로 설문조사 문항의 적절성과 이해도에 대해 검토하였다. 전문가가 아닌 일반 국민의 시각에서 문항 서술의 난이도를 고려한 약간의 수정이 있었으며, 이해를 돕기 위한 별도의 설명 문구도 추가되었다. 또한 국민의 자연환경 방문 빈도 문항과 접근성 분석을 위해 「귀하가 가장 높은 빈도로 '걸어서' 방문하는 자연환경은 거주지(집)로부터 어느 정도 거리에 있습니까(도보 기준)?」 항목을 추가하였다. 이에 대한 답변은 100 m(2분 이내), 300 m(약 5분) 이내, 500 m(약 8분) 이내, 1 km(약 15분) 이내, 1km(15분) 이상의 5개로 상정하였다.

추가 문항의 '15분'이라는 개념은 파리1대학의 카를로스 모레노(Carlos Moreno)가 처음 체계적으로 도입·정식화한 개념으로 15분 도시(15-minute city) 소개에서 차용하였다. 그의 연구에서는 도시 거주자가 도보나 자전거를 이용하여 15분 이내에 생활·근무·상업·의료·교육·여가의 6대 기능을 충족할 수 있도록 하는 다중 중심 도시 모델을 제시한 바가 있다(Moreno, 2016). 이러한 도시 모델에 따라 시간과 거리의 상관성을 살펴보면, 일반 성인의 평균 보행 속도는 시속 약 4~5 km로 정의되며, 이는 15분 동안의 이동 거리를 약 1 km로 환산하게 된다. Schimble et al.(2011)은 건강한 성인의 보행 속도를 연령대별로 분석했고, 특히 도시환경에서 15분이라는 시간은 학술적으로 1 km 거리의 이동에 상응함을 보여준다. Marquet & Miralles-Guasch (2014)가 바르셀로나를 대상으로 한 연구에서는 도보 10분을 약 650 m로 계산했으며, 유럽의 15분 도시 정책 실무 가이드(EIT Urban Mobility, 2016)는 고령자(3.5 km/h)와 일반 보행속도(5 km/h)를 고려할 때 15분 도보권을 900~1,000 m 범위로 명시했다. Zhang & Jiang(2025)의 연구에서는 보행 거리를 1,080 m로 설정했고, Shoina et al.(2024)은 1,200 m 반경을 생활권 분석 단위로 활용했다. 특히 Shoina et al.은 15분 도시의 필수 서비스 항목으로 기존의 교육, 의료와 함께 녹지(Green areas)와 놀이터를 명시적으로

포함시켜, 녹지가 선택사항이 아닌 기본 인프라로서 지위를 갖는 곳으로 보았다. 세계보건기구(WHO, 2017)에서는 도시 거주민이 집에서 300 m(도보 5분) 이내에 최소 0.5~1 ha 규모의 공공녹지에 접근해야 한다는 더욱 엄격한 기준을 제시했다. 따라서 본 설문에서 제시한 도보 15분(1 km) 이내 자연환경 접근성 문항은 성인 평균 보행 속도에 기반한 물리적 거리의 타당성과 15분 도시 프레임워크 내에서 자연환경이 필수재의 지위를 갖고 있음을 동시에 반영한 것이다. 또한 Allam et al.(2022)이 제시한 15분 도시의 4대 자원(근접성, 밀도, 다양성, 디지털화)과도 일치하며, Olsen et al.(2019)의 근접 환경 중요성 연구로도 보완이 된다.

2) 2025년 설문조사 수행

(1) 조사 개요

이번 설문조사는 유효한 응답자 7천 명 내외 수집을 목표로 시작되었다. 설문조사는 온라인 패널조사 방식을 채택하였는데, 이는 기간과 예산, 목표 표본 수집을 고려한 결과이다. 조사 수행을 대행한 기관은 두잇서베이로 그들이 구축하고 있는 패널 목록에서 2025년 3월 기준으로 전국 광역시·도의 연령별, 성별, 지역별 인구 비율에 맞춰 패널을 추출하도록 하였다. 설문조사 기간은 2025년 4월 25일부터 2025년 5월 20일까지 진행되었고, 불성실 응답을 제거한 7,106명의 응답 결과를 확보하였다.

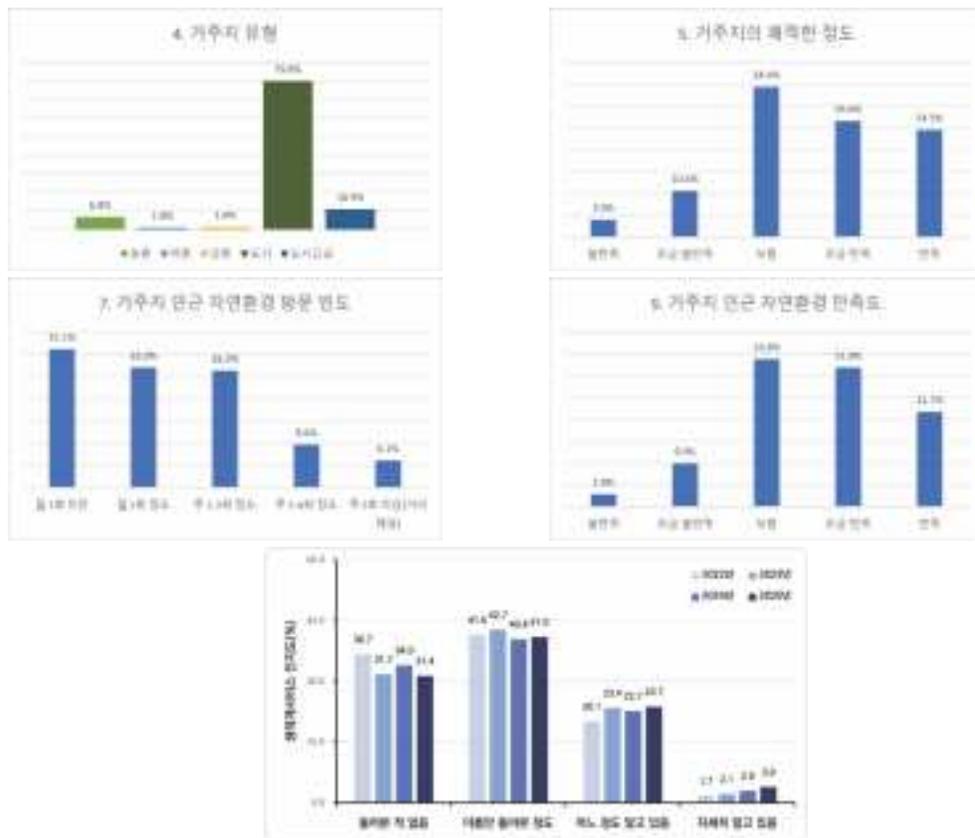
- 최종표본: 전국 만 18세 이상 성인 7,106명 (표본오차 $\pm 1.16\%P$, 신뢰수준 95%)
- 인구·사회학적 통계
 - 설문 기간: 2025년 4월 25일 ~ 2025년 5월 20일
 - 설문 결과: 불성실 응답 제거 → 최종 7,106명 확보
 - 지역별 배분: 서울(1,535), 인천(536), 대전(268), 광주(247), 대구(418), 울산(150), 부산(441), 세종(52), 제주(76), 경기(1,826), 강원(155), 충북(172), 충남(217), 전북(210), 전남(162), 경북(276), 경남(365)
 - 성별: 남성(3,527), 여성(3,579)
 - 연령: 20대(1,180), 30대(1,577), 40대(1,759), 50대(1,847), 60대 이상(743)
 - 소득: 100만 원 이하(1,358), 100~200만 원(821), 200~300만 원(1,598), 300~400만 원(1,347), 400~500만 원(828), 500~600만 원(528), 600만 원 이상(626)
 - 학력: 중졸 이하(95), 고졸(1,735), 대학교 재학(386), 초대졸(1,107), 대졸(3,248), 대학원 졸업 이상(535)

〈표 Ⅲ-2-1〉 2025년 설문조사 지역별 표본 수집 현황

구분	인구 비율(%) (’25.4. 기준)	설문 응답 비율(%)	구분	인구 비율(%) (’25.4. 기준)	설문 응답 비율(%)
서울	18.2	21.6	경기	26.8	25.7
부산	6.4	6.2	강원	3.0	2.2
대구	4.6	5.9	충북	3.1	2.4
인천	5.9	7.5	충남	4.2	3.1
광주	2.7	3.5	전북	3.4	3.0
대전	2.8	3.8	전남	3.5	2.3
울산	2.1	2.1	경북	4.9	3.9
세종	0.8	0.7	경남	6.3	5.1
제주	1.3	1.1			

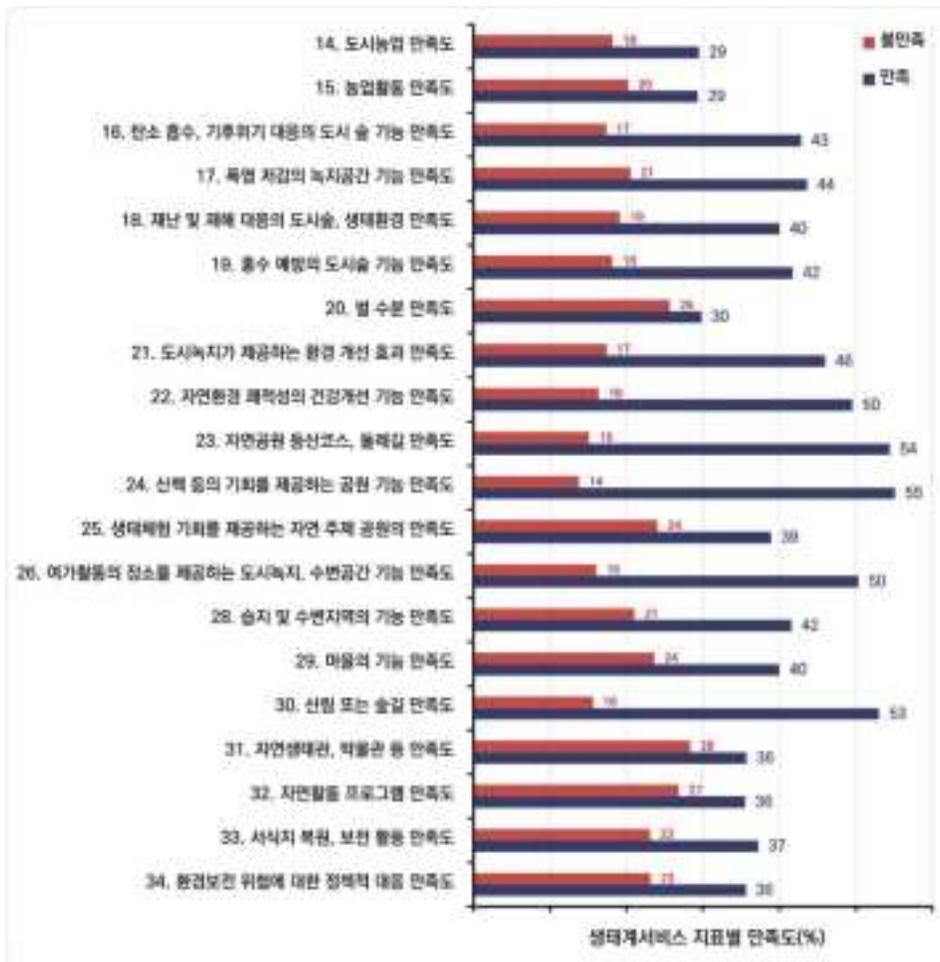
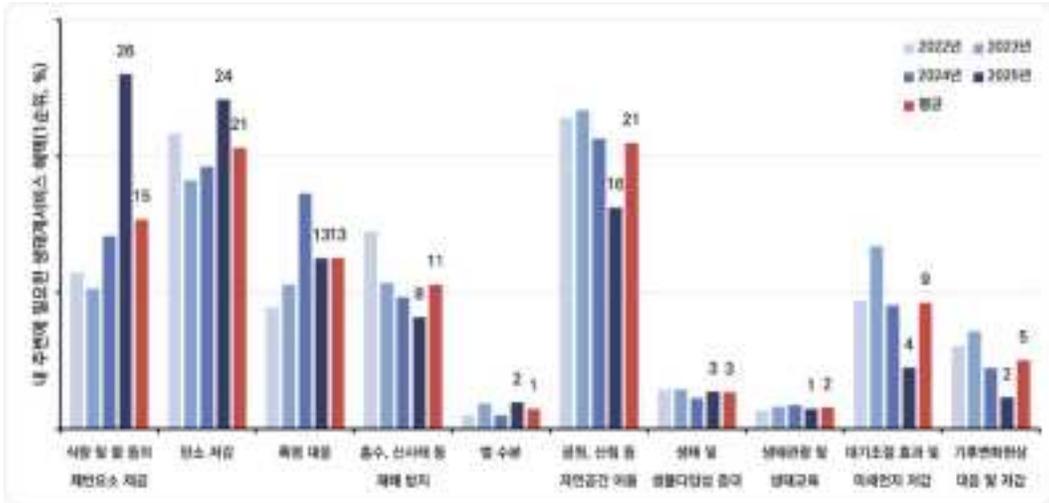
(2) 주요 조사 결과

응답자들의 거주지 유형으로는 도시(79.8%), 도시근교(10.9%), 농촌(1.4%), 여촌(1.0%), 산촌(1.4%) 순으로 나타나 대부분이 도시와 근교 지역에 거주(90.8%)하는 것으로 나타났다. 거주지 공간 쾌적성에 대해서는 만족의 유형이 51.1%, 불만족 유형이 14.5%로, 전반적으로 거주지의 쾌적성에 만족하는 것으로 응답했다. 또한, 자연환경 방문 빈도에서는 거의 매일 방문자(6.1%), 주 3-4회(9.6%), 주 1-2회(26.3%), 월 2회(26.9%), 월 1회 미만(31.1%)로 주 1회 이상 자연환경을 방문하는 국민의 비율은 42.0%로 나타났다. 거주지 자연환경에 대한 만족도 문항에서는 53.5%가 만족한다고 응답했고 불만족 응답은 12.7%로 확인되었다. 자연이 인간에게 주는 혜택인 생태계서비스 인식에 관한 질문에서는 인지하고 있다는 응답이 68.6%로 2024년(66.0%)에 비해 2.6%p 상승한 것으로 나타났다.



〈그림 Ⅲ-2-1〉 2025년 생태계서비스 설문조사 주요 결과(1)

내 거주지 주변에서 가장 필요한 생태계서비스 혜택은 ‘식량 및 물 등 제반 요소 제공’으로 나타났는데, 이는 설문 직전 발생한 영남권 산불의 영향으로 보이며, ‘탄소저감’, ‘공원·산림 등 자연공간 이용’ 순으로 선호도가 높았다. 지표별 만족도에서는 도보권(15분, 1 km) 내에서 편안한 휴식과 산책 등의 운동기능을 제공하는 공원의 기능에 대한 만족도가 가장 높게 나타났다(55%). 또한 전반적으로 개인이 자연환경을 직접적으로 이용하면서 혜택을 체감하는 항목에 대한 만족도가 높았다.



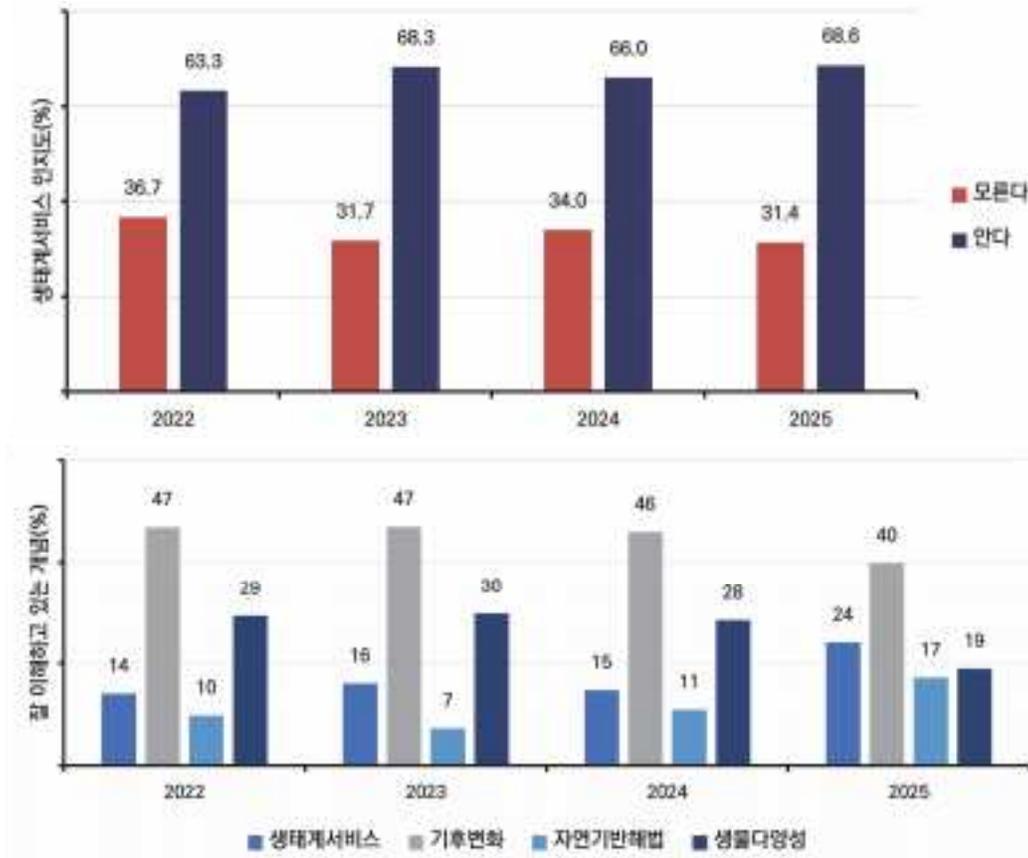
〈그림 III-2-2〉 2025년 생태계서비스 설문조사 주요 결과(2)

나. 지역별 설문 결과 및 수요 지표 분석 결과 연계

1) 보도자료 작성을 위한 별도 분석 결과 작성

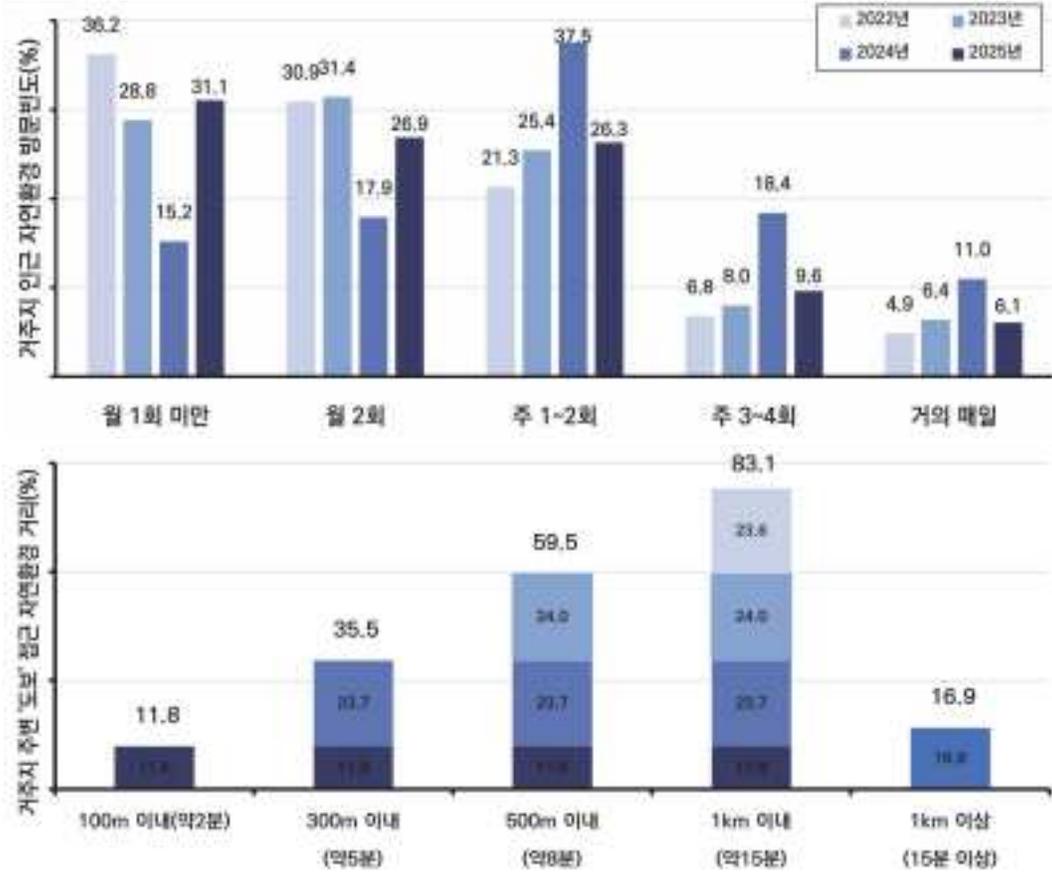
(1) 연도별 분석 및 교차 분석

생태계가 사람에게 제공하는 혜택인 '생태계서비스'에 대한 인지 여부의 문항에서는 4년 간의 조사 중 가장 높은 수치(68.6%)가 기록되었다. 4년간 60%대를 유지하고 있으며 최근 3년의 응답은 오차범위 내외에서 인지도가 나타났다. 가장 잘 이해하고 있는 개념에 관한 질문에서는 2025년 조사에서 처음으로 기후변화 다음으로 잘 이해한다는 응답 결과가 나왔다. 그간 기후변화-생물다양성-생태계서비스-자연기반해법 순으로 이해도가 분포했는데, 생태계서비스에 대한 지속적인 인식증진 사업과 홍보를 통해 가장 높은 수치(24%)로 기록되었다. 또한 자연기반해법도 기존에 비해 국민의 이해 정도가 높아진 것으로 확인된다(2022년 10% → 2025년 17%).



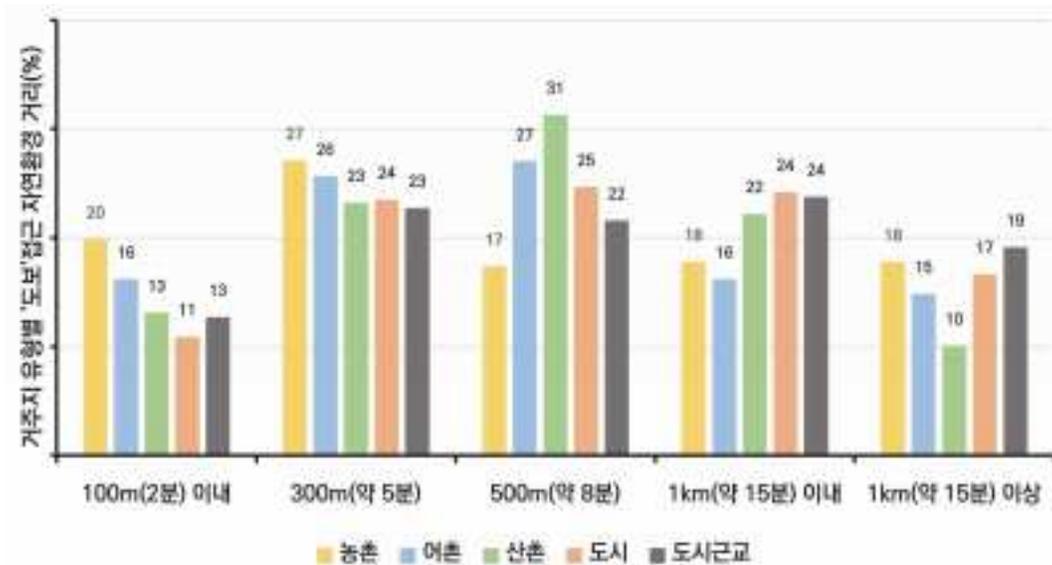
〈그림 III-2-3〉 생태계서비스 인지도 및 잘 이해하고 있는 개념의 연도별 변화

응답자들이 자연을 경험하거나 체험하기 위해 자연환경(산, 하천·습지 등 수변공간, 들·초지, 공원, 경작지, 바다 등)에 얼마만큼의 빈도로 방문하는지에 대한 질문에서는 예년과 비슷한 수준을 유지하고 있는 것으로 확인된다. 또한 이번 설문조사에서 새롭게 추가된 응답자의 거주지 주변에서 '도보'로 접근할 수 있는 자연환경의 거리에 관한 질문에서는 10명 중 6명 정도가 약 500 m(8분) 이내에 존재하는 것으로 응답하였다. 현실적으로 쉽게 접근하기 어려운 1 km 이상(15분 이상) 거리의 응답자는 16.9%에 달했다.



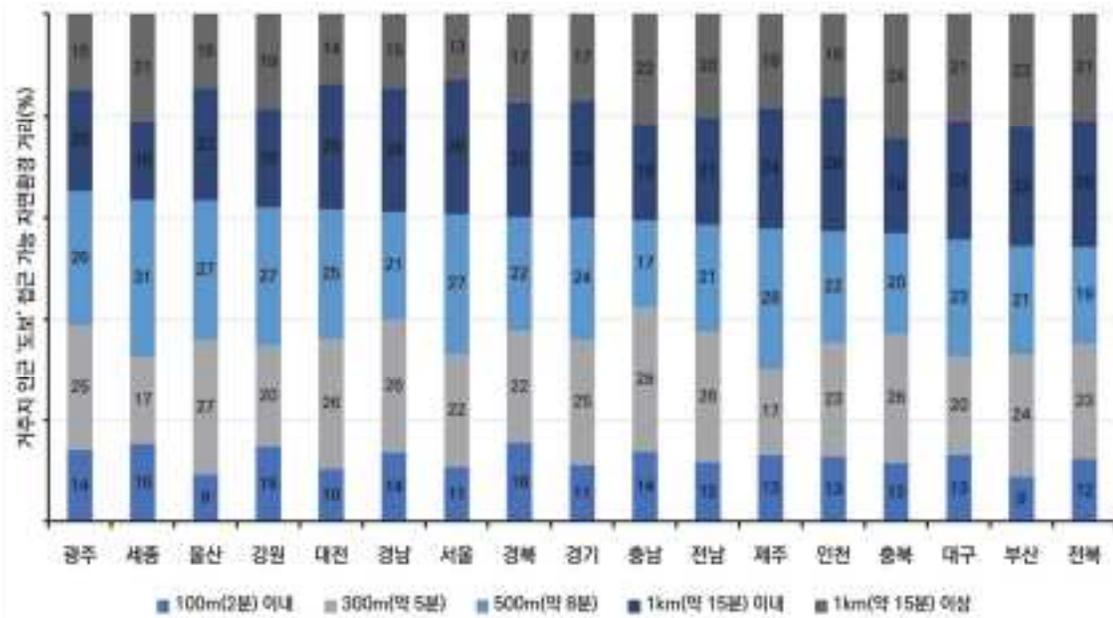
〈그림 III-2-4〉 거주지 인근 자연환경 방문빈도의 연도별 변화 및 자연환경 접근 거리

거주지 유형별 도보 접근 자연환경 거리에 대한 교차 분석 결과에서는 농·어·산촌 거주자의 65%, 도시 거주자의 59%, 도시근교 거주자의 57%가 도보 500 m(약 8분) 이내에 자연환경이 있다고 응답하였다. 주로 도시 외곽에 위치하여 자연환경에 대한 접근이 상대적으로 쉬울 것으로 예상되는 도시근교 지역이 도시 지역보다 1 km 이내 접근할 수 있는 자연환경의 분포가 낮다는 점이 특이하다고 할 수 있다.



〈그림 III-2-5〉 거주지 유형별 '도보'로 접근가능한 자연환경 거리

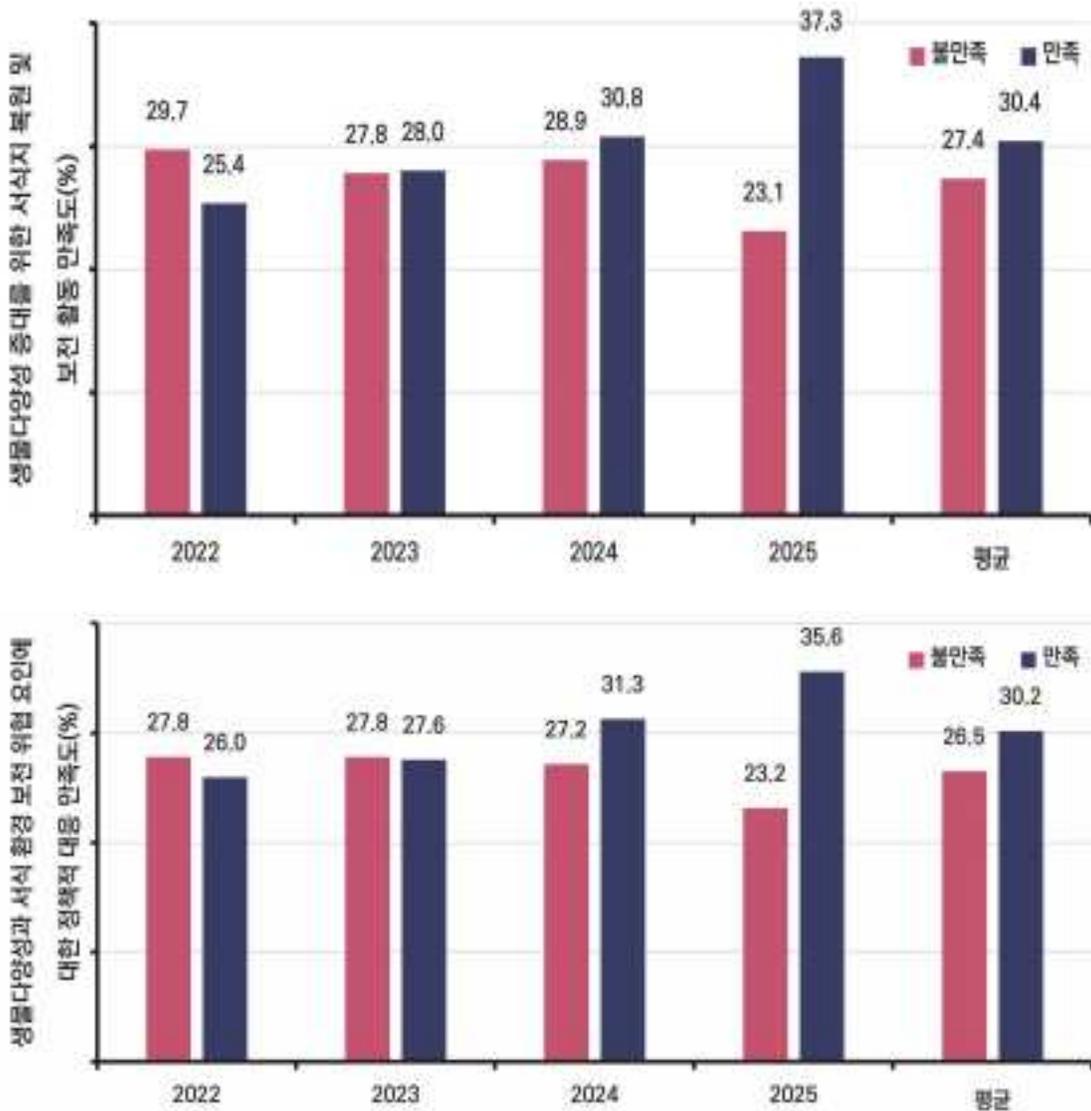
광역시·도 별로 응답자들의 거주지에서 도보로 접근할 수 있는 자연환경의 거리를 교차분석한 결과 500 m (약 8분) 이내에 위치한다는 응답자의 비율은 광주광역시(65%)가 가장 높았다. 세종시와 울산광역시 등의 순으로 그 비율이 높게 나타났다.



〈그림 III-2-6〉 광역시도 별 '도보'로 접근 가능한 자연환경 거리

인간이 동·식물과 공존하기 위해서는 개발로 인해 훼손된 서식지를 복원·보전하는 정책이 필요하다. 응답자들에게 거주하는 지역에서 체감하는 생물다양성 증대를 위한 서식지 복원 및 보전 활동(녹지·자연형 하천 조성 등)에 대해 얼마나 만족하느냐는 질문에 대해서는 37.3%가 만족한다고 응답하였다. 이는 최초 조사였던 2022년의 25.4%에 비해 약 11.9%p 상승했으며, 지속적으로 상승하는 추세를 보인다.

생태적으로 우수한 공간(해양, 산림, 습지, 농촌 등)의 생물다양성과 서식 환경 보전을 위협하는 요인들(개발, 오염, 외래종 침입 등)에 대한 대처가 필요한 시점에 응답자들이 거주하는 지역에서 이런 우수한 공간을 보전하기 위한 정책적 대응에 대해 얼마나 만족하느냐는 질문에서도 응답자의 35.6%가 만족하는 것으로 나타났으며, 마찬가지로 2022년 이후 지속적으로 상승하는 추세를 나타냈다.



〈그림 Ⅲ-2-7〉 지지서비스 관련 만족도 응답 결과

(2) 국민 인식 증진을 위한 설문 조사 주요 결과의 배포

이번 조사 결과에 대한 국민 홍보를 위해 기후에너지환경부와 보도자료를 작성하였다. 우선 국민이 가장 관심을 갖는 지역별 자연환경 만족도 분석 결과에서는 울산광역시가 64.7%로 가장 높았다. 이어 경남, 세종, 제주, 강원 순으로 만족도가 높게 나타났는데, 1위를 한 울산을 제외한 다른 지역들은 매년 주민들의 자연환경 만족도가 높았던 지역이었다. 2024년에 비해 약 17.9%p 상승하며 자연환경 만족도 1위를 기록한 울산광역시는 과거 태화강의 오염을 비롯한 생태적으로 부정적 이미지가 강한 지역이었으나, 수질 개선과 함께 친환경 생태하천으로 복원되었으며, 최근 국제정원박람회 개최로 시민들에게 긍정적 생태 이슈가 긍정적인 평가를 받은 결과로 해석된다. 이어서 거주지 주변에서 가장 필요하다고 생각하는 생태계서비스, 자연환경 방문 빈도와 도보 접근성 문항, 지지서비스에 속하는 기후에너지환경부 정책에 대한 만족도 등의 내용이 포함되었다.

2) 보도자료 배포 결과

2025년 10월 14일 자로 배포된 '생태계서비스 국민 인식 및 만족도 설문조사' 결과는 중앙일보와 SBS 뉴스를 비롯한 중앙지와 각 지역신문에 40건 이상이 보도되었다. 특히 자연환경 만족도 1위를 한 울산 지역에서는 비슷한 내용의 후속 보도도 이어졌다. 그밖에 만족도 상위권으로 노출된 시도의 지역 매체들도 조사 결과에 관심을 보였다.



〈그림 Ⅲ-2-8〉 설문조사 보도자료 기사 노출 현황

다. 찾아가는 생태 진로 체험 교육, 생생진로톡

2023년부터 국립생태원이 위치한 충청남도 지역에서 지역적·환경적 요인에 의해 진로 교육 및 체험 등에서 소외된 관내 학교를 대상으로 충청남도 교육청과 국립생태원 생태교육부의 협력으로 ‘찾아가는 생태 진로 체험 교육’을 실시하였다. 2025년에도 각급 학교의 신청을 받아 관내 4개 초등학교를 방문하여 생태계서비스에 대한 개념 소개와 생태학자로서의 진로, 우리 학교의 생태계서비스 알아보기를 주제로 생생진로톡을 진행하였다.

기존에 생성한 대상자별 맞춤형 강의 자료를 조금 더 개선하여 학생들이 이해하기 쉽게 하였다. 강의는 2개의 차시로 나눠서 진행했는데, 첫 번째 차시에서는 먼저 생태계와 서비스에 대한 개념적 이해로부터 생태계서비스에 대한 소개, 우리나라의 생태계 유형, 그리고 각 생태계 유형으로부터 제공받는 생태계서비스의 예시를 보여줌으로써 그에 대한 이해를 쉽게 하였다. 또한 각 학교가 위치한 지역의 ‘익숙한’ 경관을 예시로 들며 학습자들이 흥미를 느낄 수 있도록 강의 자료를 구성했다. 다음으로는 강사의 경험에 기반한 강의와 사진 자료로 생태 분야로 진로를 잡으면 할 수 있는 일들을 소개하였다. 두 번째 차시에서는 학교 내 자연환경의 구체적 대상을 설정하여 자연자원의 가치와 혜택을 찾는 활동으로 구성하였다. 우리 학교 안에 있는 자연자원을 선택하여 어떤 혜택이 존재하는지 활동지를 작성하고 이를 소개하는 안내문을 만들었다. 또한 지난 2020년 국립생태원에서 진행한 ‘제7회 도전! 생생탐’ 내용을 바탕으로 생태계서비스 기능(공급, 조절, 문화, 지지)에 따라 다양한 가치 탐구 방법이 있음을 소개했다.



〈그림 III-2-9〉 생태계서비스 개념과 진로 방향, 우리 학교의 생태계서비스 알아보기(2025 생생진로톡)

두 번째 차시의 '학교 주변 자원을 알아보고 소개하기'는 조별 활동으로 진행됐는데, 각자 본인이 생각하는 학교 주변 생태계의 혜택을 작성하도록 하고 팀원끼리 의견을 모아서 하나의 조별 소개장(우리 학교 자연환경 자랑하기)을 작성하도록 했다. 작성 후에는 조별 발표 시간을 가지면서 다른 친구들이 어떻게 생각하는지 들어보도록 했다.



〈그림 Ⅲ-2-10〉 우리 학교 생태계서비스 소개하기 조별 실습(2025 생생진로톡-초등)

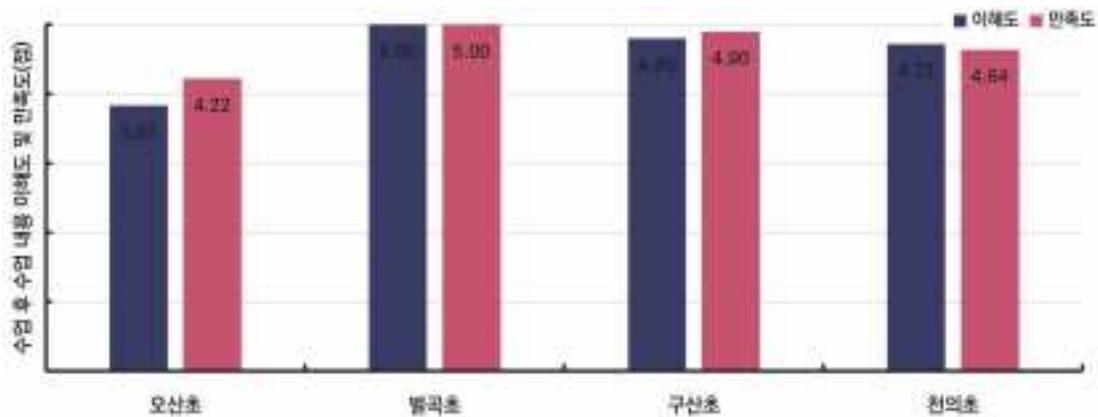


〈그림 Ⅲ-2-11〉 조별활동 결과 발표(2025 생생진로톡)

〈표 Ⅲ-2-2〉 2025년 생생진로특 참여 학교

학교	서산 오산초	논산 벌곡초	공주 구산초	당진 천의초
날짜	2025.4.11.	2025.6.09.	2025.8.26.	2025.9.16.
인원	18명	14명	10명	25명
학년	5, 6학년	5, 6학년	5, 6학년	4, 5, 6학년

이번 2025년 생생진로특 강의 후 설문조사 결과 참여한 학생들의 만족도는 4.64점(5점 만점), 이해도는 4.55점(5점 만점)으로 나타났다. 학생들은 ‘모둠 활동이 너무 재미있었고, 몰랐던 ‘생태계서비스’에 대해 알 수 있어 좋았다.’, ‘환경에 대해 알아보았고, 설명을 잘해주셔서 이해하기 쉬웠다.’, ‘생태계에 대해 모르던 것을 알게 되어 좋았다.’, ‘학교 소개자료를 만들고 발표한 것이 좋았다.’, ‘여러 가지 자연 서비스에 대해 알 수 있어 좋았다.’, ‘생태계에 관심이 생겼다.’ 등의 긍정적인 의견을 남겼다. 반면, ‘마지막 놀이 못 한 것이 아쉬웠다.’, ‘시간이 너무 적었다.’ 등과 같이 제한된 수업 시간으로 모두 수행하지 못한 수업 내용에 대한 아쉬운 의견도 있었다. 학교별 담당 교사들도 긍정적 의견을 제시해 주어 학생들의 수준에 맞춘 강의 내용과 조별 활동이 적절했음을 알 수 있었다.



〈그림 Ⅲ-2-12〉 생생진로특 이해도 및 만족도 설문조사 결과(학생)

3. 생태계서비스지불제계약 효과성 시범평가

가. 지불제 추진 현황 및 공간DB 구축

1) 지불제 연도별 추진 개황

생태계서비스지불제가 생물다양성관리계약에서 개편되어 첫 시행 된 2021년부터 2025년까지의 연차별 국고보조금, 참여 지자체, 사업 수를 <표 Ⅲ-3-1>에 나타내었다. 국고보조금 총액은 지속적으로 증가하여 2021년 16.9억 원에서 2024년 40.4억 원으로 총 23.5억 원이 증가하였으나 2025년은 예산이 동결되었다. 2023년에 국고 보조율이 기존 30%에서 50%로 상향되어 보조금 액수가 많이 증가하였으며 필요에 따라 지자체에서 추가 예산을 확보하고 있다. 2021년에서 2025년까지 지불제 운영 지자체 수는 27개에서 32개로 증가, 사업 수는 28개소에서 38개소로 증가하였다. 지불제 시행 후 예산이나 규모가 지속적으로 확장되었으나 최근에는 예산이 동결되면서 사업 확장에 어려움이 예상된다.

<표 Ⅲ-3-1> 지불제 연도별 추진 개황

연도	2021	2022	2023*	2024	2025
국비	16.9억 원	23.5억 원	38.4억 원	40.4억 원	40.4억 원
지자체 수**	27개	30개	30개	31개	32개
사업 수***	28개소	31개소	32개소	34개소	38개소

* 국고보조율 상향(30%→50%)

** 지자체 수: 지방자치단체 기준(제주시, 서귀포시는 제주특별자치도 1개의 지자체로 간주함)

*** 사업 수: 기후에너지환경부의 지자체 국고보조사업 확정내시 자료상 사업명 개수

2) 지불제 연도별 예산 현황

지불제 연도별 광역 시도 별 예산 현황을 검토한 결과 총 예산(계)은 2025년 기준 전라남도가 1,710백만 원으로 전국에서 가장 높았다(표 Ⅲ-3-2). 상위권 예산 규모를 형성하고 있는 지역으로는 경상남도(1,376백만 원), 전북특별자치도(1,212백만 원), 충청남도(1,192백만 원), 강원특별자치도(1,100백만 원)가 있으며, 이들 지역은 모두 1,000백만 원 이상의 예산이 편성된 것으로 확인된다. 중위권 그룹인 경기도(756백만 원)와 제주특별자치도(406백만 원)가 그 뒤를 잇고 있으며, 경상북도(164백만 원), 부산광역시(100백만 원), 인천광역시(60백만 원)는 상대적으로 낮은 예산 규모를 나타내고 있다. 한편, 세종특별자치시는 20백만 원으로 광역 시도 중 최저 예산 규모가 책정되었으며, 서울특별시, 대구광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시, 충청북도 등은 생태계서비스 지불제 사업을 시행하지 않는 것으로 확인된다.

2024년 대비 예산 증감 현황을 살펴보면, 전북특별자치도(40백만 원), 경상남도(50백만 원), 경기도(20백만 원) 등 일부 지역에서 예산 규모가 확대됐지만, 전라남도(106백만 원)와 충청남도(54백만 원)는 전년 대비 예산이 감소한 특징을 보인다. 특히 세종특별자치시의 경우 2025년도에 20백만 원의 예산을 신규 편성하며 사업 시행 지역으로 새롭게 추가되었다.

2025년도 광역시도별 예산의 국비 및 지방비 구성 현황을 세부적으로 살펴보면 지역별 편성 특징이 관찰된다. 최대 예산 편성 지역인 전라남도에는 국비 845백만 원에 지방비 865백만 원을 매칭하여 지방비 비중이 국비보다 높게 구성되어 있으며, 충청남도 역시 총 예산 1,192백만 원 중 지방비(626백만 원)가 국비(566백만 원)를 웃돌았다. 반면 경상남도에는 국비 718백만 원, 지방비 658백만 원으로 국비 비중이 높은 것으로 확인된다. 그 외 전북특별자치도(국비·지방비 각 606백만 원), 강원특별자치도(각 550백만 원), 경기도(각 378백만 원), 제주특별자치도(각 203백만 원)를 포함하여 경상북도(각 82백만 원), 부산광역시(각 50백만 원), 인천광역시(각 30백만 원), 세종특별자치시(각 10백만 원) 등은 국비와 지방비를 동일한 액수로 편성하여 1:1 매칭 비율을 유지하였다. 대부분의 지자체는 국비 지원액에 상응하는 지방비를 매칭하는 표준적인 방식을 따르고 있었으며, 예산 상위권 지역 중 일부는 지방비 비중을 국비와 다르게 설정하여 전체 사업 규모를 탄력적으로 조정하고 있는 것으로 분석된다.

〈표 Ⅲ-3-2〉 지불제 연도별 광역시도 별 예산 현황

(단위: 백만 원)

시도	2022			2023			2024			2025		
	계	국비	지방비									
계	7,215	2,354	4,861	7,642	3,836	3,806	8,126	4,038	4,088	8,096	4,038	4,058
인천	60	18	42	60	30	30	60	30	30	60	30	30
경기	563	169	394	731	366	366	736	368	368	756	378	378
강원	1,100	330	770	1,100	550	550	1,100	550	550	1,100	550	550
충남	1,063	319	744	1,106	553	553	1,246	553	693	1,192	566	626
전북	1,177	353	824	1,172	586	586	1,172	586	586	1,212	606	606
전남	1,764	529	1,235	1,907	898	1,009	1,816	898	918	1,710	845	865
제주	7	2	5	6	3	3	406	203	203	406	203	203
경북	165	109	56	144	72	72	164	82	82	164	82	82
경남	1,217	475	742	1,316	728	588	1,326	718	608	1,376	718	658
부산	100	50	50	100	50	50	100	50	50	100	50	50
세종	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	10	10

지자체별 지방비 추가 편성 예산 현황 〈표 Ⅲ-3-3〉에 따르면, 일부 기초지자체에서는 사업의 실효성 제고를 위해 국비 매칭분 외에 자체 예산을 추가로 편성하였다. 2024년도 사업 시행 지자체 중 충남 서천군(140백만 원), 경남 창원시(60백만 원), 전남 신안군(20백만 원)이 지방비를 추가 편성하였으며, 이는 해당 지역 내 생태계서비스지불제에 대한 실질적인 사업 수요가 반영된 결과로 분석된다. 2025년도에도 이러한 추가 편성 경향은 지속되고 있으며, 대상 지자체는 충남 당진시(60백만 원), 경남 창원시(60백만 원), 경남 창녕군(50백만 원), 전남 신안군(20백만 원)으로 파악된다. 특히 창원시와 신안군의 경우 2년 연속 자체 재원을 추가 확보하고 있으며, 당진시와 창녕군이 새롭게 지방비 추가 편성 지자체로 확인됨에 따라 현장의 사업 수요와 시급성이 지속적으로 존재하는 것으로 판단된다.

이와 같은 지자체의 자체 자원 확보 노력은 사업의 안정적 추진을 뒷받침할 뿐 아니라 생태계 보전을 위한 지불제 사업 수요를 확인할 수 있는 지표로 활용될 수 있다. 따라서 향후 예산 배분 시, 지역별 실수요와 연계된

자체 재원 분담 현황 등을 종합적으로 고려하여 효율적인 국비 지원 검토가 이루어질 필요가 있는 것으로 분석된다.

〈표 Ⅲ-3-3〉 지자체별 지방비 추가 편성 예산

(단위: 백만 원)

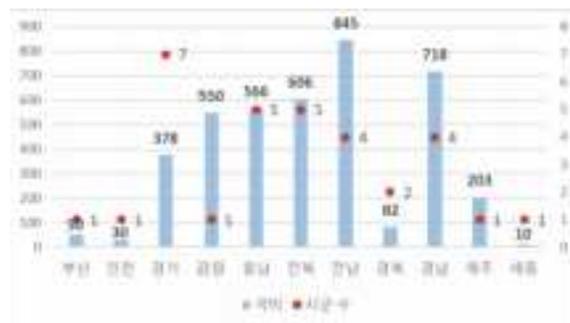
광역시도	시군	2024	2025
충남	서천군	140	-
	당진시	-	60
전남	신안군	20	20
경남	창원시	60	60
	창녕군	-	50
총합		220	190

연도별 국비 및 지방비 편성 현황을 분석한 결과, 본 사업의 예산 규모는 2022년 7,215백만 원에서 2024년 8,126백만 원으로 증가한 뒤 2025년에는 8,096백만 원이 책정되어 안정화 단계에 진입한 것으로 나타난다(그림 Ⅲ-3-1a). 재원별 구성의 경우, 2023년 국고보조율이 기존 30%에서 50%로 상향 조정됨에 따라 국비 지원 규모가 2022년 2,354백만 원에서 2024년 이후 4,038백만 원 수준으로 약 71.5% 대폭 확대되었다. 이에 따라 사업 초기 지방비 비중이 높았던(4,861백만 원) 예산 구조가 2025년 기준 국비와 지방비가 약 1:1의 균형을 이루는 매칭 구조로 전환되었으며, 이는 국고보조를 인상을 기점으로 재원 분담의 안정성이 확보되어 해당 사업이 제도적 안착기에 들어섰음을 시사한다.

2025년도 광역시도 별 생태계서비스지불제 국비 현황 및 시군 수(그림 Ⅲ-3-1b)를 분석한 결과, 지역별 보전 대상지의 규모와 참여 지자체 수에 따라 지원액의 편차가 뚜렷하게 나타나고 있다. 전라남도가 845백만 원으로 전국에서 가장 높은 국비 예산을 확보하였으며, 이어 경상남도(718백만 원), 전북특별자치도(606백만 원), 충청남도(566백만 원), 강원특별자치도(550백만 원) 순으로 국비 지원이 집중되는 경향을 보인다. 참여 시군 수 측면에서는 경기도가 7개 시군으로 가장 높은 참여도를 보이고 있으나, 시군당 평균 국비 배정액은 상대적으로 낮은 수준을 유지하고 있다. 반대로 시군당 평균 국비 배정액이 가장 높은 광역시도는 강원특별자치도로 가장 많은 계약자 수와 넓은 사업 면적의 영향이 있는 것으로 분석된다.



a. 연도별 사업비 총액
(Y축 단위: 백만 원)



b. 광역시도별 국비 현황 및 시군 수('25)
(Y축 단위: 백만 원(좌), 개(우))

〈그림 Ⅲ-3-1〉 지불제 사업비 총액 및 광역시도별 현황

3) 지불제 사업 유형 현황

2024년도 내륙 광역시도 별로 생태계서비스지불제 사업 유형 현황을 분석하였다(표 Ⅲ-3-4). 사업유형은 벚짚존치, 벼 등 미수확, 보리·울무 등 재배, 습터조성, 경관숲 조성·관리, 어업중지 보상, 멸종위기종 서식지 조성·관리, 철새먹이 공급으로 총 8종류이다. 참여 지자체 총 30개에 대해 사업유형별로 지자체 수를 중복으로 집계한 결과 총 44개 사업이 운영 중이었다. 벚짚존치(21개소)가 전체 사업의 약 50%를 차지하였고, 인천(강화), 경기(고양, 파주, 김포, 화성, 연천, 여주), 강원(철원), 충남(서산, 당진, 서천, 홍성, 예산), 전북(군산, 고창), 전남(순천, 해남), 경남(창녕, 창원, 김해, 고성) 등 전국적으로 가장 광범위하게 시행되고 있었다. 보리·울무 등 재배(11개소)는 경기(연천), 전북(군산, 익산, 김제, 부안), 전남(해남, 진도), 경북(구미), 경남(창녕, 창원, 김해), 벼 등 미수확(5개소)은 경기(안산, 고양), 전남(순천, 신안), 경남(김해)에서 추진되었다. 습터조성(3개소)은 충남(서산, 서천), 경남(김해), 경관숲 조성·관리(1개소)는 경북(문경), 어업중지 보상(1개소)과 멸종위기종 서식지 조성·관리(1개소)는 경남(창녕), 철새 먹이 공급(1개소)은 부산광역시에서 시행되었다.

내륙 지불제 사업 유형 수는 경상도가 7개로 가장 다양하였는데, 이는 창녕군의 따오기 보전을 위한 멸종위기종 서식지 조성 및 관리와 우포늪 생태 보전을 위한 휴경(어업중지 보상), 문경시의 경관숲 조성·관리 사업 유형 때문이었다. 그 외 지자체는 주로 벚짚존치, 벼 등 미수확, 보리·울무 등 재배, 습터조성 등 철새 보호 목적의 지불제 사업 유형을 추진하였다. 생물다양성관리계약제도가 생태계서비스지불제계약으로 개편되어 다양한 사업 유형의 추진이 가능해졌으나, 현실적인 제약으로 인해 사업 유형 확대는 미미한 상황이다. 특히 검증된 신규 사업 모델의 부족은 지자체 담당자의 사업 계획 수립에 부담으로 작용하고 있으며, 국비의 동결 또는 삭감은 기존 사업의 축소로 이어지는 등 재정적 가용성도 한계가 있다. 지불제 확대를 위해서는 이러한 행정적·재정적 불확실성의 해소가 필요하다.

〈표 Ⅲ-3-4〉 내륙 광역시도별 지불제 사업유형 현황('24년)

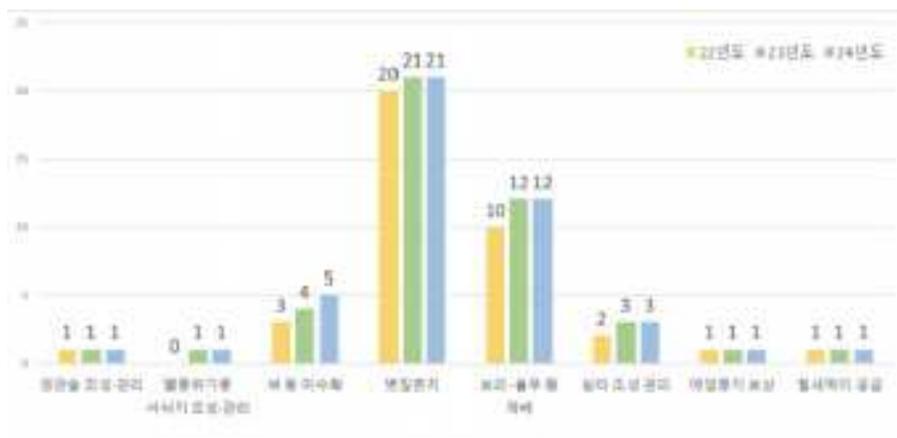
광역시도 (시군 수)	시군	사업유형	사업유 형수
인천(1)	강화군	벚짚존치(강화)	1
경기(7)	안산시, 고양시, 파주시, 김포시, 화성시, 연천군, 여주시	벼 등 미수확(안산, 고양), 벚짚존치(고양, 파주, 김포, 화성, 연천, 여주), 보리·울무 등 재배(연천)	3
강원(1)	철원군	벚짚존치(철원)	1
충남(5)	서산시, 당진시, 서천군, 홍성군, 예산군	벚짚존치(서산, 당진, 서천, 홍성, 예산), 습터조성(서산, 서천)	2
전북(5)	군산시, 익산시, 김제시, 고창군, 부안군	벚짚존치(군산, 고창), 보리·울무 등 재배(군산, 익산, 김제, 부안)	2
전남(4)	순천시, 해남군, 진도군, 신안군	벼 등 미수확(순천, 신안), 벚짚존치(순천, 해남), 보리·울무 등 재배(해남, 진도)	3
경북(2)	구미시, 문경시	보리·울무 등 재배(구미), 경관숲 조성·관리(문경)	2
경남(4)	창녕군, 창원시, 김해시, 고성군	벚짚존치(창녕, 창원, 김해, 고성), 보리·울무 등 재배(창녕, 창원, 김해), 어업중지 보상(창녕), 벼 등 미수확(김해), 멸종위기종 서식지 조성·관리(창녕), 습터조성(김해)	6
부산(1)	부산광역시	철새먹이 공급(부산)	1

2023년도 대비 2024년도 사업 시행 현황을 비교 분석한 결과, 지역별 사업 유형의 조정과 참여 지자체의 변화가 확인되었다(표 Ⅲ-3-5). 주요 변동 사항으로 2023년도에 시행되었던 김포시의 습터조성, 부안군의 벗짚존치 사업은 2024년 추진 대상에서 제외됐지만, 김해시는 기존 벗짚존치에 더해 벼 등 미수확 및 습터조성 사업이 추가되었다. 특히 2024년에는 경상남도 고성군이 새로 참여하여 벗짚존치 사업을 추진하였고, 그에 따라 전체 사업 시행 지자체 수가 전년도 30개에서 31개로 증가하였다.

〈표 Ⅲ-3-5〉 연도별 사업유형별 내륙 지자체 참여 현황('23~'24년)

사업유형	2023년	2024년
벗짚존치	강화, 고양, 파주, 김포, 화성, 연천, 여주, 철원, 서산, 당진, 서천, 홍성, 예산, 군산, 고창, 부안 , 순천, 해남, 창녕, 창원, 김해	강화, 고양, 파주, 김포, 화성, 연천, 여주, 철원, 서산, 당진, 서천, 홍성, 예산, 군산, 고창, 순천, 해남, 창녕, 창원, 김해, 고성
벼 등 미수확	안산, 고양, 순천, 신안	안산, 고양, 순천, 신안, 김해
보리·울무 등 재배	연천, 군산, 익산, 김제, 부안, 해남, 진도, 구미, 창녕, 창원, 김해	연천, 군산, 익산, 김제, 부안, 해남, 진도, 구미, 창녕, 창원, 김해
습터조성	김포 , 서산, 서천	서산, 서천, 김해
경관숲 조성·관리	문경	문경
어업중지 보상	창녕	창녕
멸종위기종 서식지 조성·관리	창녕	창녕
철새먹이 공급	부산	부산

최근 3년간 내륙 지자체의 생태계서비스지불제 사업유형별 참여 현황을 분석한 결과, 가장 눈에 띄는 성과는 '벼 등 미수확' 사업으로 2022년 3개소에서 2023년 4개소, 2024년 5개소로 매년 꾸준히 증가하였다(그림 Ⅲ-3-2). 가장 큰 비중을 차지하는 '벗짚존치' 사업은 2022년 20개소에서 2023년 21개소로 증가한 수치가 유지되었고, 다음으로 높은 비중을 차지하는 '보리·울무 등 재배' 사업도 2022년 10개소에서 2023년 12개소로 증가된 수치가 유지되었다. 2022년 추진 실적이 없었던 '멸종위기종 서식지 조성·관리' 사업이 2023년도부터 도입되어 지속 운영되고 있는 점은, 지불제 사업이 단순 철새 먹이 공급 활동을 넘어 전문적인 생태계 보전 영역으로 확장하고 있음을 보여준다.



〈그림 Ⅲ-3-2〉 내륙 지불제 사업유형별 지자체 수 현황('22~'24년도)

기후에너지환경부의 '생태계서비스지불제계약 사업시행 가이드라인(2024.4.16.)'과 '제주특별자치도 생태계서비스 지불제계약 사업시행 가이드라인(2024.1.)' 상의 활동 유형(안) 비교 결과는 <표 III-3-6>과 같다. 기후에너지환경부는 2021년 1월 가이드라인 최초 배포 이후, 2022년 12월(1차)과 2024년 4월(2차) 두 차례 개정을 통해 제도를 보완해 왔다. 제주도는 2023년 제주형 지불제 시행을 위한 자치 조례를 제정하고, 2024년 1월 자체 가이드라인을 수립하여 배포하였다. 양 기관의 활동 유형은 기후에너지환경부 22가지, 제주도 23가지로 구성되어 있으며 전반적으로 유사한 체계를 유지하고 있다. 다만, 일부 사업명이 상이하거나 동일 사업이 서로 다른 생태계서비스 유형으로 분류되는 등의 차이가 존재한다. 예를 들어 기후에너지환경부의 문화서비스로 분류되는 '생태계 보전 관리 활동'이 제주도에서는 지지서비스의 '생물다양성 보전·관리'로 분류되어 있으며, '벼 등 미수확' 항목이 제주도에서는 '작물(밀, 보리, 귀리 등) 미수확'으로 구체화되었다. 또한, 제주도는 '생태탐방 및 해설'과 같은 신규 활동 유형을 추가하였다. 향후 가이드라인의 개선이나 전국 단위의 사업 실적을 통합 분석할 때는 내륙과 제주도 사업 유형 간의 정합성을 고려할 필요가 있다.

<표 III-3-6> 기관별(기후에너지환경부·제주) 생태계서비스지불제 활동 유형(안) 비교

구분	기후에너지환경부(22가지)	제주도(23가지)
조절서비스	기후변화대응숲 조성·관리	기후변화대응숲 조성·관리
	하천 환경 정화	하천 환경 정화
	수변식생대 조성·관리	수변식생대 조성·관리
	저류지 조성·관리	저류지 조성·관리
	나대지 녹화·관리	나대지 녹화·관리
문화서비스	경관숲 조성·관리	경관숲 조성·관리
	생태탐방로 조성·관리	생태탐방로 조성·관리
	자연경관 전망대 조성·관리	자연경관 전망대 조성·관리
	생태계 보전 관리 활동	-
	-	생태탐방 및 해설
지지서비스	휴경	휴경
	친환경 작물 경작	친환경 작물 경작
	벼 등 미수확	작물(밀, 보리, 귀리 등) 미수확
	شط터 조성 관리	شط터 조성·관리
	벗짚존치	벗짚존치
	보리·울무 등 재배	작물(밀, 보리, 귀리 등) 재배
	숲(지역 자생수종) 조성·관리	숲 조성·관리
	습지 조성·관리	습지 조성·관리
	생태 웅덩이 조성·관리	생태 웅덩이 조성·관리
	관목 덩굴 조성·관리	관목 덩굴 조성·관리
	초지 조성·관리	초지 조성·관리
	생태계교란종 제거	생태계교란종 제거
	멸종위기종 서식지 조성·관리	멸종위기종 서식지 조성·관리
	-	생물다양성 보전·관리

2024년 제주특별자치도의 지불제 사업추진 현황은 <표 Ⅲ-3-7>과 같다. 총 20개소(제주시 5개소, 서귀포시 15개소)에서 시행된 생태계서비스지불제 활동 유형을 분석한 결과, 지역적 생태 특성에 맞춘 총 11개의 사업이 추진되고 있었다. 전체 마을 중 약 75%인 15개소에서 '생태탐방로 조성·관리' 사업 유형이 시행되었고, 경관숲 조성·관리(6개소)와 습지 조성·관리(4개소)가 그 뒤를 이었다. 특히 제주시 덕천리의 '멸종위기종 서식지 조성', 서귀포시 호근동의 '생태웅덩이 조성', 서귀포시 의귀리의 '수변식생대 조성·관리', 그리고 하논분화구의 '벗짚존치'와 같이 특정 지역에 특화된 사업이 발굴·운영되어, 제주형 지불제가 마을별 생태 자원의 고유성을 반영하며 다각화되고 있음을 확인하였다.

<표 Ⅲ-3-7> 2024년도 제주특별자치도 마을별 생태계서비스지불제 활동 유형 현황

마을	사업유형	경관숲 조성·관리	멸종 위기종 서식지 조성·관리	벗짚존치	생물 다양성 보전·관리	생태 웅덩이 조성·관리	생태계 교란종 제거	생태 탐방 및 해설	생태 탐방로 조성·관리	수변 식생대 조성·관리	습지 조성·관리	하천 환경 정화
		(6)	(1)	(1)	(3)	(1)	(2)	(4)	(15)	(1)	(4)	(2)
제주시 (5)	덕천리		○						○		○	
	행원리	○										
	송당리								○			
	저지리				○			○	○			
	산양리	○							○			
서귀포시 (15)	수산2리										○	
	오조리	○						○	○			
	하례1리				○				○			
	하례2리	○						○	○			
	수망리								○			
	신평리								○		○	
	의귀리									○		○
	서광동리								○			
	도순동								○			○
	신평리							○	○			
	화순리						○		○			
	호근동	○				○			○			
	일과1리				○						○	
	덕수리	○					○					
	하논분화구			○								

2024년 기준 전국(내륙 및 제주) 생태계서비스지불제 세부 사업 유형별 추진 건수는 총 84건(내륙은 지자체수 기준 44건, 제주는 마을 수 기준 40건)으로 집계되었다. 활동 유형별 비율은 '벗짚존치'가 약 26% (22건)를 차지하며 가장 높았고, '생태탐방로 조성·관리'가 18%(15건), '보리·울무 등 재배'가 13%(11건) 그리고 '경관숲 조성·관리'가 8%(7건)를 기록하며 상위 4개 유형이 전체 지불제 활동의 60% 이상을 차지하였다(그림 Ⅲ-3-3). 내륙 지자체는 벗짚존치와 작물 재배 등 농경지 기반 보전 활동에 집중됐지만, 제주 지역은 생태탐방로나 습지 관리 등 지역 고유의 생태 자원을 활용한 여러 사업 유형이 추진되었다.



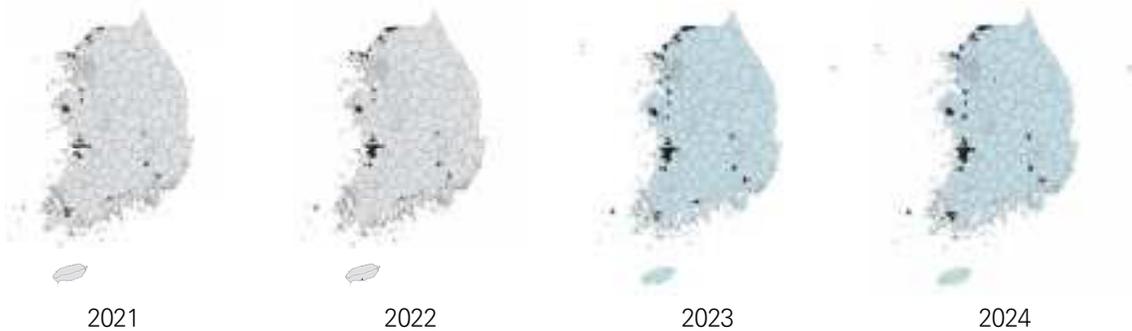
〈그림 Ⅲ-3-3〉 2024년 전국 생태계서비스지불제 세부 사업 유형별 비율 현황

4) 지불제 공간DB 구축 현황

연도별 지불제 계약 추진 현황을 계약 연도, 지번, 지목, 면적, 금액, 단가, 활동유형 등의 정보를 담은 공간정보로 구축하였다(표 Ⅲ-3-8, 그림 Ⅲ-3-4). 지불제 공간정보 DB는 2024년에 공간자료 작성 방식을 표준화하고, 메타데이터를 제작하였으며, 이를 기반으로 2017부터 2023년까지의 계약 현황이 DB로 제작되었다. 2025년에는 각 지자체로부터 2024년 계약 추진 결과 정보를 수집하였고, 이를 기존 공간정보 DB 양식에 맞게 추가 제작하였다. 2024년 사업 DB로 구축된 계약 필지는 총 29,644개이다. 연도별 공간 DB는 지자체로부터 제공받은 계약 필지 정보와 토지 지번 공간자료 간의 불일치로 인해 미구축된 필지가 존재한다. 2021년 대비 2022년에는 DB 구축이 불가능한 필지의 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 신규 사업 필지가 대규모로 추가되면서 지번 오류도 그만큼 증가한데 따른 결과로 판단된다. 이후 2023년과 2024년에는 이러한 문제점을 보완하여 DB 오류율이 감소하였다. 공간DB 구축에 사용된 계약 현황 자료는 전국 다수의 사업 시행 지자체가 일정한 양식에 작성한 결과물이지만 정확성과 일관성에 한계가 존재한다. 이에 따라 향후에는 지불제 DB 구축 절차와 기준을 보다 체계적으로 개선하여, 공간정보의 신뢰성과 활용도를 제고할 계획이다.

〈표 Ⅲ-3-8〉 지불제 사업 속성정보 DB(계약 필지) 구축 현황

연도	2021	2022	2023	2024
DB구축 대상 필지	21,577	34,550	31,941	30,325
DB구축 불가 필지	142	2,255	675	661
공간 DB구축 필지	21,435	32,295	31,266	29,664



〈그림 Ⅲ-3-4〉 연도별 지불제 계약 필지 분포 현황

나. 지불제 모니터링 추진 현황

1) 지불제 모니터링 목적 및 방법

생태계서비스지불제계약의 모니터링은 사업대상지의 생태계서비스 및 생물다양성의 변화를 지속적으로 관찰하여 기록함으로써 효과적인 사업 평가를 위한 기초자료 제공을 목적으로 한다. 모니터링은 사업시행기관인 지자체가 수행해야 하며, 사업의 유형과 지역 특성을 고려하여 목표로 하는 생태계서비스 및 생물다양성의 변화를 관찰·확인할 수 있도록 모니터링 시기 및 방법을 정하고 필요한 예산을 확보해야 한다. 모니터링은 외부 전문기관에 의뢰하여 시행하거나 관련 생태·환경 조사의 결과를 활용할 수 있다. 모니터링 결과는 매년 사업종료 후 결과보고 시 기후에너지환경부에 제출하여야 한다(‘24.4. 생태계서비스지불제계약 사업시행 가이드라인).

2) 지불제 사업별 모니터링 현황(’23, ’24년)

지불제 사업의 모니터링에 관한 규정은 사업시행 가이드라인이 ’22년 12월 개정되면서 포함되었다. ’23년과 ’24년의 사업별 결과보고 문서를 검토한 결과 모니터링을 한 사업이 두 해 모두 절반에 못 미치는 것으로 확인되었다(표 Ⅲ-3-9). 모니터링이 규정된 가이드라인의 개정 시기를 고려하면 ’23년에 시행된 사업은 모니터링 예산을 사업비에 반영하기 어려웠을 것으로 보이지만 ’24년 사업부터는 사업계획 수립 시 모니터링 계획과 관련 비용을 포함해야 한다. ’24년 사업 결과에서 모니터링 미이행 사업이 전체 34개 중 20개로 확인되어 모니터링 이행에 개선이 필요하였다. 모니터링은 제도의 효과성을 파악할 수 있는 중요한 기초 자료로서 가이드라인에 따르면 5년 주기로 사업 효과 확인을 위해 평가를 할 수 있도록 규정하였으나 현재 상황으로는 5년 치 모니터링 결과를 누적한 사업이 드물 것으로 추정된다. 이는 모니터링 주체인 지자체 담당자의 인식 부족이 문제로 판단되는데, 결과 보고에서 모니터링 결과가 빠졌거나, 사업의 이행점검 결과를 모니터링 결과로 제시한 사업이 다수 확인된다. 따라서 담당자의 인식증진과 정확한 모니터링 방법의 안내가 필요하며, 사업계획서 검토 단계에서 모니터링 계획을 필수적으로 포함하도록 검토를 강화해야 한다.

〈표 Ⅲ-3-9〉 지불제 사업 모니터링 이행·미이행 사업 수

연도	2023	2024
이행	10	14
미이행	22	20
계	32	34

3) 고양시 지불제 모니터링 사례 검토

경기도 고양특례시의 지불제 사업 모니터링 사례는 지불제 모니터링의 참고 사례로 적합하여 주요 내용을 요약하였다(고양특례시 2025, 2024년 생태계서비스지불제 생태계 모니터링(장항·산남습지) 결과보고서).

가) 모니터링 개요

고양시 장항습지의 생태계서비스지불제계약인 ‘벼 등 미수확’ 사업은 ‘벼수확 및 보관’ 방식으로 계약되었으며, ‘벗짚 존치’ 사업은 벼수확 후 세절하여 존치하는 방식으로 계약되었다(표 Ⅲ-3-10). ‘조류 쉼터’는 무논을 조성하여 조류 잠자리를 제공하고, 보조 섭식지로 활용될 수 있게 조성하였다. 먹이 공급은 농업용 드론(고양시농업기술센터 임대)을 주로 활용하였으며 드론 조정사들의 자원봉사로 실행되었다. 지불제로 확보된 볍씨는 20,091 kg이었으며, 추가적으로 반입된 먹이(울무, 콩류, 어류 등)의 양을 포함하면 총 먹이량은 23,772 kg이었다. 먹이 공급은 주 2회(월 6.5회), 1회 평균 914.3kg이 3, 4, 5번 논에 26회 공급되었고, 조류 쉼터는 외부 지원을 통해 1번 논에 무논으로 조성되었다(그림 Ⅲ-3-5).

〈표 Ⅲ-3-10〉 고양시 지불제 사업 모니터링 개요

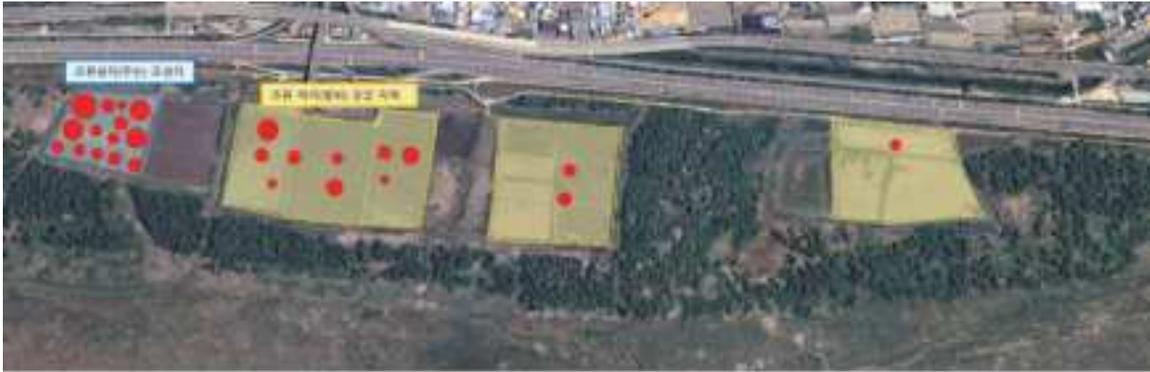
구분	내용
기간	2024년 12월 ~ 2025년 3월(4개월)
장소	장항습지, 산남습지(고양시) 구간
방법	<ul style="list-style-type: none"> • 동일 위치·시간대 모니터링을 실시하여 생물종 및 개체수 조사 • 모니터링 기간 중 장항습지 16회, 산남습지 4회 조사 실시 • 지불제로 먹이주기(주 2회, 1회 평균 914.3kg) 시행된 익일 모니터링 • 잠자리 모니터링: 일출 전 30분부터 일출 후 1시간 기준 실시 • 먹이터 모니터링: 오전 8시부터 12시 기준 실시



〈그림 Ⅲ-3-5〉 고양시 장항습지 경작지의 벗짚존치 등 사업 분포

나) 모니터링 결과

먹이터 이용 종은 재두루미, 큰기러기, 쇠기러기 3종이었고, 쉼터 이용 종은 재두루미, 큰기러기, 쇠기러기, 노랑부리저어새 4종이었다. 재두루미는 벗짚 존치만 된 논보다 볏씨를 공급한 논에 집중적으로 분포하여 조류 먹이 공급의 유효성이 있었음을 확인하였다(그림 Ⅲ-3-6). 월동기 중 12월과 1월의 재두루미 최대 관찰 개체수는 먹이 주기를 했던 2022년 이전 월동기 개체수와 유사하게 회복되었다. 특히 1월 개체수는 먹이 공급을 중단했다가 개시한 전년도에 비해 1.5배 증가하였고 12월 개체수도 3.7배 증가하여 생태계서비스지불 제계약의 효과를 확인하였다. 다만 2월의 개체수는 회복되지 않아서 이에 대한 대책이 필요하였다(그림 Ⅲ-3-7).



〈그림 Ⅲ-3-6〉 고양시 장항습지 경작지 재두루미 월동 및 이동기 개체수

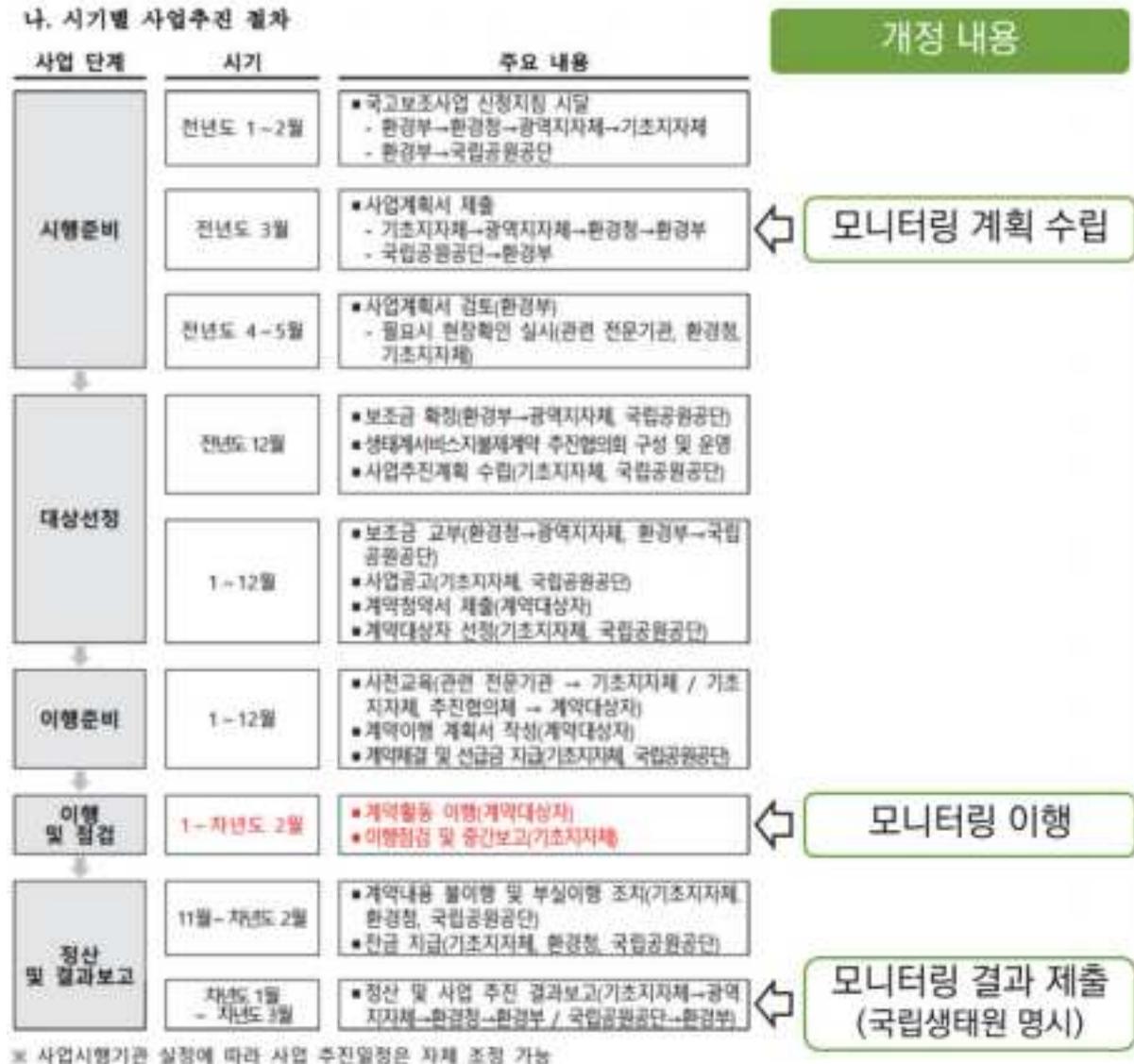


〈그림 Ⅲ-3-7〉 고양시 장항습지 경작지 겨울철 재두루미 개체수 연도별 변화

4) 모니터링 절차 강화 위한 가이드라인 수정 방안

지불제 모니터링이 빠지지 않도록 하기 위해서는 사업추진 절차에 모니터링 관련 절차를 강화할 필요가 있으며 이를 위해 가이드라인의 개정 방향을 〈그림 Ⅲ-3-8〉과 같이 제시하였다. 현재 가이드라인에는 사업

준비, 이행, 결과보고 등 사업 절차에 모니터링에 관한 내용이 제시되지 않았다. 따라서 사업준비 단계에서는 지자체 등이 사업계획서 제출 시 모니터링 계획을 필수 포함하도록 하고, 기후에너지환경부가 사업계획서 검토 시에는 모니터링 계획의 적정성을 검토하도록 사업추진 절차를 추가할 필요가 있다. 이행 및 점검 단계에서는 계약활동의 이행뿐만 아니라 모니터링 이행 현황을 점검 및 보고하도록 하고, 결과보고 단계에는 모니터링 결과를 포함한 결과보고서를 기후에너지환경부 및 국립생태원에 제출하도록 명시할 필요가 있다.



〈그림 III-3-8〉 모니터링 절차 강화를 위한 지불제 가이드라인 수정 방안(생태계서비스지불제 사업시행 가이드라인(2024))

다. 지불제 효과성 시범 평가

1) 동시센서스 활용 평가

가) 지불제 사업지역의 동시센서스 조사지점 현황

국립환경과학원에서는 전국의 주요 겨울철새 도래지의 조류 모니터링을 1999년부터 매년 실시하고 있다 (그림 Ⅲ-3-9). 지불제 사업은 논경작지에 도래하는 겨울철새의 먹이 제공 사업이 대부분을 차지하며, 지불제 사업의 효과 확인을 위한 모니터링 자료로서 이러한 동시센서스 자료를 활용할 수 있다. 동시센서스 모니터링 경계와 지불제 사업지역을 중첩해본 결과 총 25개 지자체 사업 지역이 동시센서스 조사지점과 일치하거나 유사하게 위치하여 동시센서스 조사결과를 모니터링 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단되었다(표 Ⅲ-3-11). 다만, 동시센서스는 겨울철새의 도래 현황 파악을 목적으로 하므로 지불제 사업의 효과를 정확하게 판단하기에 한계가 있으며, 조사 경계가 지불제 사업 효과 확인에 부족할 때는 별도의 정밀한 모니터링 설계 및 실시가 필요하다.

〈표 Ⅲ-3-11〉 지불제 사업지역의 동시센서스 조사지점 목록



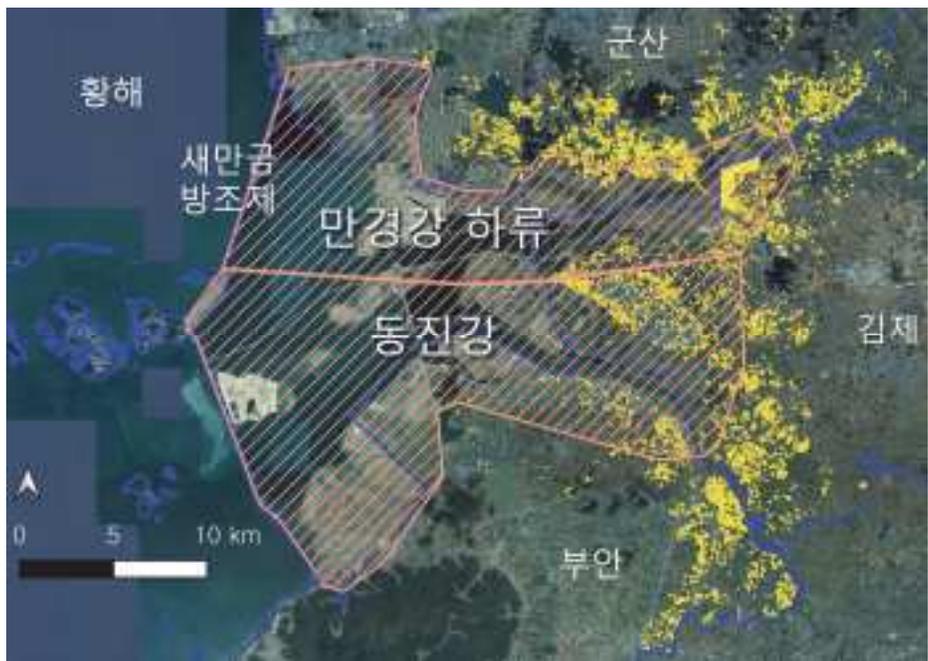
〈그림 Ⅲ-3-9〉 동시센서스 경계

광역	기초	동시센서스 조사지점
강원	철원군	철원평야
경기	고양시	한강하류
	김포시	한강하구
	연천군	연천
	파주시	임진강
	화성시	남양만, 남양호
경남	김해시	화포천
	사천시	사천만
	창녕군	낙동강(달성-남지), 목포, 사지포, 우포
	창원시	동판저수지, 산남, 주남저수지
경북	고성군	당도만, 대가저수지
	구미시	구미해평
전남	순천시	순천만
	여주시	복하천
	진도군	군내호
	해남군	고천암호, 금호호, 영암호
전북	고창군	곰소만, 동림저수지, 청호저수지
	군산시	금강호, 만경강하류, 옥구저수지, 옥녀저수지
	김제시	고마제, 능제, 동진강, 원평천
	부안군	동진강
	익산시	만경강종류
충남	당진시	삼교호
	서산시	간월호, 부남호
	서천군	금강호, 봉선저수지
	예산시	무한천, 예당저수지

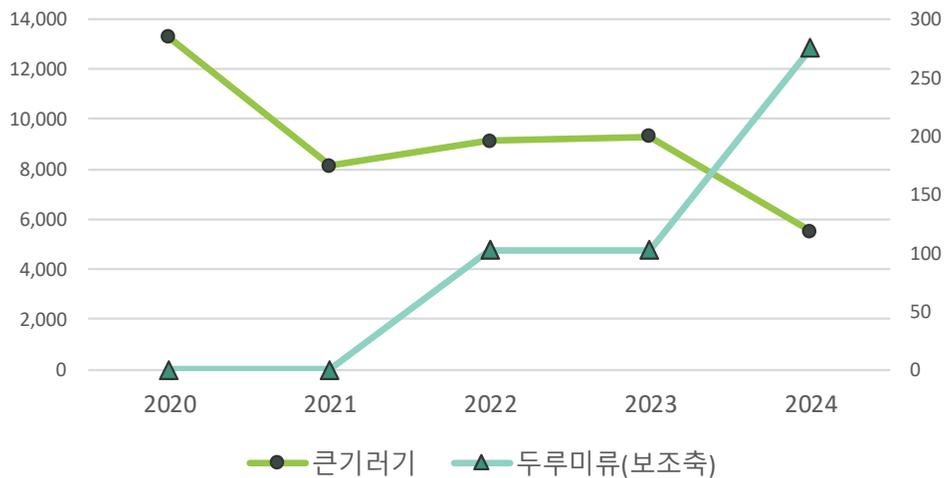
나) 새만금 지역 동시센서스 결과

지불제 사업 지자체 중 새만금 일대에 있는 전북 군산시, 김제시, 부안군을 대상으로 지불제 사업에 따른 겨울철새 먹이 제공 효과를 확인하고자 동시센서스 자료를 분석하였다. 3개 시군의 사업지 분포와 동시센서스

경계 분포는 <그림 Ⅲ-3-10>과 같다. 최근 4년간 3개 시군의 지불제 사업 계약 면적 합계를 살펴보면 ('21년) 37.7km², ('22년) 47.9km², ('23년) 38.5km², ('24년) 34.3km²로 '22년을 기점으로 감소하는 추세이다. 논경작지에 도래할 것으로 추정되는 보호종인 두루미류와 큰기러기의 최근 5년간 개체수 변화를 분석한 결과 큰기러기는 개체수의 감소 추세가 확인되었고, 두루미류는 2022년부터 출현하여 증가 추세를 나타내었다(그림 Ⅲ-3-11). 두루미류는 대부분이 흑두루미이며 이동 시기에 대규모 무리가 관찰되었고, 일부 재두루미가 출현하였다. 동시센서스 자료는 출현 지점을 정확히 확인할 수 없어 실제 두루미류나 큰기러기가 지불제 사업 지역에서 먹이 섭취를 하는지 불명확하다. 따라서 이상의 결과로 지불제 사업을 통한 철새 먹이 제공량(계약 면적)과 철새 개체수 변화의 관계성을 단정할 수는 없다. 그러나 최근 지불제 계약 면적이 감소 추세이고, 겨울철 내내 논경작지를 이용하는 큰기러기 개체수도 감소 추세이므로 관계성에 대한 정밀한 조사와 분석이 요구된다.



<그림 Ⅲ-3-10> 새만금 지역의 '24년 기준 지불제 사업지(노란색)와 동시센서스 경계(연분홍색-동진강, 만경강 하류)



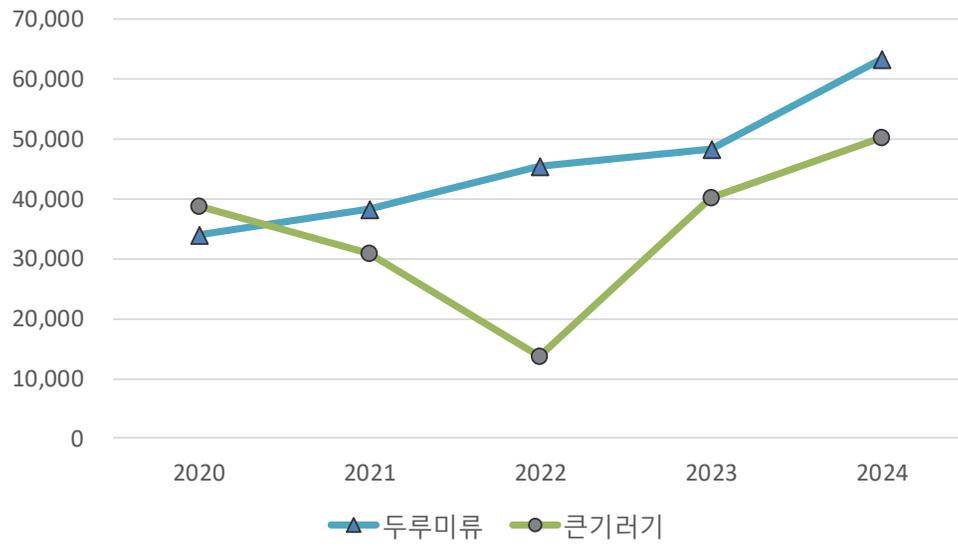
<그림 Ⅲ-3-11> 새만금 지역 주요 보호종의 연도별 출현 개체수

다) DMZ 지역 동시센서스 결과

강원 철원, 경기 연천과 파주로 이어지는 DMZ 지역 일대는 국제적으로도 중요한 두루미류 도래지로 알려져 있으며 철새 보전을 위해 오랜 기간 지불제 사업이 추진되었다. 3개 시군의 지불제 사업지 분포와 겨울철새 동시센서스 경계 분포는 <그림 Ⅲ-3-12>와 같다. 최근 4년간 3개 시군의 지불제 사업 계약 면적 합계를 살펴보면 ('21년) 6.41km², ('22년) 25.62km², ('23년) 27.11km², ('24년) 26.81km²로 '22년에 큰 폭의 증가 이후 증가율이 둔화된 추세를 보였다. 세부적인 계약 면적은 '22년부터 '24년까지 철원군은 일부 증가, 연천과 파주는 일부 감소하였다. 논경작지에 도래할 것으로 추정되는 보호종인 두루미류와 큰기러기의 최근 5년간 개체수 변화를 분석한 결과 두루미류는 지속적으로 증가하였고, 큰기러기는 5년간 증가하긴 하였으나, '22년까지는 하락하였고, 이후 상승 추세로 전환되었다(그림 Ⅲ-3-13). 두루미류는 재두루미가 대부분을 차지하였고 두루미가 그 뒤를 이어 많은 개체수가 출현하였다. 이상의 결과로 지불제의 효과를 단정할 수는 없으나, 두루미류의 지속적 증가에 지불제 계약 면적의 증가가 긍정적 영향을 끼쳤을 것으로 추정되며, 관계성에 대한 정밀한 조사와 분석이 요구된다.



<그림 Ⅲ-3-12> DMZ 지역(빨간색 경계)의 '24년 기준 지불제 사업지(노란색)와 동시센서스 경계(회색-임진강, 연천, 철원)

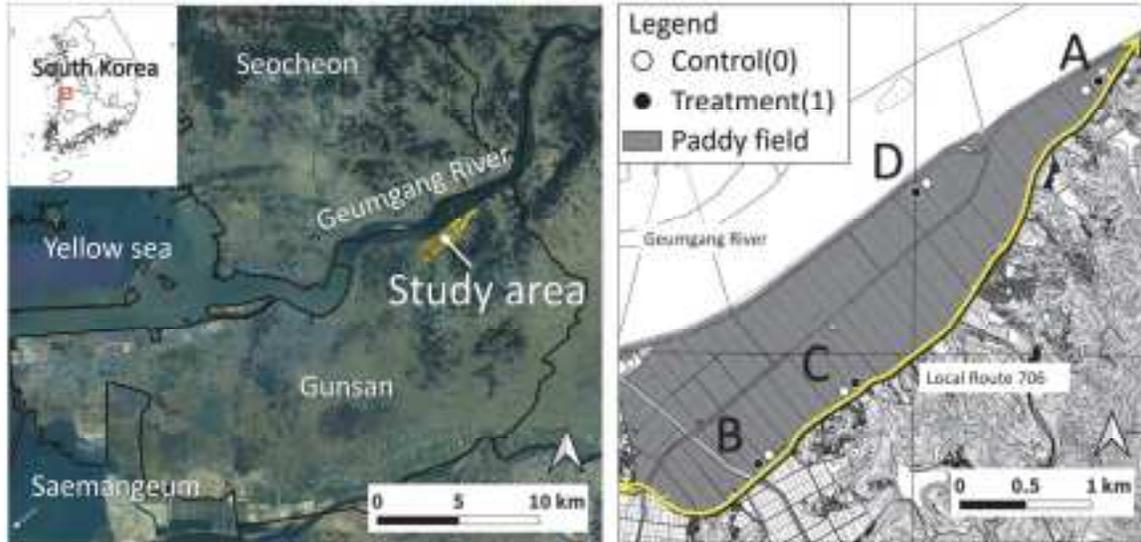


〈그림 III-3-13〉 DMZ 지역 주요 보호종의 연도별 출현 개체수

2) 군산시 벼짚존치 사업 낙곡 수 분석

가) 군산 나포면 벼짚존치 현황

연구대상지는 군산시 나포면에 있는 경지 정리된 형태의 논 경작지로 벼짚존치 사업이 매년 추진되고 있다(그림 Ⅲ-3-14). 조사 시기인 2024년에 대상 지역의 벼짚존치 계약 면적은 1,813,536㎡였다. 계약 지역 일대 전체 논 경작지 면적은 3,525,042㎡이며, 벼짚존치 면적은 전체 논 면적의 51.5%를 차지하였다.



〈그림 Ⅲ-3-14〉 군산 나포면 벼짚존치 사업지의 낙곡 수 조사 지점

나) 낙곡 수 분석방법

조사 대상은 벼짚존치 사업 논을 비사업 논과 비교 분석하기 위하여 벼짚존치된 논과 인접한 비사업 논 각 1필지씩을 1개 세트로 구성하여 총 4개 지점 8개 필지가 해당한다. 조사 지점 선정은 겨울철새의 먹이활동으로 인한 낙곡 수 감소의 영향을 최소화하기 위하여 인위적 교란 영향으로 겨울철새의 먹이활동이 드물 것으로 추정되는 인가 및 도로와 가까운 지역에서 필지 면적이 유사하고 사업·비사업 필지가 인접한 2개 필지를 선정하였다.

조사는 20cm×20cm의 방형구를 필지당 20개씩 무작위 선정하여 총 160개 방형구 낙곡 수를 파악하였다. 현장 조사는 2024년 12월 17~18일 이틀간 실시하였다. 조사 결과는 4개 지점을 A~D, 사업 필지를 1, 비사업 필지를 0으로 명명하여 네 개 쌍(A0 vs. A1, B0 vs. B1, C0 vs. C1, D0 vs. D1)을 대상으로 집단 차이를 분석하였다.

통계 분석은 각 집단의 낙곡 수 데이터에 대해 Shapiro-Wilk 검정을 사용하여 정규성을 평가하였고(Shapiro & Wilk, 1965), 분석 결과 모든 집단에서 비정규 분포가 확인됨($p < 0.05$)에 따라 Mann-Whitney U 검정을 사용하여 집단 간 차이를 분석하였다(Mann & Whitney, 1947). 집단 간 유의미한 차이가 확인된 경우, 그 차이의 실질적인 크기(Practical Significance)를 정량화하기 위해 효과 크기(Effect Size, r)를 추가로 계산하였다. 산출된 효과 크기는 Cohen (1992)의 기준에 따라 약 0.1이면 작은 효과, 약 0.3이면 중간 효과, 약 0.5이면 큰 효과로 해석하였다.

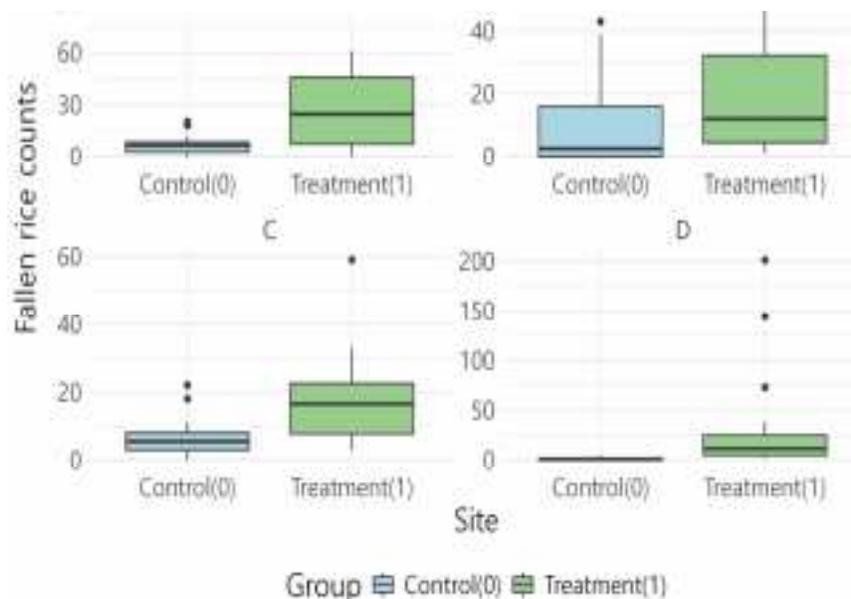
다) 분석결과

기술 통계 분석 결과 벃짚존치 사업 논(1)이 비사업 논(0)에 비해 전반적으로 높은 낙곡 수를 보였다(표 III-3-12). 모든 지점(A, B, C, D)에서 사업 논(1)의 중앙값은 비사업 논(0)의 중앙값보다 현저히 높았다. 특히 D지점은 비사업 논(0)의 중앙값이 1.0으로 매우 낮게 나타났지만, 사업 논(1)은 중앙값이 11.5로 관찰되어 벃짚존치 활동이 먹이원 제공량에 미치는 영향이 상당함을 보여주었다. 데이터의 분포는 전체적으로 평균이 중앙값보다 높게 나타났으며, 이는 낙곡이 특정 방형구에 집중되는 경향을 의미한다. 특히 D1은 2-201의 넓은 범위와 극단적인 이상치(144, 201)를 포함해 큰 변동성을 나타냈다. 박스플롯은 사업 논과 비사업 논 간의 뚜렷한 낙곡 수 분포 차이를 시각적으로 제시한다(그림 III-3-15).

〈표 III-3-12〉 벃짚존치 사업논(1), 비사업논(0) 낙곡 수 조사 결과 기술통계

Site	Group	N	Mean	Median	SD	Min	Max
A	0	20	7.1	6.5	6.09	0	20
	1	20	29.6	24.5	28.15	0	116
B	0	20	10.6	2.5	15	0	43
	1	20	21.65	12	20.7	1	64
C	0	20	6.35	5.5	5.63	0	22
	1	20	18.3	16.5	13.21	3	59
D	0	20	1.4	1.0	1.6	0	22
	1	20	31.45	11.5	51.85	2	201

† Group 1 (Treatment Plot) refers to the paddy field where rice straw was retained after harvest, whereas Group 0 (Control Plot) refers to the field where it was not.



〈그림 III-3-15〉 군산 나포면 벃짚존치 사업논(1)과 비사업논(2) 낙곡 수 Boxplot

벗짚존치 사업 논(1)과 인접한 비사업 논(0) 간의 낙곡 수 차이를 Mann-Whitney U 검정을 통해 분석하고, 그 차이를 정량화한 효과 크기(r)를 계산하여 <표 III-3-13>에 정리하였다. 분석 결과, 4개 쌍 모두에서 벗짚존치 사업 논(1)의 낙곡 수가 비사업 논(0)에 비해 통계적으로 매우 유의미하게($p < 0.05$) 높은 것으로 나타났다. 또한 계산된 효과 크기(r)는 A0 vs A1 (0.467), C0 vs C1 (0.542), D0 vs D1 (0.790) 쌍에서 0.5에 근접하거나 초과하여 '큰 효과(Large Effect)'를 보였으며, B0 vs B1 (0.386) 쌍 역시 0.3을 초과하여 중간 이상의 효과(Medium to Large Effect)를 보였다.

<표 III-3-13> 벗짚존치 사업논(1), 비사업논(0) 낙곡 수 비교 분석(Mann-Whitney U test) 결과

Comparison Pair	W Value	p -value (Two-tailed)	Median 1 (Treatment Plot)	Median 0 (Control Plot)	Effect Size (r)
A0 vs A1	90.5	0.003138	24.5	6.5	0.467
B0 vs B1	109.5	0.0146	12	2.5	0.386
C0 vs C1	73	0.000607	16.5	5.5	0.542
D0 vs D1	16.5	5.865×10^{-7}	11.5	1	0.79

[†]Based on Cohen (1992), Effect size (r) values of approximately 0.1, 0.3, and 0.5 indicate small, medium, and large effects, respectively.

라) 결론 및 향후과제

연구 결과 금강 하구 지역에서 시행된 벗짚존치 사업은 수금류의 먹이원 제공에 매우 큰 효과를 미침을 확인하였다. 모든 비교 쌍에서 사업 논이 비사업 논에 비해 월등히 높은 낙곡 수를 보였고, 그 차이의 크기도 통계적으로 높은 수준이었다. 중앙값을 기준으로 사업 논과 비사업 논(0)의 낙곡 수는 최소 3배(C지점)에서 최대 11배(D지점)까지 차이가 났다. 이러한 결과는 벗짚존치 없이는 해당 지역에 도래하는 겨울 철새 서식을 위한 원활한 먹이공급이 어려울 수 있음을 시사한다.

본 연구는 단기 현장 조사의 결과로 겨울철새가 도래하는 전체 기간의 낙곡 수 변화를 반영하지 못한다. 따라서 시기별 조사(월 1회 이상)를 통해 낙곡 잔존량 및 소진율을 정량적으로 파악할 필요가 있다. 또한 낙곡 수에 영향을 미칠 수 있는 다양한 환경 변수(벼 생산량, 수확기계 성능 등)를 통제하지 못하였다. 후속 연구에서는 이러한 연구의 한계를 개선하고 겨울철 도래하는 수금류 개체군 조사를 추가하여 벗짚존치 사업과 조류 개체수 사이의 정량적 관계를 규명할 필요가 있다.

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립

참고문헌

[국내 문헌]

- 경기도. (2023). 광역 도시생태현황지도 구축계획 수립.
- 고양특례시. (2025). 2024년 생태계서비스지불제 생태계 모니터링(장항·산남습지) 결과보고서.
- 고영주, 조기환, & 김우찬. (2019). 서울지역 녹지서비스의 환경형평성 분석: 중구·성동구·동대문구를 사례로. 한국조경학회지, 47(2), 100-116.
- 관계부처합동. (2023). 제5차 국가생물다양성전략(2024-2028).
- 관계부처합동. (2023). 한반도 생태축 연결·복원 추진계획(2024-2028).
- 관계부처합동. (2025). 2035년 국가 온실가스 감축목표(NDC) 수립. 제5차 2050 탄소중립녹색성장위원회 전체회의 보도자료 (2025.11.10).
- 국립산림과학원. (2021). 우리나라 주요 밀원자원 I: 수목류. <https://nifos.forest.go.kr>
- 국립산림과학원. (2022a). 밀원자원 발굴 및 가치평가 연구. <https://nifos.forest.go.kr>
- 국립산림과학원. (2022b). 밀원자원 가치평가 조사 매뉴얼. <https://nifos.forest.go.kr>
- 국립산림과학원. (2025). DMZ 및 산림훼손지 유형별 복원평가 및 산림복원 기술 개발(2020-2024).
- 국립생물자원관. (2023). 국가생물종목록. <https://kbr.go.kr>
- 국립생태원. (2024). 생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립. 연구보고서.
- 김경진. (2020). 국립공원 훼손지 생태복원의 효과 향상을 위한 정책 개선 방안 (박사학위논문). 강원대학교 대학원.
- 김벼리, 이재혁, 김일권, 김성훈, & 권혁수. (2019). 지역 이해당사자 참여 생태계서비스 간이평가. 한국환경복원기술학회지, 22(1), 1-11.
- 김선미, 우순옥, 최홍민, & 김효영. (2025). DNA 메타바코딩 기반 국내 아까시꿀의 식물상 분석. Journal of Apiculture, 40(1), 75-81.
- 김세현. (2013). 유망 밀원식물의 발굴과 특성. 한국양봉학회 학술대회 자료집, 3-18.
- 김용국. (2014). 녹색복지 관점에서 서울시 생활권 도시공원의 분배적 형평성 분석. 한국조경학회지, 42(3), 76-89.
- 김종인. (2023). Has the reform of the public-benefit direct payment improved inequality? 위기관리이론과실천, 19(4), 91-97.
- 농림축산식품부. (2024). 꿀벌군수: 기타 가축 통계. <https://www.mafra.go.kr>
- 산림청. (2023). 밀원자원의 과학적 가치분석 토대로 숲 조성 [보도자료]. <https://kbr.go.kr>
- 서정영. (2020). 토지피복지도 변화지역 추출을 통한 훼손 유형분류에 관한 연구. Journal of Environmental

- Science International, 29(5), 551-558.
- 손민웅, 이관희, & 정철의. (2023). 밀원수 18종의 화밀 분비량과 꽃 특성에 따른 식물-화분매개곤충 상호작용 분석. *Journal of Apiculture*, 38(3), 255-266.
- 오충현, 김동호, 오창길, 이윤환, & 박은하. (2016). 충남 덕산도립공원 생태계서비스 지불제 도입 방안. *문학과환경*, 15(2), 97-124.
- 온실가스종합정보센터. (2024). 2024년 국가 온실가스 인벤토리 보고서. 환경부.
- 윤주웅, 정원옥, & 최승운. (2021). 국립공원 훼손지 조사 및 복원방안 체계 구축. *국립공원연구지*, 12(1), 67-75.
- 이경준. (1998). 한국 목본류 주요 및 보조 밀원수종과 화분원수종의 분류와 개화기별 자원분포 현황.
- 이훈중. (2020). 북한의 토지이용과 2030년대 생태계서비스 가치변화 특성 및 전망. *대한지리학회지*, 55(2), 97-121.
- 이훈중. (2021). 우리나라 생태계서비스 가치의 시공간 변화 및 특성. *대한지리학회지*, 56(6), 675-704.
- 이훈중. (2022). 생태계서비스 가치평가 및 지도화 방법론에 관한 고찰. *대한지리학회지*, 57(2), 189-208.
- 정철의. (2008). 한국 과수 및 채소 작물 생산에서 꿀벌 화분매개의 경제적 가치 평가. *Journal of Apiculture*, 23(2), 147-152.
- 제주특별자치도. (2024). 생태계서비스지불제 계약 사업시행 가이드라인.
- 최진영, 임가윤, 오민석, & 이승환. (2021). 중부지역 주요 밀원식물에 대한 꿀벌의 방화활동 및 시기별 밀원조성. *Journal of Apiculture*, 36(3), 125-139.
- 환경부. (2018). 생태계서비스 평가 시범사업 I.
- 환경부. (2019). 생태계서비스 평가 시범사업 II.
- 환경부. (2020a). 생태계서비스 평가 및 지도 구축 시범사업 III.
- 환경부. (2020b). 국토환경 녹색복원 마스터플랜 수립을 위한 연구.
- 환경부. (2021). 국토환경 녹색복원 종합계획 수립 연구.
- 환경부. (2023). 국토환경 녹색복원 후보목록 선정방안 연구(I).
- 환경부. (2024). 자연환경복원 추진 지침.
- 환경부. (2024). 생태계서비스지불제 계약 사업시행 가이드라인.

[국외 문헌]

- Alberti, M., Marzluff, J. M., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C., & Zumbunnen, C. (2003). Integrating humans into ecology: Opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *BioScience*, 53(12), 1169–1179. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[1169:IHIEOA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[1169:IHIEOA]2.0.CO;2)
- Allam, Z., Bibri, S. E., Chabaud, D., & Moreno, C. (2022). The 15-minute city concept can shape a net-zero urban future. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9, 126.
- Antoine, C. M., & Forrest, J. R. (2021). Nesting habitat of ground-nesting bees: A review. *Ecological Entomology*, 46(2), 143–159.
- Banchi, E., Ametrano, C. G., Greco, S., Stanković, D., Muggia, L., & Pallavicini, A. (2020). PLANiTS: A curated sequence reference dataset for plant ITS DNA metabarcoding. *Database*, 2020, baz155.
- Banks, S. C., Dujardin, M., McBurney, L., Blair, D., Barker, M., & Lindenmayer, D. B. (2011). Starting points for small mammal population recovery after wildfire: Recolonisation or residual populations? *Oikos*, 120(1), 26–37. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18765.x>
- Baró, F., Haase, D., Gómez-Baggethun, E., & Frantzeskaki, N. (2015). Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 55, 146–158.
- Burkhard, B., Kroll, F., Müller, F., & Windhorst, W. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>
- Carey, A. B., & Harrington, C. A. (2001). Small mammals in young forests: Implications for management for sustainability. *Forest Ecology and Management*, 154(1–2), 289–309. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00638-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00638-1)
- Convention on Biological Diversity. (2022). Decision adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity: 15/4. Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework (CBD/COP/DEC/15/4). United Nations.
- Choi, H. A., Seliger, B., & Han, D. (2023). Rapid ecosystem services assessment of Mundok Ramsar wetland in Democratic People's Republic of Korea and opportunities to improve well-being. *Journal of Ecology and Environment*, 47(2), 27–34. <https://doi.org/10.5141/jee.2023.002>
- Chrzanowska, E., Denisow, B., Strzałkowska-Abramek, M., Dmitruk, M., Winiarczyk, K., & Bożek, M. (2024). Nectar and pollen in Acer trees can contribute to improvement of food resources for pollinators. *Scientific Reports*, 14(1), 27705.
- Collett, M., Chittka, L., & Collett, T. S. (2013). Spatial memory in insect navigation. *Current Biology*, 23(17), R789–R800.

- Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10), eaax0121. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>
- de Araujo Barbosa, C. C., Atkinson, P. M., & Dearing, J. A. (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430-443. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007>
- De Vere, N., Jones, L. E., Gilmore, T., Moscrop, J., Lowe, A., Smith, D., ... Ford, C. R. (2017). Using DNA metabarcoding to investigate honey bee foraging reveals limited flower use despite high floral availability. *Scientific Reports*, 7(1), 42838.
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J. B., & Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345(6195), 401-406. <https://doi.org/10.1126/science.1251817>
- Duque, L., & Steffan-Dewenter, I. (2024). Air pollution: A threat to insect pollination. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 22(3). <https://doi.org/10.1002/fee.2701>
- Elliott, T. F., Jusino, M. A., Trappe, J. M., Lepp, H., Ball, B., Yang, Z. L., & Tedersoo, L. (2022). Mammalian mycophagy: A global review of ecosystem functions and services. *Biological Reviews*, 97(2), 992-1031. <https://doi.org/10.1111/brv.12825>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *The state of food and agriculture 2013: Food systems for better nutrition*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *FAO policy on gender equality 2020-2030*. FAO.
- Gerula, D., & Gąbka, J. (2025). The effect of land cover on the nectar collection by honeybee colonies in urban and rural areas. *Applied Sciences*, 15(8), 4497. <https://doi.org/10.3390/app15084497>
- Greenleaf, S. S., Williams, N. M., Winfree, R., & Kremen, C. (2007). Bee foraging ranges and their relationship to body size. *Oecologia*, 153, 589-596.
- Groff, S. C., Loftin, C. S., Drummond, F., Bushmann, S., & McGill, B. (2016). Parameterization of the InVEST crop pollination model to spatially predict abundance of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium* Aiton) native bee pollinators in Maine, USA. *Environmental Modelling & Software*, 79, 1-9.
- Guedot, C., Bosch, J., & Kemp, W. P. (2009). Relationship between body size and homing ability in the genus *Osmia* (Hymenoptera: Megachilidae). *Ecological Entomology*, 34(1), 158-161.
- Harris, L. M., S. McKenzie, L. Rodina, S. S. Shah & N. J. Wilson. (2016). Water Justice: Key concepts, debates and research agendas. In R. Hollifield, J. Chakraborty and G. Walker (Ed.), *Handbook*

- of Environmental Justice.
- Hayashi, S., Sasaki, T., Farkhary, S. I., Kaneko, K., Hosaka, Y., & Satoh, T. (2021). Age-related variation of homing range in honeybee males (*Apis mellifera*). *Insectes Sociaux*.
- Hinsch, M., Groß, J., & Burkhard, B. (2024). The influence of model choice and input data on pollinator habitat suitability in the Hannover region. *PLOS ONE*, 19(9), e0305731.
- Hughes, J., Cowper-Heays, K., Olesson, E., Bell, R., & Stroombergen, A. (2019). Stormwater, wastewater and climate change: Impacts on our economy, culture and society. *Deep South Science Challenge*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IGES.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2016). The assessment report on pollinators, pollination and food production. IPBES Secretariat.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. IPBES Secretariat.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2022). Summary for policymakers of the methodological assessment report on the diverse values and valuation of nature. IPBES Secretariat.
- Janssens, X., Bruneau, É., & Lebrun, P. (2006). Prédiction des potentialités de production de miel à l'échelle d'un rucher au moyen d'un système d'information géographique. *Apidologie*, 37(3), 351-365.
- Jones, L., Lowe, A., Ford, C. R., Christie, L., Creer, S., & de Vere, N. (2022). Temporal patterns of honeybee foraging in a diverse floral landscape revealed using pollen DNA metabarcoding of honey. *Integrative and Comparative Biology*, 62(2), 199-210.
- Jung, C. (2021). Integrated pollinator-pest management (IPPM) strategy as future apple IPM. *Korean Journal of Applied Entomology*, 60(1), 145-154.
- Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Nicholson, E., & Kingsford, R. T. (Eds.). (2020). *The IUCN global ecosystem typology 2.0*. IUCN.
- Kim, N. H., Choi, J. H., Kim, K. W., Lee, M. L., & Kwon, H. W. (2024). Comparison of pollination activity among *Apis mellifera* L., *Apis cerana* Fab., and *Bombus terrestris* L. in apple blossom.

- Journal of Apiculture, 39(4), 369–375.
- Koetz, A. H. (2013). Ecology, behaviour and control of *Apis cerana* with a focus on relevance to the Australian incursion. *Insects*, 4(4), 558–592.
- Koh, I., Lonsdorf, E. V., Williams, N. M., Brittain, C., Isaacs, R., Gibbs, J., & Ricketts, T. H. (2016). Modeling the status, trends, and impacts of wild bee abundance in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1), 140–145.
- Kunz, T. H., de Torrez, E. B., Bauer, D., Lobova, T., & Fleming, T. H. (2011). Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1223(1), 1–38. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06004.x>
- Lacher, T. E., Davidson, A. D., Fleming, T. H., Gómez-Ruiz, E. P., McCracken, G. F., Owen-Smith, N., Peres, C. A., & Vander Wall, S. B. (2019). The functional roles of mammals in ecosystems. *Journal of Mammalogy*, 100(3), 942–964. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy183>
- Liczner, A. R., & Colla, S. R. (2019). A systematic review of the nesting and overwintering habitat of bumble bees globally. *Journal of Insect Conservation*, 23(5), 787–801.
- Liu, Y., Wang, C., Liu, Y., Feng, T., Wang, E., Yang, L., Niu, Q., & Mao, X. (2024). Integrating forest ecosystem services into health strategies to improve human well-being. *Forests*, 15(11), 1872. <https://doi.org/10.3390/f15111872>
- Liu, F., Zhang, G., Zhang, C., Zhou, W., Xu, X., Shou, Q., ... Dai, P. (2023). Pesticide exposure and forage shortage in rice cropping system prevents honey bee colony establishment. *Environmental Research*, 219, 115097. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115097>
- Loos, J., Benra, F., Berbes-Blazquez, M., Bremer, L. L., Chan, K. M. A., Egoh, B., ... Winkler, K. J. (2023). An environmental justice perspective on ecosystem services. *Ambio*, 52, 477–488. <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01812-1>
- Maes, J., Driver, A., Czúcz, B., Keith, H., Jackson, B., Nicholson, E., & Dasoo, M. (2020). A review of ecosystem condition accounts: Lessons learned and options for further development. *One Ecosystem*, 5, e53485. <https://doi.org/10.3897/oneeco.5.e53485>
- Marquet, O., & Miralles-Guasch, C. (2014). The walkable city and the importance of the proximity environments for Barcelona's everyday mobility. *Cities*, 40, 1–9.
- McInnes, R. J., & Everard, M. (2017). Rapid assessment of wetland ecosystem services (RAWES): An example from Colombo, Sri Lanka. *Ecosystem Services*, 25, 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.03.003>
- Mehdi Heris, K. J., Bagstad, K. J., Rhodes, C., Troy, A., Middel, A., Hopkins, K. G., & Matuszak,

- J. (2021). Piloting urban ecosystem accounting for the United States. *Ecosystem Services*, 48, 101226. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101226>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. (2021). Other livestock statistics. Korea Agricultural Statistics Integration System (KASS). <https://kass.mafra.go.kr/newkass/kas/sti/sti/orgConfmStats.do>
- Mohamadzade Namin, S., Ghosh, S., & Jung, C. (2023). Honey quality control: Review of methodologies for determining entomological origin. *Molecules*, 28(10), 4232.
- Moreno, C. (2016). La ville du quart d'heure: Pour un nouveau chronourbanisme. *La Tribune*. <https://www.latribune.fr/regions/smart-cities/latribune-de-carlos-moreno/la-ville-du-quart-d-heure-pour-un-nouveauchrono-urbanisme-604358.html>
- Na, S. J., Park, J. M., & Kim, Y. K. (2024). Selection of urban trees to enhance pollinator food resources: Comprehensive consideration of various factors for productivity comparison.
- Natural Capital Project. (2024). Crop pollination [InVEST user guide]. Stanford University. <https://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/croppollination.html>
- Office for National Statistics. (2015). *Natural capital accounting 2020 roadmap*.
- Olsen, J. R., Nicholls, N., & Mitchell, R. (2019). Are larger urban green spaces better for mental health? *Landscape and Urban Planning*, 192.
- Patel, R., Islam, S., Patel, M., Trivedi, J., Joshi, M., Joshi, C., ... Patel, A. (2025). Foraging resource partitioning between Indian native *Apis florea* and *Apis cerana*: Unveiling entomological signatures in honey through honey DNA metabarcoding. *Scientific Reports*, 15(1), 11546.
- Perry, R. W. (2013). A review of factors affecting cave climates for hibernating bats in temperate North America. *Environmental Reviews*, 21(1), 28-39. <https://doi.org/10.1139/er-2012-0042>
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., Childers, D. L., McDonnell, M. J., & Zhou, W. (2016). Evolution and future of urban ecological science: Ecology in, of, and for the city. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(7), e01229. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1229>
- Pilmo Jung, Choi, T., Moon, H., Kim, B., & Lee, T.-W. (2025). Comparative analysis of fallen rice counts in straw-retained and non-retained fields under payments for ecosystem services schemes: A case study of Gunsan, Korea. *Proceedings of the National Institute of Ecology*, 6(5).
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. E. (2010).

- Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(6), 345–353.
- Pugesek, G., & Crone, E. E. (2021). Contrasting effects of land cover on nesting habitat use and reproductive output for bumble bees. *Ecosphere*, 12(7), e03642.
- Rahimi, E., Barghjelveh, S., Dong, P., Pirlar, M. A., & Jahanbakhshian, M. M. (2021). PollMap: A software for crop pollination mapping in agricultural landscapes. *Journal of Ecology and Environment*, 45, 1–9.
- Rothwell, A., & Ginsberg, H. S. (2019). The bee fauna of coastal Napatree Point and two inland sites in southern Rhode Island. *Northeastern Naturalist*, 26(3), 446–464.
- Roulston, T. H., & Goodell, K. (2011). The role of resources and risks in regulating wild bee populations. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 405–434.
- Ryu, Y., Han, D., Lee, I. K., & Park, S. (2024). Origins and ingredients of honey from a *Salix* community in a Janghang Wetland in Han River estuary, Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 48.
- Sanchez, L., Warziniack, T., & Knowles, M. (2023). The inequitable exposure of socially vulnerable groups to water shortages across the United States. *Environmental Research Letters*, 18, 044022.
- Schimpl, M., et al. (2011). Association between walking speed and age in healthy, free-living individuals using mobile accelerometry. *PLOS ONE*, 6(8).
- Schirpke, U., Candiago, S., Vigl, L. E., Jäger, H., Labadini, A., Marsoner, T., Meisch, C., Tasser, E., & Tappeiner, U. (2019). Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 651, 928–941.
- Seeley, T. D., & Morse, R. A. (1978). Nest site selection by the honey bee, *Apis mellifera*. *Insectes Sociaux*, 25(4), 323–337.
- Serret, H., Andersen, D., Deguines, N., Clauzel, C., Park, W. H., & Jang, Y. (2022). Towards ecological management and sustainable urban planning in Seoul, South Korea: Mapping wild pollinator habitat preferences and corridors using citizen science data. *Animals*, 12(11), 1469.
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., et al. (2020). InVEST 3.8.5 User's Guide. The Natural Capital Project.
- Shoina, M., et al. (2024). The 15-minute city concept: The case study within a neighbourhood of Thessaloniki.
- Son, C., & Ban, Y. (2022). Flood vulnerability characteristics considering environmental justice and urban disaster prevention plan in Seoul, Korea. *Natural Hazards*, 114, 1–20.

- <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05511-8>
- Sup, K. M., Hyun, K. S., Ho, S. J., Yun, K. H., Hyeusoo, K., & Soo, C. Y. (2015). Honeybee visiting and floral nectar characteristics of *Styrax japonicus*. *Journal of Apiculture*, 30(1), 13-20.
- TEEB. (2010). *The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature*. UNEP.
- Thaler, T. (2021). Social justice in socio-hydrology—How we can integrate the two different perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 66(10), 1503-1512. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1950916>
- Theisen-Jones, H., & Bienefeld, K. (2016). The Asian honey bee (*Apis cerana*) is significantly in decline. *Bee World*, 93(4), 90-97. <https://doi.org/10.1080/0005772X.2016.1237758>
- TNFD. (2023). *Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures*.
- Tuneu-Corral, C., Puig-Montserrat, X., Flaquer, C., Mas, M., Budinski, I., & López-Baucells, A. (2020). Ecological indices in long-term acoustic bat surveys for assessing and monitoring bats' responses to climatic and land-cover changes. *Ecological Indicators*, 110, 105849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105849>
- UK National Ecosystem Assessment. (2011). *The UK national ecosystem assessment: Synthesis of the key findings*. UNEP-WCMC.
- UN. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations.
- UN. (2024). *The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace*. UNESCO.
- UNDRR. (2020). *Ecosystem-based disaster risk reduction: Implementing nature-based solutions for resilience*.
- United Nations. (2021). *System of environmental-economic accounting—Ecosystem accounting*.
- US Water Alliance. (2017). *An equitable water future: A national briefing paper*. US Water Alliance.
- Vallecillo, S., La Notte, A., Zulian, G., Ferrini, S., & Maes, J. (2019). Ecosystem services accounts: Valuing the actual flow of nature-based recreation from ecosystems to people. *Ecological Economics*.
- Vickery, C., & Quinn, J. (2024). Forest, climate, and policy literature lacks acknowledgement of environmental justice, diversity, equity, and inclusion. *Journal of Environmental Management*, 358, 120804.
- Visscher, P. K., & Seeley, T. D. (1982). Foraging strategy of honeybee colonies in a temperate

- deciduous forest. *Ecology*, 63(6), 1790–1801.
- Wang, H., Dong, Z., Xu, Y., & Ge, C. (2016). Eco-compensation for watershed services in China. *Water International*, 41(2), 271–289.
- Whiting, J. C. (2022). Can acoustic recordings of cave-exiting bats be used as indices of population size during winter? *Ecological Indicators*, 137, 108742. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108742>
- WHO Regional Office for Europe. (2017). *Urban green spaces: A brief for action*.
- Wirta, H., Abrego, N., Miller, K., Roslin, T., & Vesterinen, E. (2021). DNA traces the origin of honey by identifying plants, bacteria and fungi. *Scientific Reports*, 11(1), 4798.
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice. *Landscape and Urban Planning*, 125, 234–244.
- World Health Organization, & United Nations Children’s Fund. (2025). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2024: Special focus on inequalities*. Geneva.
- Wunder, S. (2005). Payments for environmental services: Some nuts and bolts. *CIFOR Occasional Paper*, 42, 1–24.
- Zhang, B., & Jiang, T. (2025). Seasonal disparities in green exposure under the 15-minute city framework: A case study of Xi’an, China.
- Zhao, C., Sander, H. A., & Hendrix, S. D. (2019). Wild bees and urban agriculture: Assessing pollinator supply and demand across urban landscapes. *Urban Ecosystems*, 22, 455–470.
- Zhao, Z., Shan, R., Sun, X., Sun, J., Wang, B., & Wang, Z. (2023). Mapping and assessing supply and demand of crop pollination services in Shandong Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 426, 139024.
- Zulian, G., Paracchini, M. L., Maes, J., & Liqueste, C. (2013). *ESTIMAP: Ecosystem services mapping at European scale*. Publications Office of the European Union.

[온라인 자료]

Office for National Statistics. <https://www.ons.gov.uk/economy/environmentalaccounts>

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립

위탁연구

생태계서비스 평가 기반 정책 수립 및 의사결정을 위한 시나리오 개발 II

1. 생태계서비스 평가 기반 정책 수립 및 의사결정을 위한 시나리오 개발 II 2)

1) 연구의 배경 및 필요성

가) 연구의 배경

21세기 들어 기후변화와 생물다양성 감소는 인류 사회가 직면한 대표적인 “쌍둥이 위기(twin crises)”로 인식되고 있다. 기온 상승, 극한 기상현상, 해수면 상승과 같은 기후위기의 영향은 농업 생산성, 수자원, 건강, 인프라 등에 연쇄적인 피해를 유발하고 있으며, 토지이용 변화·과도한 자원 이용·오염·외래종 침입 등은 생태계의 구조와 기능을 약화시켜 생태계서비스 공급능력을 저하시킨다. Millennium Ecosystem Assessment는 전 세계 생태계서비스의 약 60%가 이미 훼손되었거나 지속가능하지 않은 방식으로 이용되고 있음을 제시하며, 인류의 복지와 생태계 상태가 긴밀히 연결되어 있음을 강조한 바 있다(Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

이후 IPBES(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)는 생물다양성 손실이 기후변화, 토지·해양 이용 변화, 생물 남획, 오염, 침입외래종 등 복합적인 동인에 의해 가속화되고 있으며, 이러한 변화가 식량, 물, 건강, 재난 위험관리, 문화·정체성 등 다양한 생태계 서비스를 동시에 위협하고 있음을 종합적으로 평가하였다(IPBES, 2019). 특히 IPBES는 생태계서비스를 통해 제공되는 자연의 다양한 기여(Nature’s contributions to people, NCP)가 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals, SDGs)와 긴밀하게 연계되어 있음을 보여주며, 정책·거버넌스 차원의 전환적 변화(Transformative change)의 필요성을 강조한다.

최근 승인된 IPBES Nexus Assessment는 생물다양성, 물, 식량, 건강, 기후 사이의 상호연계성을 하나의 시스템으로 통합적으로 다루는 넥서스 접근을 제시하였다(IPBES, 2024). 이 평가는 기후·식량안보·보건·물관리 정책을 각각 분리해서 추진할 경우 부문 간 목표 충돌과 비용 증가가 발생할 수 있음을 지적하며, 자연자본과 생태계서비스를 기반으로 한 시나리오 분석과 통합정책 설계의 중요성을 부각시킨다. 우리나라 역시 2030 국가온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC), 2050 탄소중립·녹색성장 전략, 제5차 국가생물다양성전략, 2030 글로벌 생물다양성 프레임워크(Global Biodiversity Framework, GBF) 이행 등을 추진하고 있어, 생태계와 생태계서비스의 장기적인 변화 전망과 정책 시나리오에 따른 영향 분석이 점점 더 중요한 과제가 되고 있다.

현재까지의 연구는 국가 단위에서 생태계 및 생태계서비스의 현황과 변화를 진단하는 국가 생태계 평가를 추진해 왔으며, 1990년 이후 약 30여 년간의 공간·시간적 변동을 정량적으로 파악하는 작업을 진행하고 있다. 그러나 과거·현재의 평가만으로는 GBF와 SDGs 이행, 탄소중립 및 자연기반해법(Nature-based solutions, NbS) 확대, 생태계서비스 기반 국토·도시계획과 같은 중장기 정책을 설계하기에 한계가 있다. 특히 기후변화, 인구·사회 구조 변화, 기술·에너지 전환, 식생활 및 국민 태도 변화 등 다양한 동인이 동시에 작용하는 미래 환경에서는, 단일 동인의 단순 추세 연장이 아닌 복수의 대안적 미래 시나리오를 설정하고 이에 따른 생태계·토지이용·생태계서비스 변화를 통합적으로 예측하는 접근이 필요하다.

2) 본 내용은 국립생태원 생태계서비스팀에서 실시한 「생태계서비스 미래 예측 모형 연구」 위탁 사업 최종보고서 주요 내용을 발췌 및 재구성함.

나) 연구의 필요성

미래 불확실성이 큰 환경에서 정책 수립을 지원하기 위해서는, 정교한 기후·경제 모형뿐 아니라 사회·거버넌스·기술·식량체계·생물다양성 등의 복합 동인을 아우르는 시나리오 기반 분석이 요구된다. 국제적으로는 IPCC의 RCP-SSP 프레임워크와 이를 확장한 다양한 지역 시나리오(O'Neill et al., 2020), IPBES 시나리오·모델 평가(Scenarios and Models Assessment) 및 Global Assessment, 최근의 Nexus Assessment 등에서 질적 시나리오 스토리라인과 정량 모형을 결합한 분석 체계가 제시되어 왔다. Rounsevell & Metzger (2010)는 환경변화 평가를 위해 다양한 이해관계자 참여와 서사 구조를 활용한 질적 시나리오 스토리라인의 중요성을 강조하였고(Rounsevell & Metzger, 2010), Kok 등(2019)은 글로벌 SSP를 유럽 지역 특성에 맞게 재구성하여 지역별 사회·경제·정책 경로 차이가 토지이용과 기후 영향에 미치는 차이를 분석하였다(Kok et al., 2019).

국내에서도 기후변화, 토지이용 변화, 생물다양성, 생태계서비스를 대상으로 한 다양한 시나리오 및 모형 연구가 수행되어 왔으나, 대부분 개별 부문(예: 기후·수문, 농업 생산, 도시 토지이용, 특정 생태계서비스 등)에 한정되거나, 정량 모형과 시나리오 서사 간 연계가 상대적으로 약하다는 한계가 있었다. 또한 국가 차원에서 생태계서비스를 포괄하는 장기 시나리오 세트를 구축하고, 이를 토지이용 변화 모형과 생태계서비스 모형에 일관되게 적용하여 2050년 수준까지의 변화를 전망한 사례는 매우 제한적이다.

이러한 공백을 해소하기 위해 2024년 「IPBES Nexus assessment 기반 생태계서비스 시나리오 개발」 연구를 통해, 국내 정책·사회·경제·기술·생물다양성 동인들을 종합한 3개 시나리오(예: ‘차가운 생산, 따뜻한 소비’, ‘포커스 온 탄소’, ‘균형의 시대’)와 동인별 정량 추세선, 인과관계 다이어그램을 구축하였다. 그러나 당시 연구는 시나리오·동인 체계를 정립하는 데 초점을 두었기 때문에, 이를 토지이용 및 생태계서비스 정량 모형에 실제 적용하여 미래 공간 패턴과 서비스 변화를 예측하는 단계까지는 나아가지 못했다는 한계가 있었다.

이번 연구는 2024년 구축된 Nexus 기반 시나리오와 핵심 동인을 출발점으로 삼아, (1) IPBES Global/Nexus Assessment의 개념 틀과 국내 정책·지표 체계를 연계하고, (2) 핵심 동인의 정량 추세와 상호작용 구조를 반영한 토지이용 변화 예측 모형을 구축하며, (3) InVEST 기반 생태계서비스 모형(탄소 저장, 물 공급, 침식 조절, 수질 조절, 서식지 질 등)을 적용해 시나리오별 미래 생태계서비스를 정량적으로 산정·비교하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 국가 생태계 평가의 시계열 분석(1990-2020년)을 2050년까지 미래로 확장하고, 넥서스 관점에서 기후·식량·물·건강·생물다양성·사회경제 목표 간의 상충(Trade-off)과 상호보완(Synergy)을 구체적으로 제시할 수 있는 기반을 마련할 필요가 있다.

다) 연구 목적

본 연구는 IPBES Nexus Assessment와 정합적인 국내 생태계서비스 미래 예측 모형을 구축하는 것을 궁극적인 목적으로 한다. 보다 구체적으로는 다음의 세부 목적을 가진다.

표 1. 생태계서비스 미래 예측 모형 연구 세부 목적

<p>1. Nexus 기반 시나리오 및 핵심 동인 체계의 고도화</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2024년 개발된 3개 시나리오의 스토리라인과 동인 세트를 보완·정교화하고, 인구·경제·에너지·농업·사회·거버넌스·생물다양성·국제협력 등 8개 내외 카테고리의 동인에 대해 정량 지표와 1990-2020년 추세를 재분석한다. • 핵심 동인 간 인과관계 다이어그램을 재구성하여, 각 시나리오에서 동인 간 상호작용과 피드백 구조를 명시한다.
<p>2. 시나리오별 토지이용 변화 예측 모형 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> • 글로벌·지역 토지이용 시나리오(Dyna-CLUE)의 개념과 입력 구조를 검토하고, 이를 국내 데이터(통계·공간자료)와 결합하여 한국의 2020-2050년 토지이용 변화(시가화건조지역, 농업지역, 산림, 습지 등)를 시나리오별로 예측한다. • 예측된 토지이용 수요와 공간 배분 결과의 적합성을 검토하여, 국가 생태계 평가에 활용 가능한 토지이용 미래지도(기준 격자 1 km 등)를 생산한다.
<p>3. 시나리오별 생태계서비스 미래 예측 및 정책 메시지 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> • 토지이용 예측 결과를 기반으로, InVEST 등의 생태계서비스 모형을 적용하여 탄소 저장, 담수 공급(물수지), 토양 유실·침식 조절, 비점오염 저감(영양염류), 서식지 질 등 주요 생태계서비스를 시나리오별로 정량화한다.

이와 같이 본 연구는 IPBES와 같은 국제적 논의에서 제시되는 넥서스·시나리오·모형 접근을 국내 정책 환경과 데이터 현실에 맞게 재구성함으로써, 국가 차원의 생태계서비스 기반 장기 시나리오 분석의 시범모형을 제시하고자 한다.

2) 연구 내용 및 방법

가) 과업의 범위

본 연구의 시간 범위는 과거 토지이용은 1975~2020년 자료(수자원관리종합정보시스템)를 활용해 30년 구간별 토지이용 변화 특성을 분석하고, 핵심 동인·사회경제·환경 정보는 1990년대 이후 시계열을 활용하였다. 미래 예측은 2020년을 기준 시점으로 설정하고 2050년까지의 중·장기 변화를 전망하는 것으로 설정하였다. 공간 범위는 우리나라 전 국토를 대상으로 하되, 토지피복 자료의 해상도와 정책 활용성을 고려하여 시·도·시·군·구 등 행정구역 및 권역 단위(예: 수도권, 영남권 등)와 수 km 수준의 격자 단위를 병행하여 분석하였다.

내용적 범위는 2024년 선행연구에서 마련된 넥서스 시나리오와 핵심 동인 체계를 기반으로, 이를 국가 단위 토지이용·생태계서비스 모형에 연결할 수 있도록 정비하고, 토지이용 변화 예측 모형과 생태계서비스 예측 모형을 구축·연계하는 것이다. 이를 통해 기후, 물, 식량, 생물다양성, 사회경제 요인의 변화가 토지이용과 생태계서비스에 미치는 영향을 시나리오별로 정량화하고, 그 결과를 국가 생태계 평가, GBF 이행, 국가환경종합계획 등과 연계 가능한 정책·계획 시나리오로 제시하는 것을 과업의 범위로 두었다.

나) 연구추진체계

본 연구는 2024년 선행 넥서스 시나리오 연구를 토대로, 시나리오-토지이용-생태계서비스를 하나의 흐름으로 연결하는 구조로 추진하였다. 핵심 추진체계는 ① 선행 시나리오 및 동인의 재정비, ② 기반자료 및 기준 연도 구축, ③ 토지이용 변화 예측, ④ 생태계서비스 예측, ⑤ 시나리오별 비교·정리의 다섯 단계로 구성된다.

우선, 선행연구에서 제시된 ‘차가운 생산·따뜻한 소비(이하 식량)’, ‘포커스 온 탄소(이하 기후)’, ‘균형의

시대(이하 생물다양성) 등 3개 넥서스 시나리오와 이에 대응하는 핵심 동인 체계 및 인과관계 구조를 본 연구의 출발점으로 삼았다. 본 과제에서는 국가 생태계 평가와의 정합성을 고려하여 시나리오의 설명체계와 동인 구성을 정리하는 동시에, 핵심동인별 정량적 추세 분석 결과를 시나리오 모듈에 반영하여 현재추세 반영 시나리오(Business as Usual, BAU)와 3개 넥서스 시나리오의 미래 동인값이 설정되도록 하였다. 이렇게 정리된 시나리오-핵심동인 모듈은 이후 단계에서 토지이용 면적 수요 산정과 공간 모형 (Dyna-CLUE, InVEST)의 입력값으로 순차적으로 연계되도록 하는 연구추진체계의 상위 틀로 활용하였다.

다음으로, 토지피복·사회경제·환경 자료를 통합하여 기준연도 공간자료와 장기 추세를 구축하고, 이를 토대로 토지이용 예측 모형과 생태계서비스 예측 모형에 공통으로 활용할 수 있는 “공유 입력자료 세트”를 마련하였다. 이 단계에서 구축된 기준연도 토지피복, 동인 정보, 시나리오별 입력값은 이후 모든 모형 분석의 공통 출발점으로 사용된다.

세 번째 단계에서는 시나리오별로 정의된 동인값과 토지수요를 토지이용 예측 모형에 적용하여, 2050년까지의 토지이용 변화를 시나리오별로 산출하였다. 이어서 네 번째 단계에서, 이렇게 도출된 미래 토지피복도를 생태계서비스 예측 모형에 입력하여 탄소, 물, 토양, 수질, 서식지 등 주요 서비스의 시나리오별 전망치를 계산하였다.

마지막으로, 다섯 번째 단계에서는 토지이용 및 생태계서비스 예측 결과를 하나의 틀 안에서 비교·정리하고, 시나리오 간 차이를 정량·공간적으로 설명할 수 있도록 지표화·시각화하였다.

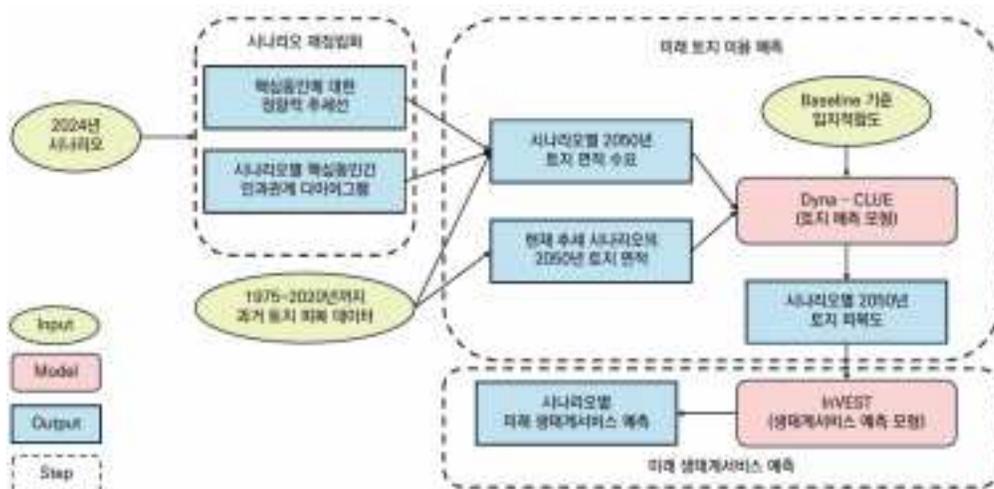


그림 1. 연구 추진 체계

다) 연구 방법

연구 방법은 넥서스 시나리오·동인 체계를 계량화하고, 이를 토지이용 예측 모형(Dyna-CLUE)과 생태계서비스 예측 모형(InVEST)에 적용하는 기술적 절차에 초점을 두었다. 주요 내용은 ① 시나리오 및 핵심 동인의 정량화, ② 토지이용 예측 모형 설정, ③ 생태계서비스 예측 모형 설정, ④ 결과 종합·비교 분석으로 구분된다.

(1) 시나리오 및 핵심 동인의 정량화

2024년 선행연구에서 도출된 3개 넥서스 시나리오와 동인 목록, 인과관계 다이어그램을 바탕으로, 시나리오별로 정책·사회·경제·기술·생물다양성의 변화 방향을 재정리하였다. 이어서 통계청, 기후에너지환경부 등 공공 데이터와 국제 통계를 활용하여 인구, 경제규모, 에너지 구조, 농업·식량체계, 보호지역·국제협력 등 주요 동인에 대한 1990년 이후의 시계열 자료를 구축하였다.

각 동인에 대해서는 선형·비선형 회귀, 구간 회귀 등 통계 기법을 활용하여 “현재 추세”에 해당하는 기준 곡선을 도출하고, 시나리오가 가정하는 정책·기술 변화 수준에 따라 동인별 미래 추세 곡선을 설정하였다. 아울러 동인 간 인과관계 다이어그램을 토지이용 변화·생태계서비스 변화와 연계될 수 있도록 수정하여, 정성적 시나리오 설명과 정량 동인값이 모형 입력 단계에서 일관되게 반영되도록 정리하였다.

(2) 미래 토지이용 변화 예측 모형 설정(Dyna-CLUE)

토지피복 유형별 30년 변화율을 5등급으로 구분하고 대푯값을 설정한 뒤, 이를 BAU 및 3개 넥서스 시나리오의 토지 유형별 2050년 면적 수요 산정에 활용하였다. 토지이용 예측에는 Dyna-CLUE 모형을 활용하였다(Verburg & Overmars, 2009). 이를 위해 먼저 국가 토지피복지도를 기반으로 시가지지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역 등으로 단순화한 토지 유형 분류체계를 설정하였다. 이어서 인구밀도, 도시화율, 1인당 GDP, 도로 및 도시 중심지 접근성, 고도·경사도 등의 지형·기후 변수, 보호지역 여부 등 토지이용 동인 자료를 격자 수준에서 구축하였다.

기준연도 토지피복과 위 설명변수 간의 관계는 로지스틱 회귀 분석을 통해 추정하여, 각 토지 유형이 특정 위치에서 나타날 확률(입지적합도)을 도출하였다. 동시에 토지 유형 간 전환 가능성 및 전환 난이도를 반영한 전환 행렬·저항 행렬을 설정하여, 정책·규제·물리적 제약을 모형에 반영하였다.

시나리오별로는 앞 단계에서 설정한 동인 추세를 바탕으로 토지 유형별 2050년 총 면적 수요를 산정하고, 이를 Dyna-CLUE 모형의 상향식 입지모형과 결합하여 BAU와 3개 넥서스 시나리오에 대한 2050년 토지피복도를 산출하였다. 모형의 신뢰성을 확인하기 위해 과거 기간을 대상으로 모의실험을 수행하고, 실제 토지피복 변화와 비교하여 Kappa 계수 및 정확도 지표를 산정하여 적합성을 점검하였다.

(3) 생태계서비스 미래 예측 모형 설정(InVEST)

생태계서비스의 공간적·정량적 변화를 분석하기 위해 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 모형군을 활용하였다(Natural Capital Project, 2025). InVEST는 토지피복, 기상, 지형, 토양 등의 공간자료를 입력값으로 사용하여 다양한 정책·관리 시나리오에 따른 생태계서비스 공급량과 분포를 시뮬레이션하는 GIS 기반 모형 집합으로, 비교적 단순화된 생산함수 구조를 통해 탄소 저장, 수문조절, 비점오염, 서식지 질 등 핵심 서비스를 정량화할 수 있도록 설계되어 있다. 앞서 산출된 시나리오별 2050년 토지 피복도는 모든 모듈에 공통으로 사용되는 핵심 입력자료로 활용되며, 여기에 디지털고도모델(DEM), 강수량·기온 등 기상자료, 토양유실계수, 영양염류 발생계수 등 환경·토양 정보를 결합하여 모형 입력데이터를 구축하였다.

국가 생태계 평가와 정책적 활용 가능성을 고려하여 본 연구에서는 InVEST 모형군 가운데 탄소 저장 및 흡수, 연간 수자원 산출량, 토양유실 및 침식 조절, 영양염류 배출, 서식지 질의 다섯 가지 모듈을 선정하였다 (Natural Capital Project, 2025). 탄소 저장 및 흡수(Carbon Storage and Sequestration) 모듈은 토지이용 유형별로 지상·지하 생물량, 고사목, 토양탄소를 포함하는 탄소 저장량 계수를 부여하고 이를 격자 단위 토지피복에 적용함으로써 공간별 탄소 저장량을 산정하는 방식으로 구성된다. 연간 수자원 산출량(Annual Water Yield, AWY) 모듈은 강수량, 기준증발산량, 토양 특성, 토지피복 정보를 입력으로 사용하여 물수지에 기반한 유출량(blue water)을 추정하며, 강수에서 실제 증발산과 토양저류를 제외한 성분을 연간 수자원 산출량으로 정의한다(Mulligan, 2013; Natural Capital Project, 2025). 토양유실 및 침식 조절(Sediment Delivery Ratio, SDR) 모듈은 RUSLE 계열의 토양침식식과 지형·토지피복에 따른 침식 인자, 하천까지의 이송 비율(SDR)을 함께 고려하여 격자 단위 토양침식량과 실제 하천으로 유입되는 퇴적물 배출량을 추정한다. 영양염류 배출 (Nutrient Delivery Ratio, NDR) 모듈은 토지이용별 질소·인 발생계수와 토양·지형·토지피복에 따른 이동·저류 특성을 반영하여 격자별 영양염 부하량과 하천 도달량을 산정하는 역할을 한다. 마지막으로 서식지 질(Habitat Quality) 모듈은 토지피복별 서식지 적합도, 위협요인(도로, 시가화, 집약농업 등)의 공간 분포와 영향 범위, 각 위협에 대한 민감도와 완충 효과를 통합하여 격자 단위 서식지 질 지수를 산정함으로써, 경관 수준에서 서식지 단편화와 위협 압력을 함께 반영할 수 있도록 설계되어 있다.

각 모듈의 매개변수는 InVEST 공식 매뉴얼(Natural Capital Project, 2025)과 국내·외 선행연구, 통계 자료를 참고하여 국내 여건에 맞게 설정하였으며, 특히 탄소 밀도, 영양염류 발생계수, 토양유실계수 등 민감도가 높은 변수에 대해서는 값의 범위를 검토하여 비현실적인 결과가 발생하지 않도록 조정하였다. 이후 기준연도 (2020년)와 2050년(BAU 및 3개 넥서스 시나리오)을 대상으로 모형을 실행하여 격자 단위 생태계서비스 공급량의 공간분포를 산출하고, 이를 행정구역·권역 단위로 집계하여 시나리오 간 변화 방향과 크기를 비교·분석하였다.

(4) 결과 종합 및 비교 분석

마지막으로, 시나리오별 토지이용과 생태계서비스 예측 결과를 종합하여 비교·분석하였다. 서로 다른 단위와 방향성을 가진 서비스 지표를 함께 비교하기 위해, 각 서비스에 대해 값이 클수록 “양호한 상태”에 해당하도록 방향을 정리한 뒤 0~1 또는 0~100 범위로 정규화하였다. BAU 시나리오를 기준으로 각 넥서스 시나리오의 상대적 개선 정도를 평가하고, 탄소 저장, 수자원, 토양·수질 조절, 서식지 질 등 서비스별 변화 양상을 분석하였다.

이를 통해 시나리오별로 어떤 서비스 조합에서 상충(Trade-off)이 발생하고, 어떤 조합에서 공이득(Synergy)이 나타나는지를 정리하였으며, 이후 토지이용 구조 변화, 생태계서비스 변화 특성, 국가 정책과의 연계 가능성을 논의하는 기초 자료로 활용하였다.

3) 연구의 결과

본 연구에서는 ① 정책·사회·경제·환경 등 핵심 동인의 정량적 추세 분석 결과, ② 토지이용 변화 특성, ③ 토지피복 30년 변화율의 등급화 구간 및 시나리오별 대푯값 매칭, ④ BAU 및 3개 넥서스 시나리오를 적용한 2050년 토지이용 예측 결과, ⑤ 시나리오별 생태계서비스 및 생태계서비스 능력 예측 결과, ⑥ 생태계서비스

종합지수 및 시나리오 비교 결과를 중심으로 연구 결과를 정리하였다.

가) 핵심 동인별 정량적 추세 분석 결과

선행연구에서 도출된 핵심 동인 목록을 정책·거버넌스, 인구, 경제발전 및 변화, 에너지·기술, 농업 및 식량, 국민태도 및 사회구조, 국제적 대응·국제협력 등 여러 카테고리로 구분하고, 각 동인에 대응하는 지표와 산출식을 설정하였다. 이후 통계청, 중앙부처 통계, 국제 데이터베이스 등에서 수집한 1990년대 이후 시계열 자료를 이용하여 동인별 지표 값의 변화를 분석하고, 증가(↗), 감소(↘), 정체(→) 등 정량적 추세를 도출하였다. 이러한 정량적 추세 분석 결과는 BAU 및 넥서스 시나리오 설정 시 각 동인의 미래 변화 방향과 강도를 반영하는 기초 자료로 활용되었다. 특히 BAU 시나리오는 과거 관측된 정량적 추세를 기준으로 각 동인의 미래 값을 설정하였고, 식량·기후·생물다양성 시나리오는 해당 분야 정책 목표와 서사를 반영하여 일부 동인의 추세를 강화·완화하는 방식으로 조정하였다.

핵심 동인	현재 추세 반영 시나리오(BAU)	차기운 생산, 따뜻한 소비 (식량)	포커스 온 탄소 (기후)	균형의 시대 (생물다양성)
정책과 거버넌스	→		↘	
인구 추세	↗	↘		
- 탄소집약도	↘		↘	
- 에너지 기술 변화	↗		↗	
- 신재생에너지 비율	↗		↗	↗
산림순환경영	↘		↗	↗
관행농투입물량	↗	↘		↘
- 유기농업	↗	↗		
- 시설농업	↗	↗		
자연에 대한 태도	↘			↗
제도에 대한 신뢰	→			↗
- 사회적 신뢰	↗			↗
- 보호지역	↗			↗
국제협력	→			↗

그림 2. 시나리오별 핵심동인 미래 변화 경향 비교

나) 토지이용 변화 특성

1975년 이후 약 30년간의 토지이용 변화를 분석한 결과, 시가화건조지역은 평균적으로 30년 동안 약 +4.31%p 증가하여 가장 뚜렷한 확대 경향을 보였다(신뢰구간: +3.60~+4.88%p). 반대로 농업지역과 산림지역은 각각 -3.64%p(-7.46~-0.44%p), -5.65%p(-6.51~-5.10%p) 수준의 감소 추세를 보여 장기적으로 농경지와 산림이 줄어드는 방향으로 변화해 온 것으로 나타났다.

초지는 평균 +2.96%p(0.08~6.85%p), 나지는 +1.09%p(0.64~1.58%p), 수역은 +0.69%p(0.35~1.16%p)로 완만한 증가를 보였으며, 습지는 +0.24%p(-0.50~+0.87%p)로 변화 폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로, 과거 수십 년 동안 우리나라 토지이용은 시가화·나지·수역의 점진적 확대와 농업·산림지역의 축소가 동시에 진행되어 온 것으로 정리할 수 있다.

다) 토지피복 30년 변화율 등급화와 시나리오별 대푯값 매칭

앞 절에서 제시한 토지이용 유형별 30년 변화 특성은 단순한 경향 설명에 그치지 않고, 시나리오별 2050년 토지수요를 산정하기 위한 정량적 입력값으로 활용되었다. 먼저 1975-2020년 기간 동안의 토지피복 자료를 활용하여 토지이용 유형별 30년 변화율을 산정하고, 부트스트랩 기법을 적용하여 평균 변화율과 95% 신뢰구간을 도출하였다. 이를 바탕으로 각 토지이용 유형에 대해 “매우 적게 변화”, “적게 변화”, “어느 정도 변화”, “많이 변화”, “매우 많이 변화”와 같이 다섯 단계의 변화 등급을 설정하고, 등급별 변화율 구간과 그 구간을 대표하는 대푯값을 정리하였다.

표 3. 토지피복 30년 변화율에 따른 등급화 구간 및 대표값

토지이용 유형	등급	대표값	토지이용 유형	등급	대표값
시가화건조지역	매우 적게 변화	3.60	산림지역	매우 적게 변화	5.10
	적게 변화	3.81		적게 변화	5.25
	어느 정도 변화	4.24		어느 정도 변화	5.56
	많이 변화	4.67		많이 변화	6.11
	매우 많이 변화	4.88		매우 많이 변화	6.51
농업지역	매우 적게 변화	0.44	습지	매우 적게 변화	0.50
	적게 변화	1.61		적게 변화	0.56
	어느 정도 변화	3.94		어느 정도 변화	0.69
	많이 변화	6.28		많이 변화	0.81
	매우 많이 변화	7.46		매우 많이 변화	0.87

이 과정에서 시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 습지 등 주요 토지이용 유형별로 30년 변화율 분포를 검토한 뒤, 각 유형의 특성을 고려하여 변화율 구간을 나누고, 해당 구간에 속하는 격자들의 평균 변화율을 등급별 대푯값으로 사용하였다. 예를 들어 시가화건조지역의 경우, 30년 동안 거의 변하지 않은 구간부터 급격히 증가한 구간까지를 단계적으로 구분하고, 각 단계에 해당하는 변화율 평균을 “매우 적게 증가”, “조금 증가”, “어느 정도 증가”, “많이 증가”, “매우 많이 증가” 등으로 명명하여 시나리오 설정에 활용하였다. 농업지역과 산림지역, 습지의 경우에는 감소·증가가 혼재하는 특성을 반영하여, 감소 구간과 증가 구간을 모두 포함하는 형태로 등급과 대푯값을 정의하였다.

이렇게 정의된 변화 등급과 대푯값은 이후 시나리오별 토지수요를 설정하는 과정에서 핵심 역할을 하였다. BAU 시나리오에서는 각 토지이용 유형이 과거에 관측된 평균적인 변화 수준을 유지한다고 가정하여, 해당 유형의 30년 변화율 분포에서 “중간 수준”에 해당하는 등급과 그 대푯값을 선택하였다. 반면 식량, 기후, 생물다양성 넥서스 시나리오에서는 시나리오 서사와 정책 방향에 따라 토지이용 유형별 변화 등급을 다르게 부여하였다. 예를 들어 Food 시나리오에서는 농업지역의 변화 등급을 “유지 또는 소폭 감소” 수준으로 설정하는 한편, 산림과 습지는 “소폭 증가” 수준으로, 기후와 생물다양성 시나리오에서는 산림·습지의 변화 등급을 “많이 증가” 또는 “매우 많이 증가” 수준으로 상향 조정하는 방식이다.

표 4. 시나리오별 토지이용 유형에 따른 토지피복 변화 등급 및 대푯값 매칭

구분	시가화건조지역		농업지역		산림지역		습지	
차가운 생산, 따뜻한 소비 (식량)	어느 정도 증가	4.24	조금 감소	1.61	매우 적게 증가	5.1	매우 많이 증가	0.87
포커스 온 탄소 (기후)	어느 정도 증가	4.24	매우 조금 감소	0.44	많이 증가	6.11	적게 감소	0.56
균형의 시대 (생물다양성)	조금 증가	3.81	매우 많이 감소	7.46	매우 많이 증가	6.51	매우 많이 증가	0.87

최종적으로, 기준연도(2020년) 토지이용 면적에 각 토지이용 유형·시나리오별로 선택된 30년 변화율 대푯값을 적용하여 2050년까지의 장기 변화량과 면적 수요를 산정하였으며, 이렇게 도출된 시나리오별 토지 유형별 2050년 면적 수요가 이후 Dyna-CLUE 모형의 입력값으로 활용되었다. 다시 말해, 토지피복 30년 변화율에 대한 등급화와 대푯값 매칭은 과거 관측된 변화 패턴을 시나리오별 미래 토지수요로 전환하는 연결고리 역할을 하였으며, 시나리오별 2050년 토지이용 예측 결과의 기초가 되었다.

라) 시나리오별 2050년 토지이용 예측 결과

기준연도인 2020년의 전국 토지이용 구조는 시가화건조지역 약 65.6만 ha, 농업지역 182.0만 ha, 산림지역 587.8만 ha, 초지 96.6만 ha, 습지 14.6만 ha, 나지 30.2만 ha, 수역 24.4만 ha로, 산림과 농업지역의 비중이 큰 가운데 초지와 나지가 일정 규모를 차지하고, 수역·습지는 상대적으로 면적이 작은 구조를 보였다.

2050년까지의 토지이용을 ‘현재 추세 반영 시나리오(BAU)’와 세 개의 넥서스 시나리오(‘차가운 생산, 따뜻한 소비(식량)’, ‘포커스 온 탄소(기후)’, ‘균형의 시대(생물다양성)’)로 예측한 결과는 다음과 같다.

시가화건조지역은 기준연도 65.6만 ha에서 BAU 시나리오에서 약 111.9만 ha로 크게 증가하여 가장 높은 값을 보였으며, 식량과 기후 시나리오에서는 각각 약 68.4만 ha, 생물다양성 시나리오에서는 약 68.1만 ha 수준으로 예측되었다. 넥서스 시나리오에서도 기준연도 대비 시가화 면적이 다소 확대되지만, BAU에 비해서는 증가 폭이 크게 억제되는 것으로 나타났다.

농업지역은 기준연도 182.0만 ha에서 BAU 시나리오에서 약 173.5만 ha, 생물다양성 시나리오에서 약 168.4만 ha로 감소하는 것으로 나타났다. 식량과 기후 시나리오에서는 각각 약 179.1만 ha, 181.2만 ha로 기준연도와 비교해 감소 폭이 상대적으로 작아, 농업지역이 대체로 유지되는 경향을 보였다.

산림지역은 기준연도 587.8만 ha에서 BAU 시나리오에서는 약 538.3만 ha로 감소하는 반면, 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 각각 약 617.8만 ha, 623.7만 ha, 626.1만 ha로 증가하는 것으로 예측되었다. 특히 생물다양성 시나리오에서 산림 면적의 확대 폭이 가장 크게 나타나, 산림 중심의 토지이용 구조 강화가 이루어지는 것으로 해석된다.

초지는 기준연도 96.6만 ha에서 BAU 시나리오에서는 약 96.4만 ha로 거의 변동이 없는 것으로 나타난 반면, 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 각각 약 81.7만 ha, 77.7만 ha, 83.0만 ha로 예측되어 전반적으로 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 넥서스 시나리오에서 초지의 일부가 산림·습지 등 다른 토지이용 유형으로 전환되는 결과로 이해할 수 있다.

습지는 기준연도 14.6만 ha에서 BAU 시나리오에서는 약 12.2만 ha로 감소하였으나, 식량, 생물다양성 시나리오에서는 각각 약 14.7만 ha, 기후 시나리오에서는 약 14.5만 ha로 예측되어 기준연도와 비슷하거나 소폭 증가하는 수준을 보였다. 넥서스 시나리오에서는 습지의 유지·확대를 통해 수생·습지 생태계의 보전이 반영된 것으로 볼 수 있다.

나지는 기준연도 30.2만 ha에서 BAU 시나리오에서는 약 44.5만 ha로 크게 증가하는 반면, 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 각각 약 15.2만 ha, 11.3만 ha, 16.5만 ha로 예측되어 기준연도보다 낮은 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히 기후 시나리오에서 나지 감소 폭이 가장 크게 나타나, 산림·습지 등으로의 전환이 집중되는 결과를 보여준다. 수역은 모든 시나리오에서 약 24.4만 ha로 동일하게 유지되는 것으로 나타났다.

종합하면, 현재 추세를 반영한 BAU 시나리오에서는 시가화건조지역의 대규모 확대와 함께 산림·습지의 감소, 나지의 증가가 동시에 발생하는 반면, 식량·기후·생물다양성 넥서스에 기반한 세 개의 시나리오에서는 시가화 확대를 상대적으로 억제하고, 산림과 습지를 확대하는 동시에 나지를 축소하는 방향으로 2050년 토지이용 구조가 재편되는 것으로 요약할 수 있다.

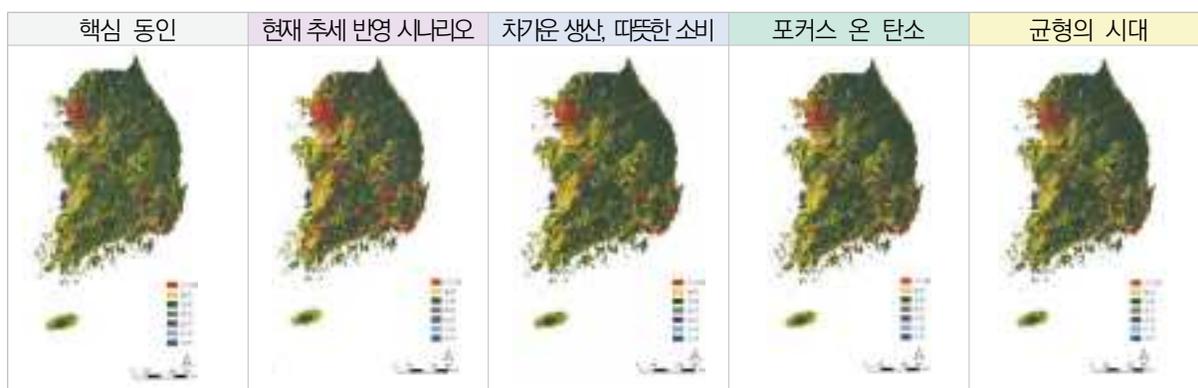


그림 3. 시나리오별 2050년 토지피복도 변화 예측

마) 시나리오별 생태계서비스 예측 결과

생태계서비스 예측은 Dyna-CLUE 모형에서 도출한 시나리오별 2050년 토지 피복도를 InVEST 모형군에 입력하여, 탄소 저장·흡수, 침식 및 퇴적물 조절(SDR), 연간 수자원 산출량(AWY), 영양염류 배출(NDR), 서식지 질(Habitat Quality) 등 5개 서비스를 대상으로 수행하였다.

(1) 탄소 저장·흡수(Carbon Storage and Sequestration)

탄소 저장 서비스는 토지이용 유형별 탄소 밀도(지상·지하 생물량, 고사목, 토양탄소)를 적용하여 격자별 탄소 저장량을 산정하고, 이를 합산하여 총량을 계산하였다. 2020년 기준 총 탄소 저장량은 약 972,346 Kt 수준이며, BAU 시나리오에서는 산림 감소와 시가화 확대의 영향으로 약 900,841 Kt로 가장 낮은 값을 보였다. 반대로 산림과 습지의 확대를 가정한 넥서스 시나리오에서는 모두 기준연도보다 탄소 저장량이 증가하였고, 특히 생물다양성 시나리오에서 약 1,001,132 Kt로 가장 높은 수준을 나타냈다.

(2) 침식 및 퇴적물 조절(Sediment Delivery Ratio, SDR)

퇴적물 배출량은 토지이용, 경사, 토양 특성에 따른 토양침식량과 하천 도달 비율(SDR)을 고려하여 산정하였다. 2020년 기준 총 퇴적물 배출량은 약 210,143 톤/년 수준으로 추정되었으나, BAU 시나리오에서는 산림 감소와 나지·농지 비중 증가의 영향으로 약 254,787 톤/년까지 증가하였다. 이에 비해 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 산림 확충과 나지 감소에 따라 퇴적물 배출량이 각각 약 122,008 톤/년, 111,391 톤/년, 117,905 톤/년 수준으로 크게 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 연간 수자원 산출량(Annual Water Yield, AWY)

InVEST 모형 특성상 증발산과 토양저류가 큰 산림·습지 지역에서는 수자원 산출량이 상대적으로 낮게, 불투수면 비중이 높은 시가화 지역에서는 높게 산정된다. 분석 결과, 2020년 기준 총 연간 수자원 산출량은 약 88,624 Mm³ 수준이며, BAU 시나리오에서는 시가화 및 불투수면 확대의 영향으로 약 92,026 Mm³로 가장 높은 값을 보였다. 반면 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 모두 약 87,166 Mm³에서 87,470 Mm³ 수준으로 감소하여, 산림·습지 확대에 따라 외부 유출량은 줄고 증발산·토양저류를 통한 수문 조절 기능이 상대적으로 강화되는 결과를 보였다.

(4) 영양염류 배출(Nutrient Delivery Ratio, NDR)

질소·인의 배출은 토지이용별 비점오염 발생계수와 토양·지형·토지피복 조건에 따른 하천 도달 비율을 고려하여 추정하였다. 2020년 기준 총 질소 배출량은 약 71,309 kg/yr, 인 배출량은 약 9,642 kg/yr 수준이며, BAU 시나리오에서는 시가화와 농업지역 구조 변화로 인해 질소·인 배출량이 각각 약 80,151 kg/yr, 12,157 kg/yr 수준으로 증가하였다. 이에 비해 생물다양성 시나리오에서는 산림·습지 확대와 나지·농경지 축소로 질소 약 67,617 kg/yr, 인 약 9,115 kg/yr로 가장 낮은 값을 보였고, 나머지 두 넥서스 시나리오 역시 기준연도와 유사하거나 다소 낮은 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

(5) 서식지 질(Habitat Quality)

서식지 질 지수는 토지피복별 서식지 적합도와 도로·시가화·집약농업 등 위협요인의 공간 분포, 위협에 대한 민감도 및 완충 효과를 반영하여 경관 수준에서 산출하였다(Natural Capital Project, 2025).

2020년 기준 서식지 질 경관지수는 약 5,366점이며, BAU 시나리오에서는 시가화 확장과 산림·습지 감소로 인해 약 5,293점으로 소폭 감소하였다. 반면 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 서식지 질이 크게 향상되어 각각 약 7,428점, 7,458점, 7,852점으로 예측되었으며, 특히 생물다양성 시나리오에서 가장 높은 서식지 질을 기록하였다.

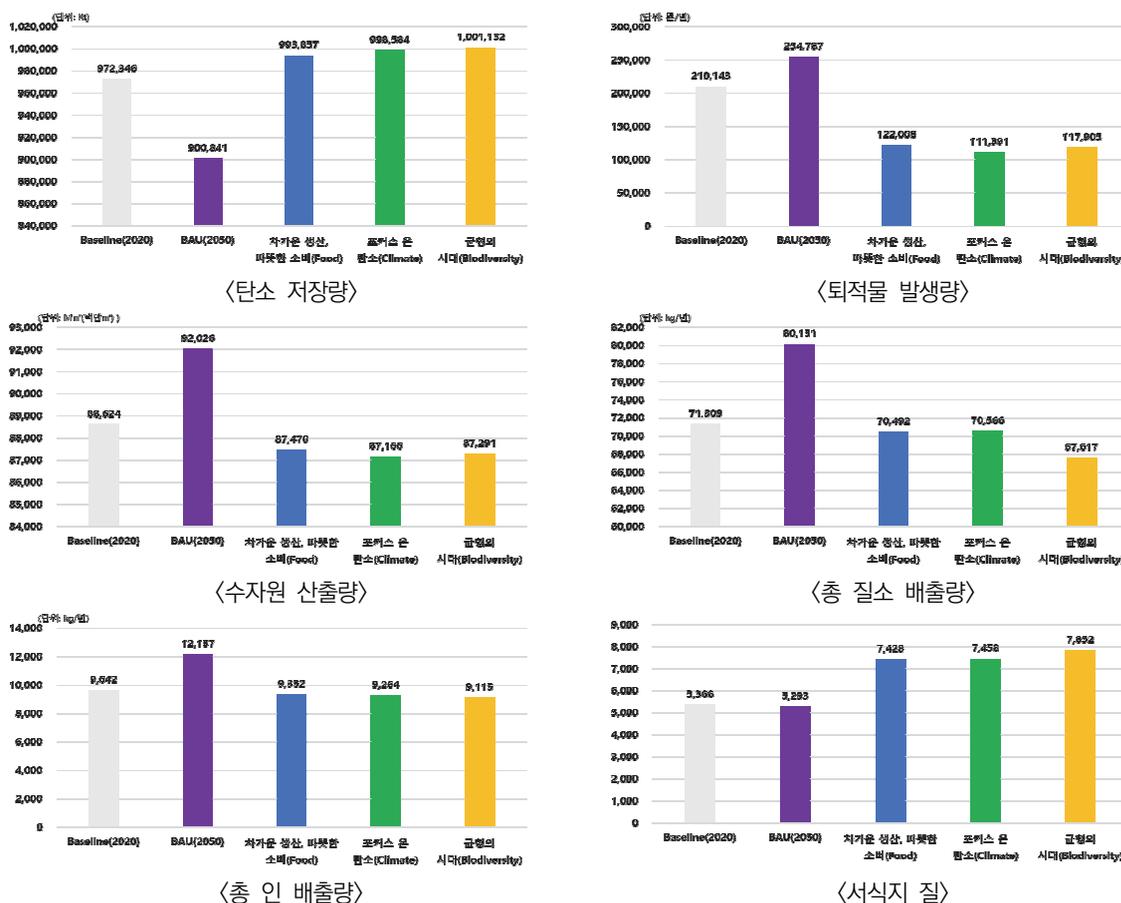


그림 4. 시나리오별 생태계서비스 예측 결과

각 시나리오가 제공하는 생태계서비스의 상대적 능력 수준을 비교한 결과는 <그림 5>와 같다. 여기서 능력은 탄소 저장량, 수자원 산출량, 침식·영양염류 저감 효과, 서식지 질 등 서비스별 예측값을 기준연도 및 BAU 시나리오와 비교했을 때 상대적으로 어느 수준에 위치하는지를 의미한다.

탄소 저장·흡수 능력의 경우, BAU 시나리오는 기준연도(2020년) 대비 총 탄소 저장량이 감소하여 가장 낮은 수준을 보였고, 세 개의 넥서스 시나리오는 모두 기준연도보다 높은 탄소 저장량을 나타냈다. 특히 산림·습지 확대를 전제로 한 생물다양성 시나리오에서 탄소 저장량이 가장 크게 증가하여, 탄소 저장·흡수 측면에서 가장 높은 생태계서비스 능력을 보이는 시나리오로 평가할 수 있다. 식량과 기후 시나리오는 생물다양성 시나리오에 비해서는 소폭 낮지만, BAU와 비교하면 모두 향상된 수준이다.

침식 및 퇴적물 조절능과 영양염류 저감능은 퇴적물·영양염류 배출량이 낮을수록 조절능이 높은 것으로 해석할 수 있다. 퇴적물 배출량과 질소·인 배출량 예측 결과를 비교하면, BAU 시나리오에서 두 지표가 모두 가장 높은 수준을 보여 침식 조절과 비점오염 저감능이 가장 낮은 상태로 나타난다. 반대로 산림·습지를 확충하고 나지·집약농업 비중을 줄인 기후와 생물다양성 시나리오에서는 퇴적물 및 질소·인 배출량이 크게 감소하여, 침식 조절 및 영양염류 저감 측면에서 가장 높은 수준의 생태계서비스 능력을 보이는 것으로 정리된다. 식량 시나리오는 두 시나리오와 비교할 때 다소 완화된 수준이지만, BAU에 비해서는 개선된 조절능을 유지하는 것으로 나타났다.

연간 수자원 산출량은 물 공급 서비스의 잠재력을 나타내는 지표로, 예측 결과 BAU 시나리오에서 가장 높은 값이 산정되었고, 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 모두 이보다는 다소 낮은 수준을 보였다. 이는 도시화와 불투수면 확대가 지속될 경우 외부 유출되는 물의 양이 증가하는 반면, 산림·습지 확대를 전제로 하는 넥서스 시나리오에서는 유출량이 상대적으로 줄어드는 결과를 반영한 것이다. 다만 본 연구에서는 수자원 산출량의 절대적인 크기뿐 아니라 다른 서비스와의 관계를 함께 고려하여, 이후 종합지수 분석에서 서비스 간 상대적 위치를 비교하였다.

서식지 질 지수는 생물다양성 보전과 서식지 유지 능력을 나타내는 지표로, BAU 시나리오에서는 기준연도보다 소폭 감소하여 서식지 질이 저하되는 것으로 나타난 반면, 식량, 기후, 생물다양성 시나리오에서는 모두 서식지 질이 크게 향상되었다. 특히 생물다양성 시나리오는 서식지 질 경관지수가 가장 높은 수준으로 예측되어, 생물다양성 측면에서 가장 큰 생태계서비스 능력을 제공하는 시나리오로 정리된다.

이와 같이, 시나리오별 생태계서비스 능력 예측 결과는 BAU 시나리오에서 탄소 저장, 침식·영양염류 조절, 서식지 질 등 대부분의 서비스 능력이 기준연도 대비 저하되는 반면, 세 개의 넥서스 시나리오에서는 정도의 차이는 있으나 전반적으로 향상되는 패턴을 보여준다. 특히 생물다양성 시나리오는 탄소, 침식 조절, 비점오염 저감, 서식지 질 등 주요 서비스에서 가장 높은 수준의 생태계서비스 능력을 보이는 것으로 요약된다.

구분	탄소저장능력	침식완화능력	수자원 보유 능력	NDR		우수한 서식지 질 제공 능력
				질소정화	인 정화	
기준연도 (2020)	-	-	-	-	-	-
현재 추세 반영 (BAU)	↓	↓↓	↓	↓	↓↓	-
차기운 생산 따뜻한 소비 (식량)	↑	↑↑	↑	-	↑	↑↑
포커스 온 탄소 (기후)	↑	↑↑	↑	-	↑	↑↑
균형의 시대 (생물다양성)	↑	↑↑	↑	↑	↑	↑↑

↓↓ 기준 대비 20% 이상 감소; ↓ 기준 대비 1~20% 감소; - 기준 대비 ±1% 변화; ↑ 기준 대비 1~20% 증가; ↑↑ 기준 대비 20% 이상 증가

그림 5. 시나리오별 생태계서비스 능력 예측 결과

바) 생태계서비스 종합지수 및 시나리오 비교

다섯 개 생태계서비스별 예측 결과를 종합 비교하기 위해, 각 서비스의 값을 Min-Max 방식으로 정규화하여 현재 추세 반영 시나리오(BAU) 대비 0~1 범위의 상대적 지수로 환산하였다. 기준 시나리오인 BAU는 모든 서비스에서 0의 값을 가지며, 각 넥서스 시나리오는 BAU 대비 향상 정도에 따라 서비스별 상대적 수준이 표현되도록 구성하였다.

정규화된 지수에 기반해 시나리오별 생태계서비스 능력을 비교한 결과, 모든 넥서스 시나리오가 BAU 시나리오보다 높은 생태계서비스 수준을 보였다. 특히 산림·습지 확대와 다양한 부문(탄소, 물, 토양·수질, 서식지)을 동시에 고려한 ‘균형의 시대(생물다양성)’ 시나리오는 다섯 가지 서비스 전반에 걸쳐 가장 높은

수준의 지수를 보여, 종합적인 생태계서비스 능력이 가장 큰 시나리오로 평가되었다.

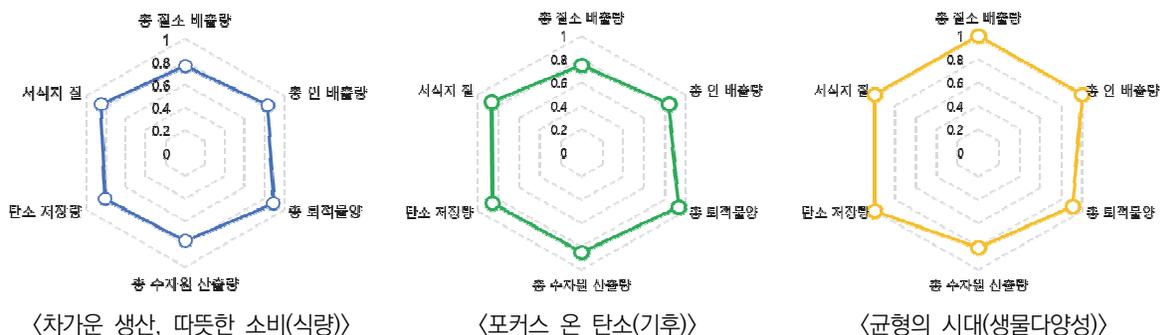


그림 6. 시나리오별 생태계서비스 능력 정규화 결과

마) 소결

요약하면, 과거 수십 년 동안 우리나라 토지이용은 시가화건조지역의 지속적 확대와 농업·산림지역의 감소라는 방향으로 변화해 왔으며, 이를 반영한 현재 추세(BAU) 시나리오에서는 2050년에도 도시 확장과 농업·산림·습지 축소가 지속되는 것으로 예측되었다. 반면, 넥서스에 기반한 식량, 기후, 생물다양성 세 개의 시나리오에서는 산림과 습지를 유지·확대하고 나지를 감소시키는 방향으로 토지이용 구조가 재편되는 것으로 나타났다.

InVEST 모형을 활용한 생태계서비스 예측 결과, BAU 시나리오에서는 탄소 저장량 감소, 퇴적물 및 영양염류 배출 증가, 서식지 질 저하가 공통적으로 나타난 반면, 넥서스 시나리오에서는 정도의 차이는 있으나 탄소 저장, 침식 조절, 비점오염 저감, 서식지 질 측면에서 기준연도 대비 개선 또는 유지되는 방향으로 나타났다. 특히 ‘균형의 시대(생물다양성)’ 시나리오는 탄소, 물, 토양·수질, 생물다양성 등 주요 서비스 전반에서 가장 높은 수준의 향상 효과를 보였으며, 정규화된 종합 지수에서도 다른 시나리오보다 우위에 있는 것으로 평가되었다.

3) 결론 및 제언

가) 연구 결론

본 연구는 2024년 선행연구에서 구축된 넥서스 시나리오를 토대로, 토지이용 예측 모형(Dyna-CLUE)과 생태계서비스 예측 모형(InVEST)을 연계함으로써 2050년까지의 토지이용 변화와 이에 따른 생태계서비스 능력 변화를 일관된 체계 안에서 비교·분석하였다. 그 결과, 시나리오별 토지이용 경로와 생태계서비스 응답 특성이 뚜렷이 구분되며, 기후·식량·생물다양성 간 상호작용을 통합적으로 고려하는 정책 시나리오가 장기적으로 가장 높은 생태계서비스 수준을 확보한다는 점이 확인되었다.

첫째, 토지이용 측면에서 현재 추세를 반영한 시나리오(BAU)는 2050년까지 시가화건조지역의 상당한 확대와 농업·산림·습지의 순감소를 초래하는 경로를 보였다. 특히 시가화건조지역은 기준연도 대비 크게 증가하는 반면, 산림과 습지는 전반적으로 축소되어, 도시 확산과 인구·경제 활동의 공간 집중이 생태계 기반의 완충·조절 능력을 약화시키는 방향으로 작동함을 시사한다.

둘째, “차가운 생산, 따뜻한 소비(식량)” 시나리오는 인구 감소, 지방 인구 구조 변화, 식생활 전환을

반영하여 농업지역이 다소 축소되지만, 유기농업 확산과 습지 복원을 결합하는 정책 흐름 하에서 습지 면적이 크게 늘어나는 경로를 보여준다. 이는 식량 생산의 절대량 확대보다는 생산 방식의 전환과 오염 저감을 중시할 경우, 농업지역의 면적 감소와 동시에 수질·서식지 관련 생태계서비스를 향상시킬 수 있음을 시사한다.

셋째, “포커스 온 탄소(기후)” 시나리오는 탄소중립을 위한 에너지 전환과 조림·간벌·목재 활용 정책이 강화되는 상황을 가정하며, 산림 면적이 크게 확대되는 대신 일부 습지·농지의 조정이 발생하는 경로를 보인다. 이 시나리오에서는 탄소흡수원 확충을 목적으로 한 산림 확대 효과가 두드러지며, 탄소 저장·흡수 서비스는 크게 개선되는 반면, 재생에너지 인프라 설치와 집중적 토지이용 전환이 특정 지역에서 다른 생태계서비스(예: 서식지 연결성, 비점오염 저감)에 부담을 줄 가능성이 제기된다.

넷째, “균형의 시대(생물다양성)” 시나리오는 보호지역 확대, 산림 복원, 선순환적 산림·농지 관리, 도시 확산 억제 등을 함께 추구하는 경로로 설정되었다. 토지이용 예측 결과, 산림과 습지가 크게 증가하고 농업지역은 기능 전환을 통해 면적이 축소되면서, 전반적인 토지이용 구조가 기후·생물다양성·식량·건강 간 균형을 지향하는 모습으로 재편되는 것으로 나타났다.

생태계서비스 예측 결과를 종합하면, 2050년 기준 시나리오별 토지피복도와 InVEST 모형군(탄소 저장·흡수, 침식 및 퇴적물 배출, 수자원 산출량, 영양염류 배출, 서식지 질)을 연계한 분석에서, BAU 시나리오는 대체로 탄소 저장능과 서식지 질의 감소, 퇴적물 및 영양염류 배출 증가, 일부 유출량 변화 등 부정적 경향을 보였다. 반면, “포커스 온 탄소(기후)” 시나리오는 탄소 저장능이 크게 향상되지만, 에너지 인프라 및 집약적 토지이용으로 인해 침식·수질·서식지 측면에서 충분한 개선을 보장하지 못하는 것으로 나타났다.

“차가운 생산, 따뜻한 소비(식량)” 시나리오는 농업 관행 변화와 습지 복원을 통해 영양염류 배출과 서식지 질 측면에서 BAU 대비 뚜렷한 개선을 보이며, “균형의 시대(생물다양성)” 시나리오는 탄소 저장능, 침식 조절, 수질 조절, 서식지 질 등 대부분의 생태계서비스 지표에서 가장 높은 개선 폭을 보이는 시나리오로 나타났다.

시나리오별 생태계서비스 예측값을 정규화하여 종합지수로 비교한 결과, 모든 서비스에서 균일하게 우수한 시나리오는 존재하지 않으나, “균형의 시대(생물다양성)”는 대체로 높은 수준의 생태계서비스를 고르게 확보하는 반면, BAU는 거의 모든 항목에서 기준연도 대비 악화되는 방향을 보였다. “포커스 온 탄소(기후)”는 탄소 중심의 성과는 탁월하지만 다른 서비스와의 트레이드오프가 발생하고, 「차가운 생산, 따뜻한 소비」는 농업·식생활·환경 간 균형을 추구함으로써 수질·서식지 등에서 개선 효과를 보이되, 일부 서비스에서는 극적인 향상보다는 완만한 개선에 그치는 것으로 나타났다.

나) 정책 및 관리 제언

연구 결과는 토지이용 및 생태계서비스의 장기 예측을 통해 기후·식량·생물다양성 정책 간의 상호작용과 시너지, 그리고 잠재적 상쇄 관계를 구체적인 공간정보와 정량 지표로 가시화할 수 있음을 보여준다. 이를 바탕으로 다음과 같은 정책 및 관리 방향을 제안할 수 있다.

첫째, 탄소중립 정책은 에너지 기술 혁신과 더불어 산림·습지·초지 등 탄소흡수원 생태계의 보전·복원 정책과 체계적으로 연계되어야 한다. “포커스 온 탄소(기후)” 시나리오와 “균형의 시대(생물다양성)” 시나리오를 비교하면, 두 시나리오 모두 산림 확대를 통해 탄소 저장능을 개선하지만, 후자의 경우 보호지역 확대, 산림

복원, 생태적 산림경영을 병행함으로써 탄소저감과 생물다양성 보전을 동시에 달성하는 경로를 제시한다. 이에 따라 탄소흡수원 중심의 자연기반해법을 기후정책의 핵심 수단으로 재위치시키고, 재생에너지 인프라 입지 선정 시 서식지 단편화와 침식·수질 영향까지 함께 고려하는 공간계획이 필요하다.

둘째, 기후재난과 토양·수질 악화에 대응하기 위해 산림·습지·수변 생태계의 보전·복원을 기후적응 정책과 연계하는 것이 중요하다. 산림 감소와 시가화 확대는 침식 및 퇴적물 배출 증가, 영양염류 유출 확대를 통해 수질 및 하류 생태계에 부담을 준다. “균형의 시대(생물다양성)” 시나리오에서 확인된 바와 같이, 보호지역 확대 및 산림·습지 복원은 침식 조절과 수질 개선, 서식지 질 향상에 동시에 기여하므로, 홍수·산사태·조류발생 등 기후·물 재난 대응 전략에 자연기반해법을 보다 적극적으로 통합할 필요가 있다.

셋째, 건강·식량·생물다양성 넥서스를 고려한 농업·식품 및 산업정책의 전환이 요구된다. “차가운 생산, 따뜻한 소비(식량)” 시나리오는 유기농업 확산, 비점오염 저감, 습지 복원 등을 결합할 경우, 농지 면적 감소에도 불구하고 수질 및 서식지 관련 생태계서비스를 크게 개선할 수 있음을 시사한다. 이는 단기 생산 효율성만을 중시하는 농업 및 산업 구조에서 벗어나, 농업의 에너지·물·질소 집약도를 낮추고, 식생활·소비 패턴의 변화를 유도하는 정책 패키지가 필요함을 의미한다.

다) 연구 활용 방안 및 향후 과제

(1) 국가 생태계 평가 및 정책평가에서의 활용

본 연구에서 구축한 넥서스 시나리오-토지이용-생태계서비스 연계 모형은 향후 국가 차원의 생태계서비스 평가 및 관련 정책 수립에서 다음과 같이 활용될 수 있다.

첫째, 국가·광역·기초 단위의 중장기 생태계·환경계획 수립 시, 기후·식량·생물다양성·건강 간 상호작용을 반영한 시나리오 세트를 제공하는 도구로 활용될 수 있다. 기존의 단일 부문 중심 시나리오와 달리, 본 연구의 넥서스 시나리오는 인구·경제, 에너지·농업, 보호지역·국제협력, 사회적 신뢰·제도 신뢰 등 다양한 동인의 결합을 통해 정책 조합별 미래 경로를 묘사한다. 이를 통해 생태계서비스의 변화 양상을 사전에 검토하고, 정책 패키지별로 기후, 수자원, 토양·수질, 서식지 등의 성과를 비교하는 데 활용할 수 있다.

둘째, 생태계서비스 평가가 이미 이루어진 국가·지역·사업 단위(예: 생태계서비스지불제, 환경영향평가 대상사업 등)에서, 현재 평가 결과를 장기 전망과 연계하는 기반 자료로 사용할 수 있다. 발표 자료에서 언급된 바와 같이, 우리나라는 국가·지역·사업지역 수준에서 생태계서비스 평가가 축적되어 있으나, 미래 변화에 대한 예측은 상대적으로 부족하다. 본 연구의 모형을 활용하면, 기존의 평가 결과를 기준연도로 설정하고, 다양한 정책·사회 경제 경로에 따른 2050년 생태계서비스 전망을 제공함으로써, 평가-예측-피드백의 순환 구조를 구축할 수 있다.

셋째, 시나리오 기반 생태계서비스 예측 결과는 국민·이해관계자에게 기후·식량·생물다양성 간 연계를 직관적으로 전달하는 커뮤니케이션 도구로 활용될 수 있다. 예를 들어, 각 시나리오별 토지이용 변화 지도와 생태계서비스 종합지수를 함께 제시하면, 특정 정책 선택이 장기적으로 어떠한 환경·사회적 결과를 낳는지 시각적으로 설명하기 용이하다. 이는 ‘변화하지 않을 경우(BAU)’와 ‘전환을 선택할 경우(넥서스 시나리오)’의 차이를 이해시키는 데 중요한 자료가 될 수 있다.

향후 과제로는 다음과 같은 점을 들 수 있다. 첫째, 본 연구에서는 건강 및 물 분야에 해당하는 일부 넥서스 시나리오를 모형화하지 못했으며, 총 5개 생태계서비스(Carbon Storage, SDR, AWY, NDR, Habitat Quality)만을 대상으로 예측을 수행하였다. 이는 국가 전체의 생태계서비스 미래를 충분히 대표하기에는 제한적이므로, 향후 연구에서는 생태계서비스 항목과 예측 모형을 확대하여 문화서비스, 도시 기후조절, 수산·해양 생태계서비스 등으로 범위를 넓힐 필요가 있다.

둘째, 토지이용 예측 모형의 적합성 분석에서 토지 유형별 예측 성능 편차가 확인된 만큼, 모형 구조와 입력자료의 개선이 요구된다. 특히 농업지역·습지·초지 등 변화가 동태적인 토지 유형의 경우, 보다 고해상도의 사회·경제·정책 변수와 결합한 모형 고도화가 필요하다.

셋째, 생태계서비스 예측 모형에 대한 민감도 및 불확실성 분석을 체계적으로 수행하여 결과의 신뢰도를 정량적으로 제시할 필요가 있다. 현재 연구에서는 모형 구조와 입력 파라미터를 선행연구 및 전문가 자문에 기반하여 설정하였으나, 파라미터 변화에 따른 결과 변동을 분석하고, 정책결정자가 결과의 불확실성을 함께 인지할 수 있도록 신뢰구간, 시나리오별 민감도 지표 등을 추가로 제시하는 것이 바람직하다.

넷째, 국가·지역별 기존 정책과의 정합성을 높이기 위해, 본 연구에서 도출된 넥서스 시나리오를 국정과제, 중장기 환경·기후·농업계획과 연계하는 후속 연구가 요구된다. 넥서스 접근은 다양한 이해관계자가 적용할 수 있는 대응 옵션과 거버넌스 모형과 함께 논의될 때 정책적 실효성이 높아진다.

마지막으로, 본 연구에서 구축한 모형과 결과를 기반으로, 국가 생태계 평가 보고서(이하 국가 보고서)와의 연계, 부문별 정책 시나리오 평가, 지방자치단체 수준의 상세 시나리오 개발 등으로 확장해 나가는 것이 필요하다. 이를 통해 본 연구가 우리나라 생태계서비스 장기 전망과 정책 전환을 뒷받침하는 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services(IPBES). (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. IPBES Secretariat.
- Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services(IPBES). (2024). Thematic assessment report on the interlinkages among biodiversity, water, food and health. IPBES Secretariat.
- Kok, K., Pedde, S., Gramberger, M., Harrison, P. A., & Holman, I. P. (2019). New European socio-economic scenarios for climate change research. *Regional Environmental Change*, 19, 643–654.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.
- Mulligan, M. (2013). WaterWorld: A self-parameterising, physically based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. *Hydrology Research*, 44(5–6), 748–769.
- Natural Capital Project. (2025). InVEST (Version 3.17.1) [Software].
- O'Neill, B. C., Carter, T. R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., ... Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, 10(12), 1074–1084. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>.
- Rounsevell, M. D. A., & Metzger, M. J. (2010). Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment. *WIREs Climate Change*, 1(4), 606–619.
- Verburg, P. H., & Overmars, K. P. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling. *Landscape Ecology*, 24(9), 1167–1181.

생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립

부록

생태계서비스 주제 평가를 위한 외래종 국내 자료 분석 연구

1. 생태계서비스 주제 평가_외래종

가. 연구배경 및 필요성

- IPBES 생태계서비스 평가 중 가장 중요하게 여기는 주제 평가 중 하나로 외래종의 침입을 선정하여 생태계서비스 평가 보고서를 발간
- 외래식물은 생태계 교란을 통해 고유종 서식지 위협을 야기하고 있어, 범지구적 생물다양성 감소문제로 이어짐(Houlahan and Findlay, 2004; Hejda et al., 2009; Davies, 2011; Powell et al., 2013; Mollot et al., 2017)
- 이에 생물다양성 보전목표 달성을 위한 국제적 아젠다 이행요구(CBD, 2025)
 - * 쿤밍-몬트리올 글로벌프레임워크(Goal A/Target 3) '생물다양성 보호를 위한 서식처 보호지역 최소 30% 이상 지정'에 따른 서식처 단위의 보전전략과 동시에 서식처 단위의 연구 분석 필요
 - * 쿤밍-몬트리올 글로벌프레임워크(Goal A/Target 6) '침입 외래종의 생물다양성에 대한 영향 최소화 필요' 항목이 새롭게 추가됨으로써, 국가단위의 외래종의 생물다양성 동태와 현황, 관리가 필요
- 국내 국가생물다양성전략(2024-2033)에서 다양한 생물다양성 지표를 이용한 외래종의 영향을 평가할 것을 제안 (환경부, 2023)
- 외래식물 관련 기존 연구는, 특정 종의 환경영향 연구가 대부분으로(Lim and Hwang, 2006; Lim et al., 2009; Lee et al., 2011), 서식지 보전 및 생태계서비스와 관련된 과학적 근거자료 보완 필요(Rai and Singh, 2020; Koo and Park, 2021; UNECE, 2024; CBD, 2025)
- 기존 생물다양성 평가는 알파다양성(개체군)과 베타다양성(두 서식지) 연구가 주로 수행되었으며, 현재는 국가단위 등 광범위한 서식지 생물다양성 차이를 측정하는 지표로 제타다양성 연구가 부각중(McGeoch et al., 2017; Latombe et al., 2018; McGeoch et al., 2019; Hui and McGeoch, 2014)
- 이러한 측면에서 외래식물의 제타다양성 연구는 지속가능한 서식처 관리를 위한 과학적 근거자료 제공
- 또한 국내 빅데이터 플랫폼 구축에 따른 활용으로 생태계 가치 증진을 위한 사례 연구로써 기관 역할 수행

나. 연구범위

국내에 분포하는 외래식물을 대상으로 국가 단위의 공간 범위에서 생물다양성 변화와 서식처 간 영향 구조를 분석하였다. 분석에 활용한 식물상 자료는 전국자연환경조사 3·4·5차년도 및 기타 문헌·조사자료를 통합하여 구축하였으며, 환경자료는 2019년 이후의 토지피복도, 정밀토양도, 기후·인구 통계 등 다양한 공간자료를 조합하여 동일한 격자 또는 행정단위로 표준화하였다. 외래식물 출현기록은 종 동정 검토와 중복 제거 등 전처리 과정을 거쳐 GIS 기반 공간데이터로 변환하였다.

우선, 국내 외래식물의 분포현황을 파악하고 주요 환경요인과의 관계를 확인하기 위해 경관생태학적 분석을

수행하였다. 출현빈도와 서식 범위를 고려해 제너럴리스트 외래식물을 선별하고, 강수량·평균기온·인구밀도 등 환경요인과의 연계성을 분석하였다. 또한 공간단위별 알파다양성(종풍부도)을 계산하여 환경구배와의 상관성과 주요 영향요인을 도출하였다.

서식처 간 종 구성의 유사성과 공간적 영향 구조를 파악하기 위해 제타다양성(zeta diversity) 분석을 실시하였다. 제타 차수별 공유 종 수를 기반으로 제타다양성 지수를 도출하고, 지수 감소 패턴을 통해 외래식물 분포의 공간적 결집도와 서식처 연결성을 평가하였다. 이를 바탕으로 유사한 분포 유형을 보이는 지역군을 도출하고, 서식처 간 상관관계를 비교하였다.

아울러 외래식물 종교체(species turnover)에 영향을 미치는 환경요인을 규명하기 위해 MS-GDM(Multi-site Generalised Dissimilarity Modelling)을 적용하였다. 종교체 지수와 환경변수·거리변수를 결합한 회귀 모델을 구축하였으며, I-splines 및 GAMs(Generalised Additive Models)를 활용하여 비선형 반응구조를 추정하였다. 이를 통해 외래식물 종교체를 유발하는 주요 환경구배와 임계값을 도출하여, 외래식물의 생물다양성 영향과 공간적 취약지역을 파악하였다.

최종적으로 도출된 외래식물 분포특성, 제타다양성 구조, 종교체 영향요인을 종합해 국내 외래식물의 생태적 지위와 잠재적 생태계서비스 영향 가능성을 해석하였다. 본 연구의 결과는 외래식물 관리·보전의 과학적 근거를 제공하며, 향후 국가 단위 식물조사 기반의 생태계서비스 평가 및 지도화 작업을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

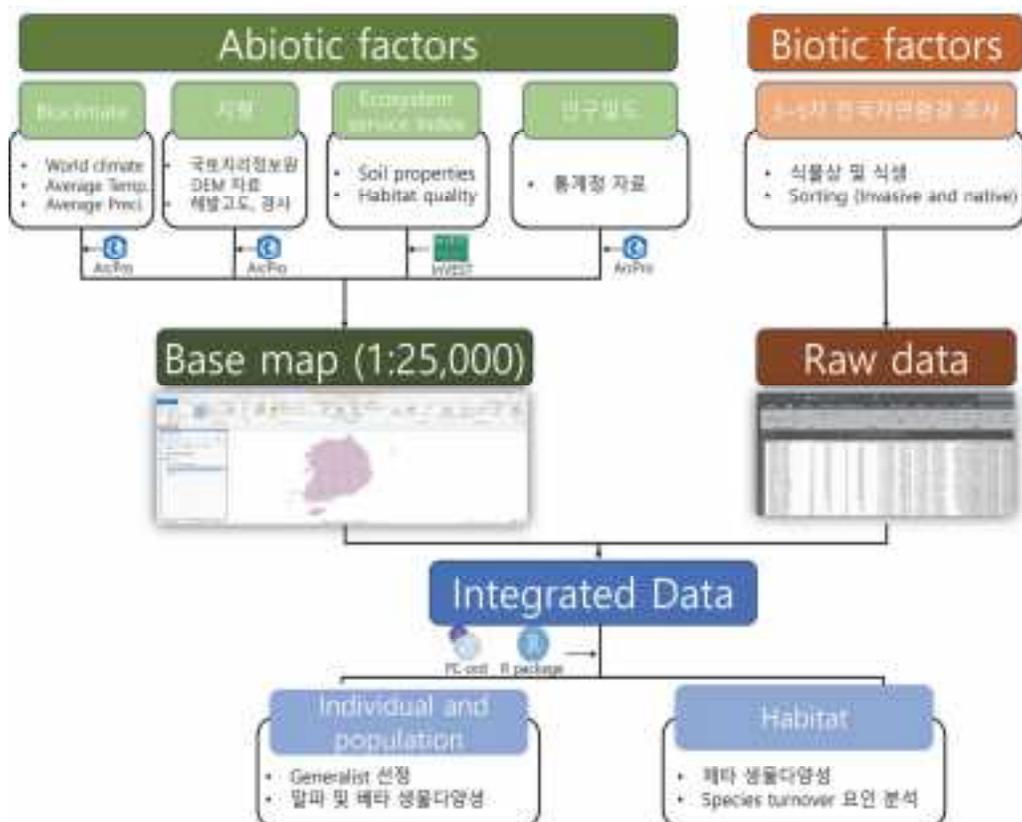


그림 1. 연구 분석과정 모식도

다. 연구 방법

1) 국내 외래식물 분포현황 및 환경요인의 경관생태학적 분석

- 생물적 요인 데이터베이스 구축
 - : 전국자연환경조사 (3~5차) 및 기타 식물상 자료 구축
 - : 800도엽 격자 내 식물상 분포 Spatial join을 통한 메타데이터 구축
 - : 기후에너지환경부 지정 외래식물 및 생태계교란종 확인 및 추출
- 비생물적 요인 데이터베이스 구축
 - : InVEST를 통한 전국대상 서식처질, 토양침식, 수량공급, 조류다양성의 추출 후, 800격자 내 평균값 산출
 - : Worldclim 내 평균기온, 최고 및 최저기온, 강수량 등 추출
- 외래식물의 생태적 지위 분포와 제너럴리스트 선정
 - : 외래식물 알파다양성과 환경요인간의 상호관계
 - : Levin(1968)이 제안한 국내 외래식물 제너럴리스트 방법 사용

2) 제타다양성 분석을 통한 외래식물 서식처간 영향 형태 파악

- 격자별 공간정보(UTM 좌표) 추출 및 각 도엽별 식물 출현 데이터 구축
- 제타다양성 감소 그래프 및 제타 비율 분석
- 생태학적 변화 과정 확인 및 종교체 경향 분석
- 외래식물 및 특산식물의 종풍부도 핫스팟 서식처간 생태적 지위 비교

3) 외래식물 종교체(species turnover)에 영향을 미치는 요인 도출

- MS-GDM(Multi-site generalised dissimilarity modeling) 도출 및 제타차수에 따른 환경요인 상관성 분석
- 특산식물 서식처 비교분석

라. 연구 결과

1) 국내 외래식물 분포현황 및 환경요인의 경관생태학적 분석

가) (생물요인) 격자별 식물상 데이터 구축

- 기후에너지환경부 지정 외래식물 및 생태계교란식물 목록 추출하여 총 425분류군 확인
- 전국자연환경조사 3~5차, 기태 식물상 자료 등 식물 데이터를 전체적으로 취합하여, 800격자 내 도엽내 식물상 데이터 도입
- Arcpro 내, 'Spatial join' 툴을 이용하여, 도엽 내 식물상 데이터 추출
- 각 격자별 종풍부도 도출 및 외래식물 수 확인
- 외래식물과의 비교를 위한 전체종 및 특산식물의 종풍부도 도출 완료

나) (비생물요인) 격자별 대기 및 지형환경과 생태계서비스 평가 지도 구축

- 외래식물의 분포에 영향을 미치는 영향을 크게 3가지 카테고리로 구분

표 1. 외래식물 지형환경과 생태계서비스 상관관계 요인 목록

지형조건	기후조건	생태계서비스 지표
경사도, 해발고도	일사량, 강수량, 온도	인구밀도, 서식처질, 수량공급, 토양침식, 조류다양성

- 식물종의 분포의 영향을 미치는 기본 요건인 지형조건 및 기후조건에 대하여 SRTM 자료 및 worldclim (bio 1, bio 12, Solar radiation)을 삽입, 800격자 내 공간정보 추출
- 서식처 유지 기능이 낮은 지역에서 역설적으로 외래종 노출이 증가함(Gallardo et al., 2024)
- 서식처 질(예: 서식지 연속성, 토지피복 구조, 생태계서비스 제공 수준과 같은 지표)은 외래식물 분포와 명확히 상관관계를 가지며, 특히, 서식처 유지(habitat maintenance) 생태계서비스가 약한 지역—서식처 파편화, 인구밀도 높은 지역 등 환경교란이 큰 지역—에서 외래식물 침입 가능성이 높아지는 경향이 있음(Grzedzicka, 2023).
- 외래식물의 열매 등 먹이자원의 가용성 및 shelter로의 이용 등으로 외래식물의 분포와 조류의 종풍부도간의 상관관계가 미친다는 선행연구 결과가 있음(Gallinat et al., 2020; Grzedzicka, 2022; Grzedzicka et al., 2024).

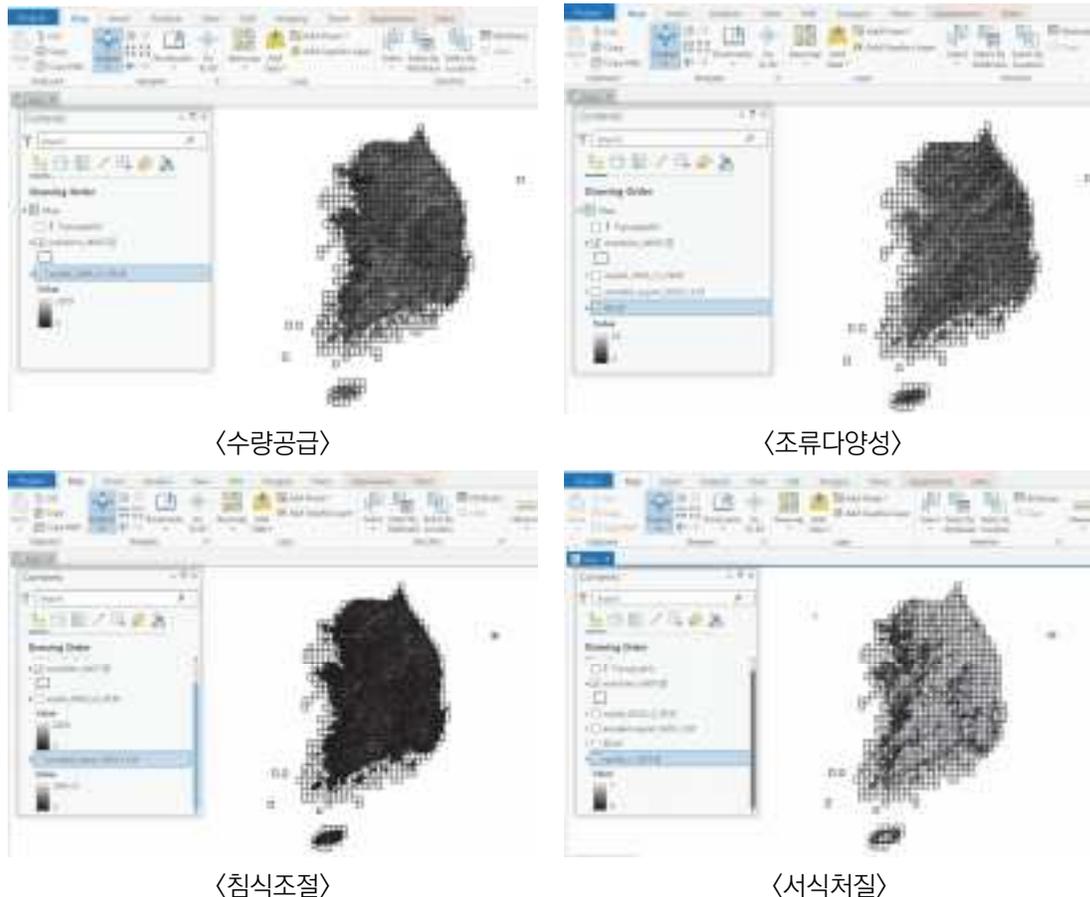


그림 2. 800격자 내 생태계서비스 지수 추출

다) 외래식물의 종풍부도와 환경요인 간의 관계 분석

- 종속변수는 외래식물, 전체종, 특산식물의 종풍부도로 각각 진행하였으며, 각 독립변수는, 일사량, 평균기온, 평균강수량, 평균경사도, 평균해발, 인구밀도, 서식처질, 수량공급, 토양침식, 조류다양성으로 진행하였음.
- 잔차의 독립성 가정을 통하여 회귀분석의 검증력에 대한 인정을 확인하고자 하였으며, 분석 시 Durbin-Watson test를 수행하였으며, 각 항목이 1.621~1.673의 분포를 보이므로, 잔차의 독립성 가정을 만족하는 수준으로 확인.

표 2. 다중회귀분석에 따른 Durbin-Watson 검증 결과

항목	R 제곱	조정된 R 제곱	Durbin-Watson
외래식물	0.393	0.386	1.673
전체식물	0.301	0.293	1.621
특산식물	0.583	0.578	1.666

- 다중회귀분석 결과, 각 식물항목의 종풍부도와 독립변수 간의 유의차가 있는 요인은 각각 다른 것으로 분석되었음.
- 외래식물의 경우 평균기온, 평균경사도, 평균해발고도, 서식처질, 조류다양성에서 통계적 유의성이 인정되었음.
- 본 분석 결과를 토대로, 외래식물의 제너럴리스트 선정에 있어 생태적 지위 분포 요인으로 총 5개의 요인으로 분석.

표 3. 외래식물과 환경요인 및 생태계서비스 지수 간 다중회귀분석 결과(F=51.158, $p < 0.0001$)

	독립변수	베타	통계량	p-value	VIF
종속변수	상수	42.266	2.178	0.030	-
	일사량	0.002	-0.233	0.816	2.023
	평균기온	4.867	4.391	0.000	4.731
	평균강수량	0.009	0.839	0.402	2.818
	평균경사도	4.254	14.629	0.000	5.630
	평균해발	-0.040	-3.693	<0.05	7.255
외래식물 종풍부도	인구밀도	3.755E-06	0.866	0.387	1.280
	서식처질	-77.710	-8.296	<0.05	4.252
	수량공급	-0.016	-1.270	0.204	2.873
	토양침식	-0.110	-1.531	0.126	4.135
	조류다양성	0.585	2.996	0.003	1.502

표 4. 전체식물과 환경요인 및 생태계서비스 지수 간 다중회귀분석 결과(F=34.054, $p < 0.0001$)

종속변수	독립변수	베타	통계량	p-value	VIF
전체 종풍부도	(상수)	-199.659	-1.612	0.107	-
	일사량	0.028	2.131	0.033	2.023
	평균기온	26.793	3.786	<0.05	4.731
	평균강수량	0.253	3.703	<0.05	2.818
	평균경사도	16.637	8.963	<0.05	5.630
	평균해발	0.229	3.306	0.001	7.255
	인구밀도	-2.398E-05	-0.866	0.387	1.280
	서식처질	-120.601	-2.017	0.044	4.252
	수량공급	-0.196	-2.500	0.013	2.873
	토양침식	-0.150	-0.327	0.744	4.135
	조류다양성	4.111	3.296	0.001	1.502

표 5. 특산식물과 환경요인 및 생태계서비스 지수 간 다중회귀분석 결과(F=110.531, $p < 0.0001$)

종속변수	독립변수	베타	통계량	p-value	VIF
특산식물 종풍부도	(상수)	-10.594	-2.524	0.012	-
	일사량	0	-0.508	0.611	2.023
	평균기온	0.180	0.752	0.452	4.731
	평균강수량	0.009	3.912	<0.05	2.818
	평균경사도	0.097	1.544	0.123	5.630
	평균해발	0.023	9.710	<0.05	7.255
	인구밀도	2.631E-07	0.280	0.779	1.280
	서식처질	2.053	1.013	0.311	4.252
	수량공급	-0.007	-2.495	0.013	2.873
	토양침식	0.039	2.496	0.013	4.135
	조류다양성	0.026	0.616	0.538	1.502

라) 외래식물의 제너럴리스트 선정

- 각 외래식물의 출현빈도를 중심으로 Levin의 생태적 지위 지수 산정
- 외래식물의 종풍부도를 종속변수로 한 다중회귀분석에서 유의차가 인정되었던 5개의 환경구배로 두어 7개 그룹의 분위수(Quantile)로 지정
- 800격자 내 출현에 따른 상대빈도 적용

표 6. 제너럴리스트 산정을 위한 환경구배의 수치 범위

Index	Temperature	Slope	Altitude	HQ	Bird_SR
Q1	6.6911-8.0082	0.0543-3.8024	0.0802-142.7904	0.0000-0.1384	0.0000-6.5249
Q2	8.0082-9.3254	3.8024-7.5505	142.7904-285.5006	0.1384-0.2768	6.5249-13.0499
Q3	9.3254-10.6425	7.5505-11.2986	285.5006-428.2107	0.2768-0.4152	13.0499-19.5748
Q4	10.6425-11.9596	11.2986-15.0467	428.2107-570.9209	0.4152-0.5536	19.5748-26.0998
Q5	11.9596-13.2767	15.0467-18.7948	570.9209-713.6311	0.5536-0.6921	26.0998-32.6247
Q6	13.2767-14.5938	18.7948-22.5429	713.6311-856.3413	0.6921-0.8305	32.6247-39.1497
Q7	14.5938-15.9110	22.5429-26.2910	856.3413-999.0515	0.8305-0.9689	39.1497-45.6746

- 총 425분류군의 외래식물 중에서, IPBES(2023)에서 정의한 침입외래식물(invasive alien plant)의 개념을 도입하여, 기후에너지환경부에서 정의한 침입외래식물 목록으로 정의
- 전국자연환경조사 데이터에서는 총 140종의 침입외래식물이 조사되었으며(부록 참조), 각 해당종의 Levin 지수를 산출하여, 상위 5%종을 국내 침입외래식물의 제너럴리스트, 하위 5%종을 제너럴리스트로 정의 각 7종씩 총 14종 선정.

표 7. 국내 외래식물의 제너럴리스트(상위 1%) 항목

식물명	temp	slope	alt	HQ	bird	frequency	result	비고
개망초	0.6444	0.9128	0.4581	0.6837	0.3751	0.9563	0.6717	G1
망초	0.6416	0.9116	0.4563	0.6823	0.3765	0.9563	0.6708	G2
달맞이꽃	0.6381	0.9137	0.4661	0.6822	0.3687	0.9438	0.6688	G3
토끼풀	0.6415	0.9131	0.4659	0.6866	0.3642	0.9413	0.6688	G4
서양민들레	0.6359	0.9132	0.4716	0.6812	0.3693	0.9338	0.6675	G5
미국가막사리	0.6335	0.9107	0.4689	0.6808	0.3635	0.9263	0.6640	G6
아까시나무	0.6240	0.9013	0.4550	0.6741	0.3736	0.9125	0.6567	G7
구주갈퀴덩굴	0.4286	0.2571	0.2571	0.2571	0.1429	0.0038	0.2244	S7
큰백령풀	0.1429	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.0025	0.2147	S6
개사탕수수	0.2857	0.1429	0.1429	0.2857	0.1429	0.0025	0.1671	S5
산방백운풀	0.1429	0.1429	0.1429	0.2857	0.2857	0.0025	0.1671	S4
모래냉이	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0025	0.1195	S3
민털비름	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0013	0.1193	S2
열대방동사니	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0013	0.1193	S1

*G: 제너럴리스트, S: 스페셜리스트, 알파벳 뒤 숫자는 각 항목의 순위를 나타냄, 제너럴리스트는 result 생태적지위폭의 result가 높은 순대로, 스페셜리스트는 그 반대의 경우로 정의함.

마) NMDS를 통한 공간 배열 분석

- 제너럴리스트 및 스페셜리스트 그룹의 NMDS 분석으로 2차원상 공간분포 배열 확인
- 생태 분석의 적절성 파악을 위하여, 2차수 real data의 stress지수 확인 결과, 17.951로 20미만의 수치로 나타나 양호하면서, 신뢰성 있는 생태 데이터

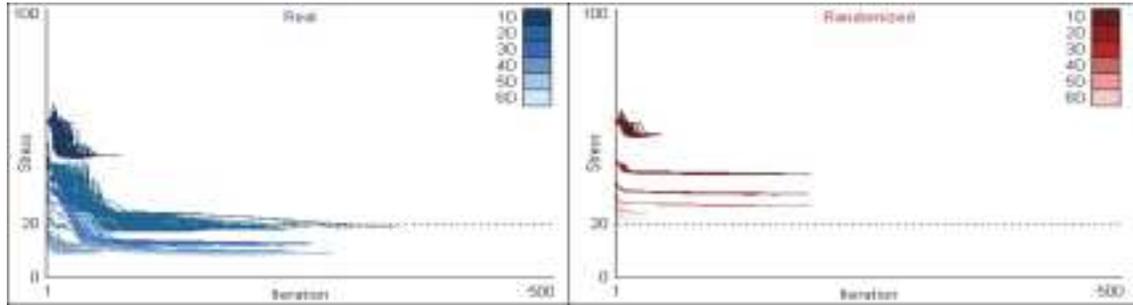


그림 3. NMDS이후 분석 차원별 데이터 stress 검증 그래프

- 제너럴리스트 및 스페셜리스트 14종에 대한 Hilltop 분석
- 1축의 설명력은 0.416, 2축의 설명력은 0.257로 종합설명력 0.673으로 나타났음
- 이는 NMDS와 같은 2차원상 공간 상에서 특정 종의 출현 분포와 종조성을 기반으로 contour mapping을 통해 종별 공간의 점유 패턴을 확인하는 방법임
- 이는 각 종들의 종조성 특성과 공간적 또는 생태적 지위의 경향성을 시각적으로 해석할 수 있음
- 분석결과 제너럴리스트의 경우 좌측상단부에 모든 식물종이 한 공간에 중복된 공간배열을 나타내고 있었으며, 스페셜리스트의 경우, 산방백운풀(S4)와 민털비름(S2)를 제외한 나머지 종들이 유사한 종조성 배열을 나타내고 있었음
- 이는 Hilltop 분석이 출현빈도를 기반으로 하는 분석으로 종의 전체적 생태적 범위가 과소평가 되었을 수 있으며, 또는 출현 빈도가 많지만 실제로는 일정한 환경 조건에서 반복적으로 출현할 수 있는 특성으로 판단됨.
- Joint plot 분석 결과, 온도와 식물종의 공간배열과의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 다수의 종이 높은 온도와 종조성과의 관계로 나타났음. 따라서 고온의 환경과 외래종의 우점 조성과 관계가 있을 것으로 판단

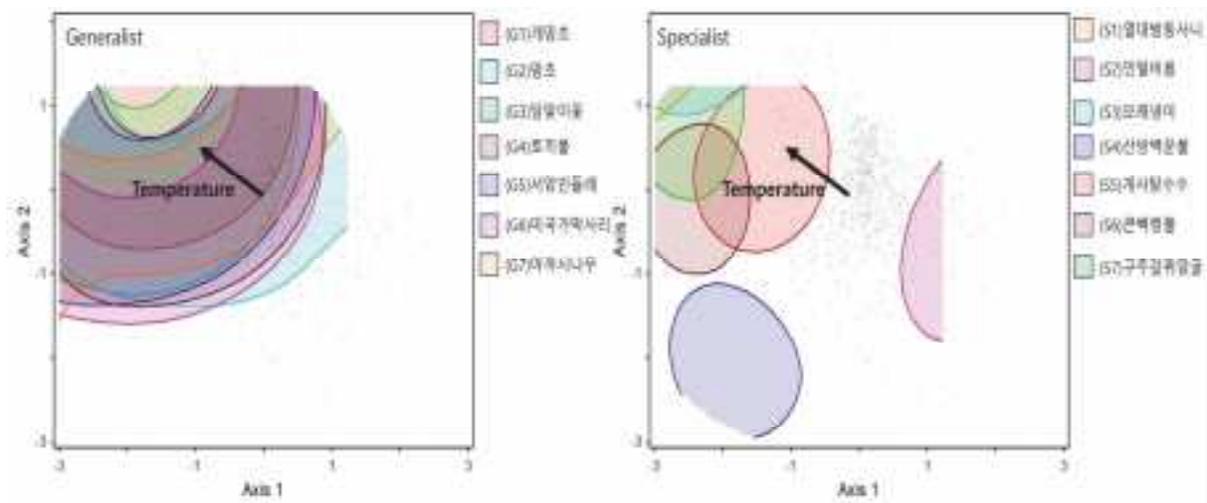


그림 4. 외래식물 제너럴리스트와 스페셜리스트의 hilltop 분석 결과 (cut off=0.3, 회색점: 800개 샘플 공간 배열)

바) 외래식물간 strong association 그룹 분석

- strong association 그룹을 통한 외래식물의 종간 생태적 지위 범위 관계를 나타내었음
- 이에 속한 종은 특정 환경 구배에 강하게 반응하거나 특정 군집의 특성을 대표하는 종들을 의미하는 종임
- 이들은 대부분 특정 환경 구배에 강하게 반응하므로 생태적 지위가 상대적으로 좁은 경향이 있을 수 있으며, 특정 서식 조건에 최적화된 특성을 지님
- 본 분석에 있어 각 종간 거리는 Euclidean 거리로 분석하였으며, cut off R2는 0.5로 지정.
- 분석결과 총 4개의 연관 그룹이 있었으며 Group 1은 삼나무-편백-덩이팥이밥-멀구슬나무이며, Group 2는 큰이삭풀-큰망초-갯-실망초-큰개불알풀-선개불알풀-유럽점나도나물-미국자리공으로 선정. Group 3은 족제비싸리-미국가막사리-아까시나무-토끼풀-까마중-오리새-큰김의털-달맞이꽃-서양민들레-다닥냉이-큰금계국이며 Group 4는 가중나무-개비름-끈끈이대나물-가죽나무-가시박-붉은씨서양민들레로 분석
- Group 1의 경우 온난한 기후 조건에 적응한 난대성 외래식물이 주로 구성되어 있으며 NMDS의 joint plot에서도 온도와 벡터방향의 근접성이 높게 나타났음. 기온 상승 및 온난한 기후의 서식지에서 우점 가능성을 시사함.
- Group 2는 성장속도가 매우 빠르고 교란지에 잘 출현하는 외래식물들이며, 온도구배 및 외래종의 종풍부도비율과는 종간의 환경구배를 나타내는 외래식물군임. 농경지, 도로변 등 다양한 서식지에서 주로 퍼질 수 있는 잠재적 생태적 지위를 보유한 집단으로 판단됨.
- Group 3은 도시화 및 파편화와 연관된 외래식물 군집으로, 인위적 교란이 잦은 공간에서 관찰되어 있음. 도시화 및 파편화에 높은 적응력을 가지고 있을 것이며, 외래식물의 종풍부도와 높은 연관이 있고 HQ와는 반대의 경향으로 나타남
- Group 4는 해안가, 습지, 하천변 등 습한 환경 및 배수가 우수한 토양에서 출현하는 종들임. 이들은 수분구배 및 토양이화학적 성질에 민감하게 반응하는 종들로 판단됨.
- 본 분석은 NMDS의 경우 군집간의 분포차이 등에 집중하지만, 본 분석에서는 joint plot에 의한 방향성과, 종의 연관성 그리고 출현패턴을 바탕으로 그룹화 하는데 의의가 있음.
- 외래식물의 생태적지위는 모든 서식처에서 왕성한 생육을 하는 등의 선행연구가 많으나, 사실상 외래식물에도 특정 생태적 지위를 가지는 종들이 있음을 의미함.
- 실제로 선행연구에서는 외래종에 대한 관리전략을 하나의 방침으로 수행하였지만(물리적제거 등) 향후 '온도적응형 외래종', '도시교란형 외래종', '습윤지역 선호 외래종' 등 미시적인 전략차이를 구분하여 관리방향을 제시하여야 함.
- 이는 특정 환경구배에 따른 생태보전의 전략 군집을 도출하는데 의의가 있음.

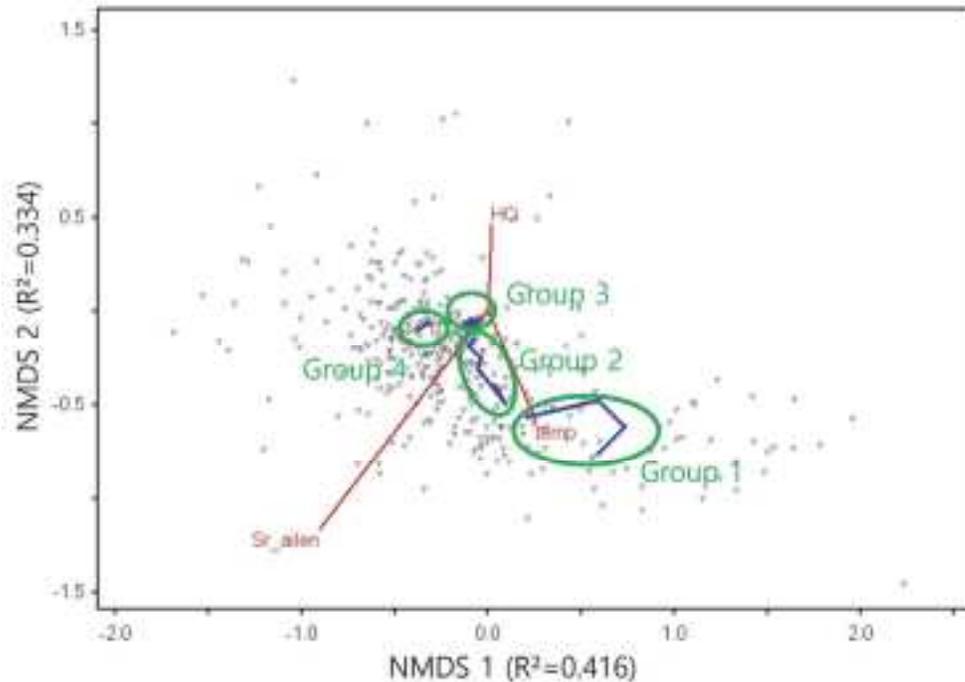


그림 5. Strong association에 의한 외래식물 그룹 구분($R^2=0.5$, 회색 역삼각형은 조사된 외래식물 425종의 공간적 분포)

사) 외래식물과 특산식물 서식처간 Ecological niche overlap

- 외래식물 및 특산식물의 종풍부도가 800개소 조사구 내 각각 상위 10%에 해당하는 80개 조사구를 선별하여 총 160개소의 조사구를 통해 두 그룹(Alien, Endemic) 간의 생태적 특성과 종조성을 비교.
- 이러한 높은 종풍부도 조사구는 해당 식물군의 생태적 지위 중, 핵심 서식처를 대표하며, 환경자원에 대한 선호성을 명확히 비교할 수 있는 표본집단임(Zurell et al., 2016).
- 생태적 지위의 중첩면적과 범위폭을 분석하기 위하여 모든 환경변수는 서로 다른 단위를 비교 가능하도록 0에서 1 사이로 정규화(min-max scaling)하여 분석.
- 환경인자별 생태적 지위의 중첩면적은 커널 밀도 추정법(Kernel Density Estimation, KDE)을 기반으로 하여 확률 밀도 함수(Probability density function, PDF) 형태로 시각화하였으며, 두 그룹 간 중첩 정도는 Schoener's D 지수로 정량화(Schoener, 1970; Fieberg and Kochanny, 2005).
- KDE 기반의 확률 밀도 함수 곡선은 각 지점을 적분한 값은(전체 면적) 1이고 Schoener's D 지수는 0~1사이의 값을 가지며, 두 그룹의 중첩영역의 면적을 정량화하는 지수로, 두 그룹이 환경인자별로 실제로 공유하는 생태적 지위 공간의 정도를 의미함(Schoener, 1970; Fieberg and Kochanny, 2005).
- 가용자원의 공유 정도는 두 그룹 간 생육과 분포에 필요한 자원에 대한 경쟁 수준을 의미(Sale, 1974; Wandrag et al., 2019).
- 외래식물과 특산식물 간 생태적 지위의 중첩정도를 비교하기 위해, 8개의 환경 변수에 대한 KDE 기반 중첩도(Schoener's D)를 산출하였다(그림 08., 표 08)
- 분석 결과, 강수량(precipitation)이 0.719로 가장 높은 중첩도를 보여, 두 군집 간 수분 자원에 대한 생태적 지위가 상대적으로 유사함을 시사.
- 다음으로는 조류 다양성(0.419)과 수량 공급량(water yield, 0.397)이 뒤를 이었으며, 이러한 생태계서비스 지표들은 각각 서식처 연결성 및 서식처 내 수분조건과 관련된 요소들로 해석.

- 반면, 해발고도는 0.157로 가장 낮은 중첩도를 나타냈으며, 이어 경사도(0.261)와 기온(0.276)에서도 낮은 중첩 면적으로 확인. 이는 지형 및 온도 조건에서 두 그룹이 활용하는 생태적 지위가 다르다는 것을 의미. 이러한 환경 변수에서는 서로 다른 생태적 특성을 바탕으로 분포하고 있음을 시사.
- 정리하면, 외래식물이 수분 관련 변수에서는 특산식물과 생태적 지위를 공유하고 있으나, 지형적 요인과 온도 조건에서는 각각 특이적인 서식처에 국한되는 경향이 있음을 시사.
- KDE 그래프의 각 환경인자별 x축(normalized scale)과 y축(Estimated Probability density)을 함께 해석해보면, 외래식물은 대체로 중간값 또는 다소 낮은 normalized scale 범위에서 밀도 분포가 집중된 반면, 특산식물은 기온 및 조류 다양성 환경요인을 제외하고는 상대적으로 높은 normalized scale에서 밀도 분포가 집중된 양상.
- 낮은 normalized scale에 집중된 것은 해당 환경변수가 적은 조건에서도 많은 분포를 한다는 점이며, 높은 normalized scale의 경우에는 풍부한 환경 자원에 특화되거나, 특정 조건이 확보되어야 생육 가능한 종임을 의미.
- 이에 따라 본 분석을 통하여 특산식물은 외래식물에 비하여 생육 환경 조건에 있어 특이성을 가지고 있음.
- 환경요인 별로 해석해보면, 온도의 경우 외래식물의 밀도가 고온 영역에 집중된 것은 고온 조건에서 생육 적응성이 높은 온난성 외래종의 특성을 지니고 있으며, 향후 온난화 현상이 지속화 될 경우 분포 확산의 가능성을 시사.
- 강수량과 수량공급의 경우 특산식물에서 높은 수분 조건에서 밀도가 집중되어있는데, 이는 수분 스트레스가 적은 환경을 선호하며, 안정된 수분 자원 하에서 특화된 생육 전략을 지니고 있음. 따라서 서식처의 건조에 따라 특산식물의 분포의 위협 가능성을 의미.
- 해발고도와 경사도의 경우, 외래식물이 특산식물에 비하여 낮은 환경요인에서 분포함을 의미한다. 밀도 중심점의 거리가 먼 것으로 나타나는데, 이는 수직적 분포 및 지형의 격리에 따른 해당 그룹의 식물종의 기후의 특이성에 따른 적응으로 분화가 진행됨을 의미. 또한 본 연구를 통한 경사도와 외래식물의 생태적지위 관계는 낮은 경사도에 정착한 식생에서 외래식물의 출현이 빈번하다는 선행연구와 유사한 결과를 도출(Lim et al., 2023).
- 서식처질의 경우 외래식물은 낮은 scale 특산식물은 높은 서식처질 조건에서 우세하게 분포하는데, 이는 특산식물은 인간에 의한 교란이 적고 생물다양성의 보전이 우수한 서식처에 주로 분포함을 의미.
- 반면에 외래식물의 경우 normalized scale에 의한 밀도분포가 완만하여, 상대적으로 서식처의 질과는 무관하게 분포함을 의미하여, 결국 특산식물 보다는 넓은 범위의 교란형태에 상대적으로 잘 적응함을 의미.
- 조류 다양성에서 외래식물은 조류 다양성이 높은 지역에 더 많이 분포함을 의미하는데 이는 조류 다양성이 높은 지역인 개방된 서식지, 교란 후 회복된 서식처 단계 그리고 서식처 형태의 다양성으로 인하여 다양한 조류의 shelter가 다양해 지며 이에 따른 외래식물의 유입과 확산이 용이함을 시사. 또한 특산식물은 상대적으로 낮은 조류 다양성에 분포 중심을 두었는데, 이는 특산식물의 서식처가 가진 환경 특이성 또는 특정 미소서식환경에 의하여 특정 조류의 shelter가 이루어진 결과로 판단.
- 유사전달율의 경우 외래식물은 낮은 scale 특산식물은 높은 scale에 밀도가 집중되었는데, 외래식물은 유사전달율이 낮은 관리된 공간 또는 정착이 용이한 도로변과 완경사지에 분포하는 경향으로 토양침식에 안정적인 곳에 더 잘 분포하는 것으로 해석되. 반면에 특산식물은 침식된 환경 또는 암반과 같은 독특한 지형조건에 적응한 경우로. 지형적 환경 특이성이 외래식물에 비하여 상대적으로 높음을 의미.

표 8. 8개 환경변수의 생태적지위 중복역 목록

Variable	Schoener's D
Temperature	0.276
Precipitation	0.719
Altitude	0.157
Slope	0.261
Habitat quality	0.255
Bird diversity	0.419
Water yield	0.397
Sediment delivery ratio	0.277

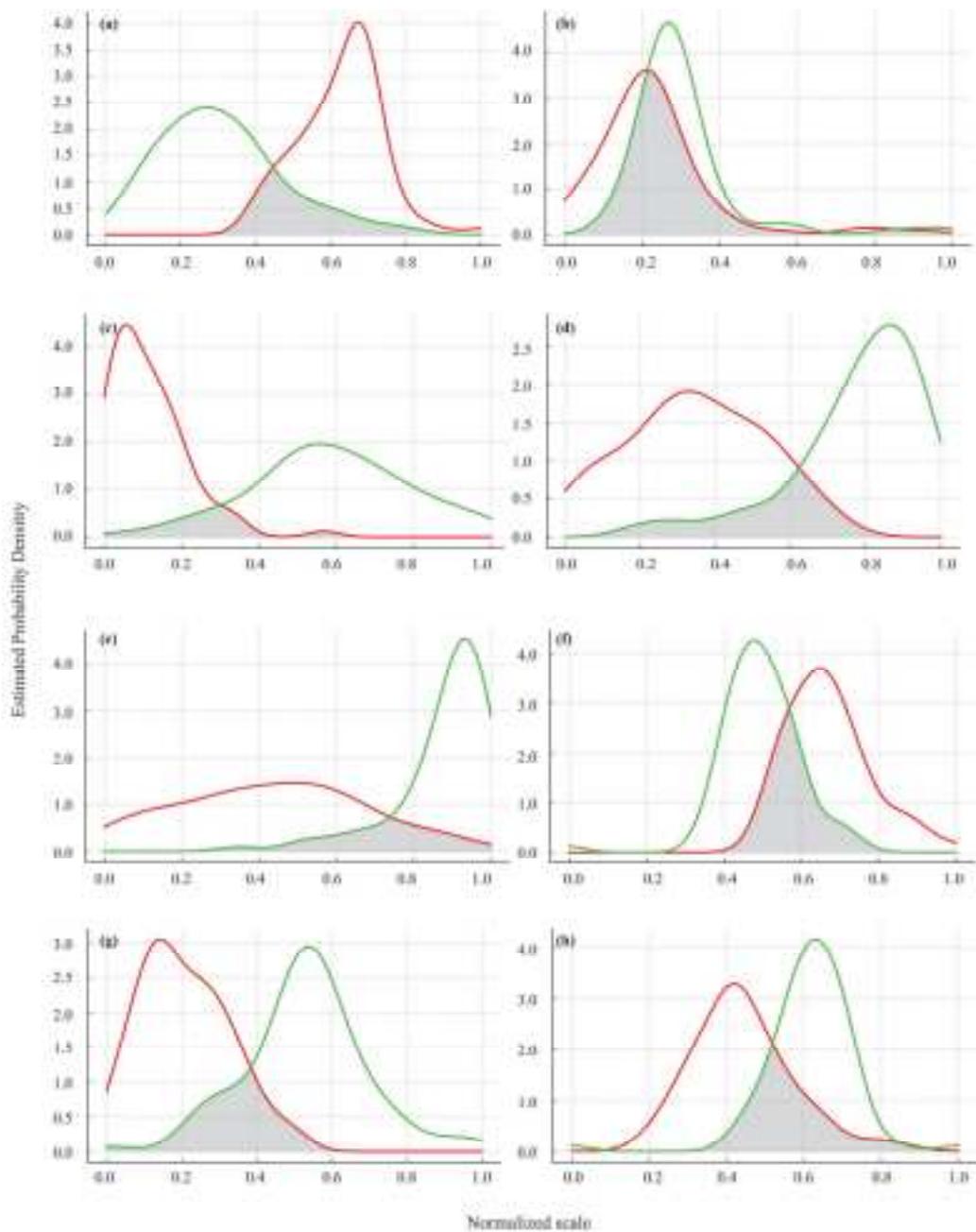


그림 6. 커널 밀도 추정(KDE) 곡선은 외래종(빨간색)과 특산종(초록색) 그룹의 생태적 지위 분포를 여덟 가지 정규화된 환경 구배에서 나타냄. 회색 음영은 두 분포가 겹치는 영역임. x축은 각 환경 변수의 정규화된 척도를, y축은 추정된 확률 밀도를 나타냅니다. 환경 변수: (a) 기온, (b) 강수량, (c) 고도, (d) 경사, (e) 서식지 질, (f) 조류 다양성, (g) 유사전달율 (h) 수자원 생산량.

아) 외래식물 및 특산식물 서식처 간 NMDS ordination

- 1축과 2축에서의 R²는 각각 0.609, 0.211로 전체 R² 0.820.
- 외래식물과 특산식물의 서식처 간 종조성을 비교한 결과, 두 그룹은 일부 중첩되었지만, 각 그룹의 중심점(centroid)이 2차원 공간상에서 분리되어 이질적인 종조성을 나타냈다. 특히, 군집 중심점(centroid)의 위치가 2차원상 공간에서 떨어져 있어 countour overlay의 분포 범위는 특산식물 서식처가 보다 넓은 종조성 범위를 가지는 것으로 확인.
- 이는 특산식물 서식처가 다양한 종의 조합으로 구성되어 있음을 시사한다. 종조성의 배열에 영향을 미치는 환경변수는 경사도, 서식처질, 유사전달율, 강수량, 기온, 조류다양성으로 분석되었다.
- MRPP-test 결과(표 9), T=-73.8937이며, A는 0.2814로 그룹 간 종조성의 차이가 통계적으로 유의하며 그룹 내 유사성도 일정 이상 유지됨을 의미($\rho < 0.001$).

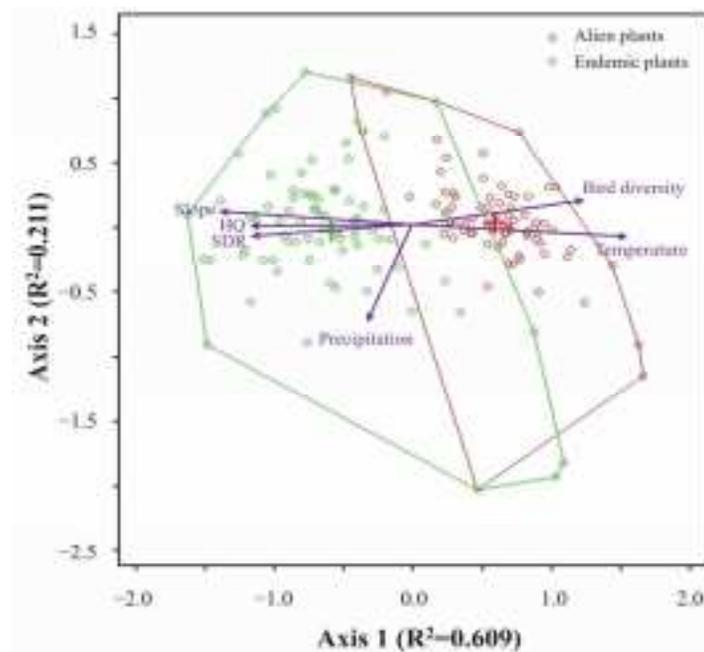


그림 7. 각 그룹의 종조성에 대한 NMDS 서열화(절단값 R²=0.3) 결과. 보라색 화살표는 PC-ORD 7.0의 조인트 플롯(joint plot)을 이용해 적합시킨 환경 벡터임. 화살표의 길이와 방향은 서열화 축과의 상관관계 강도(R² > 0.3)와 방향을 의미하며, 십자 기호는 각 그룹의 종조성 중심점임.

표 9. 서로 다른 그룹 간 종조성을 비교한 MRPP 분석 결과 요약

Compared	T	A	ρ -value
Alien vs. Endemic	-73.8937	0.2814	<0.001

T 통계량은 그룹 간 분리를 나타내며, A 값은 그룹 내 일치도를 기회수정(chance-corrected)한 값을 의미. 유의한 결과($\rho < 0.05$)는 그룹 간 군집 조성이 차이가 있음을 의미.

- 외래식물과 특산식물의 생태적 지위폭을 정량적으로 비교하기 위하여, 8개의 환경 변수에 대해 KDE bandwidth, 사분위범위(IQR), 그리고 Shannon 엔트로피의 세 가지 지위폭 지표를 분석. KDE bandwidth는 생태적 지위폭의 정량적 범위를, IQR은 KDE 곡선 기준 50%의 데이터가 분포하는 핵심영역을 나타낸다. 또한 Shannon entropy는 분포의 균등도를 확인하고자 함.
- 3가지 지표를 종합한 분석 결과, 5~6개의 환경요인에서 외래식물이 특산식물보다 넓은 생태적 지위폭으로

분석됨. 이는 외래식물이 특산식물에 비하여 상대적으로 다양한 환경 조건에서 생존 및 확산할 수 있는 생태적 제너럴리스트(generalist) 특성을 갖고 있음을 시사.

- 반면, 특산식물은 기온의 경우 KDE bandwidth와 shannon entropy 지수에서, 해발고도에서 세가지 지표 모두 외래식물에 비하여 상대적으로 넓은 지위폭을 가지면서 통계적으로 유의한 차이($p < 0.05$). 이는 해발고도에 따른 환경 구배, 특히 온도 조건의 변화 폭에 적응한 다양한 특산식물종의 분포를 의미한다. 즉, 해발고도의 분포 범위가 넓을수록 결과적으로 온도 환경의 내성범위 또한 넓어지기 때문.
- HQ에서 외래식물은 특산식물보다 세 가지 생태적 지위폭 지표 모두 넓은 지위폭으로 나타났다($p < 0.01$). KDE curve에서도 모든 normalized scale 범위에 걸쳐 균등한 분포를 보인 것으로도 이를 뒷받침 함. 반면, 특산식물은 HQ 값이 높은 구간(0.8~1.0)에 KDE curve의 밀도가 집중되면서 범위는 외래식물에 비하여 제한적.
- 이는 외래식물이 인간활동에 의한 교란의 관점에서 볼 때, 생물다양성이 우수한 지역뿐 아니라, 파편화된 서식처에 걸쳐, 다양한 환경에 적응하고 있음을 시사. 특히, 임도가 포함된 산림 내 환경에서도 InVEST 모델상 서식처질 지수가 상대적으로 높게 산출될 수 있다는 점을 고려할 때, 외래식물은 표면적으로 양호한 서식처 내에서도 서식이 가능함을 의미.
- 반대로 특산식물은 주로 교란이 적은 환경에 제한적으로 분포하고 있으며, 이는 높은 서식처 질을 필요로 하는 동시에 인위적 교란에 취약함.

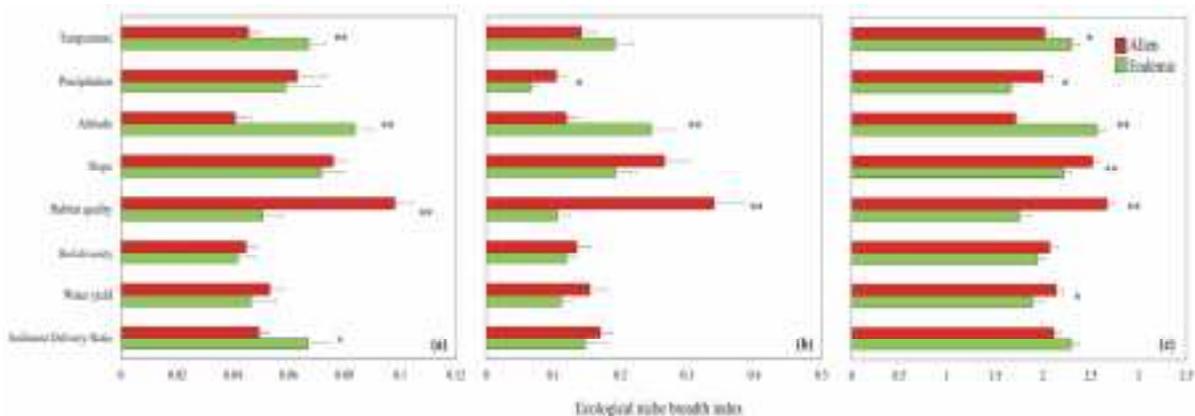


그림 8. 외래식물(빨간색)과 특산식물(초록색) 서식처의 생태적 지위 폭을 (A) KDE niche breadth, (B) 사분위 범위(IQR), (C) Shannon 엔트로피를 기준으로 8가지 환경 변수에 대해 나타낸 그래프. 오차 막대는 1,000회 부트스트랩 반복에서 도출된 표준오차임. 두 집단 간의 통계적 유의성은 독립 표본 t-검정을 사용하여 평가하였으며, $p < 0.05$ 는 *로, $p < 0.01$ 은 **로 표시.

2) 제타다양성 분석을 통한 외래식물 서식처간 영향 형태 파악

- 두 그룹을 대상으로 제타다양성을 분석. 이는 서식처에 따른 공유종 대한 경향을 파악할 수 있으며, n개의 조사구 단위로 조사된 지역의 종교체의 정도를 제공.
- n개의 조사구에서 공유하는 출현 식물종의 수를 나타내며, 종풍부도의 영향을 받음(Hui and McGeoch, 2014; McGeoch et al., 2019). 공유되는 조사구의 수는 제타 순차로 표현.
- 제타다양성 감소의 보완 도구로서 제타다양성 비율 분석을 실시하였다. 제타다양성 비율을 통하여 종 공유의 지속성과 지역 간 유사성의 구조를 해석할 수 있으며, 높은 제타 비율은 많은 종에 여러 서식처에서 공유됨을 의미하고, 낮은 zeta ratio는 서식처간 종교체가 빠르게 진행됨을 의미하고, 상대적 환경 이질성이 클 수 있음을 시사(Hui and McGeoch, 2014; McGeoch et al., 2019).

- 제타 비율 곡선의 형태에 따라 생태학적 해석이 달라질 수 있는데, 주로 증가형, 감소형, 단봉형의 형태로 나타남. 증가형의 경우 공간적으로 안정된 생태구조를 가지거나, 종조성의 동질화가 발생하는 경향이 있으며, 감소형은 환경 이질성이 높거나 분리된 생태계의 구조를 지니고, 지역 특이성을 갖는 종이 다수 분포함을 의미.
- 단봉형은 중간자 효과가 나타나면서, 종분포의 공간적 클러스터링이 발생하며 특정 군집 간 경계가 존재하여 모자이크형 패치형태가 나타난다(Hui and McGeoch, 2014; McGeoch et al., 2019; Park et al., 2020). 제타비율은 n-1조사구에서 공통 출현종이 n번째에 조사구에서 출현할 확률을 나타내며, 산출공식은 아래와 같음.

$$\zeta\text{-ratio} = \frac{\zeta_n}{\zeta_{n-1}}$$

where, $\zeta_n = n$ 개 지역이 공유하는 종 수 $\zeta_{n-1} = (n-1)$ 개의 지역이 공유하는 종 수.

- 한편 제타다양성의 감소 그래프의 형태가 멱함수 및 지수함수의 모델 선정에 따라 생태계 변화 과정을 해석하는 방향이 달라지며 멱함수 모델은 결정론적 과정, 지수함수 모델은 확률론적 과정을 따르게 됨.
- 멱함수 모델을 따를 경우 니치 기반 필터링, 환경 필터링 가설을 지지하여 서식처 간 특정 종이 유사한 환경 조건을 선호하고, 이러한 환경들이 넓은 공간에 걸쳐 반복되어 분포하는 경향으로 나타남.
- 또한 서식처 간 공간적, 환경적 인자의 연속성이 보장되며, 특정 환경조건에 대한 종의 분포가 뚜렷하게 나타나며, 향후 환경의 변화에 따라 종조성의 점진적 변화를 야기.
- 지수함수 모델은 중립 가설을 지지하며, 서식처 내 종의 분포가 임의적이며, 서식처 간 종조성이 급격히 달라질 수 있는 생태학적 과정이다. 서식처 간 종의 연속성이 낮으며, 종교체가 활발히 일어나 생태계에서 종조성의 동태가 급격히 변할 가능성을 시사(Hui and McGeoch, 2014; Latombe et al., 2018; McGeoch et al., 2019).
- 두 함수 모델의 선정 과정에 대한 적합도 검정은 Akaike's Information Criterion(AIC)으로 유의성을 판별(Akaike, 1974). AIC는 통계 모델의 적합성을 평가 하고, 모델 예측정도와 복잡성을 고려하여, 과적합(Overfitting)을 방지함(Akaike, 1974). 이는 양수 또는 음수로 나타나며, 상대적으로 작은 값일수록 신뢰성 있는 모델임(Akaike, 1974).
- 제타다양성 분석 결과, 외래식물과 특산식물 모두에서 제타다양성은 공간적 순서가 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였으나, 외래식물은 특산식물보다 감소폭이 완만하게 나타남.
- 제타 비율 그래프는 두 그룹 모두 제타차수가 증가함에 따라 1에 수렴하는 경향.
- 멱함수 및 지수함수 모델의 AIC는 외래식물의 경우 각각 -530.3144, -109.6002이며, 특산식물은 -302.4994, -85.1348로 두 그룹 모두 멱함수 모델이 생태학적 과정을 더 강하게 지지하는 것으로 해석.
- 이는 두 그룹 모두 결정론적 과정을 지지하는 것으로, 서식처의 환경 필터링에 의해 종조성이 구조화되고 있으며, 이러한 환경 필터링 작용이 외래식물과 특산식물 서식처 간 종교체를 유도하고 있음을 의미.

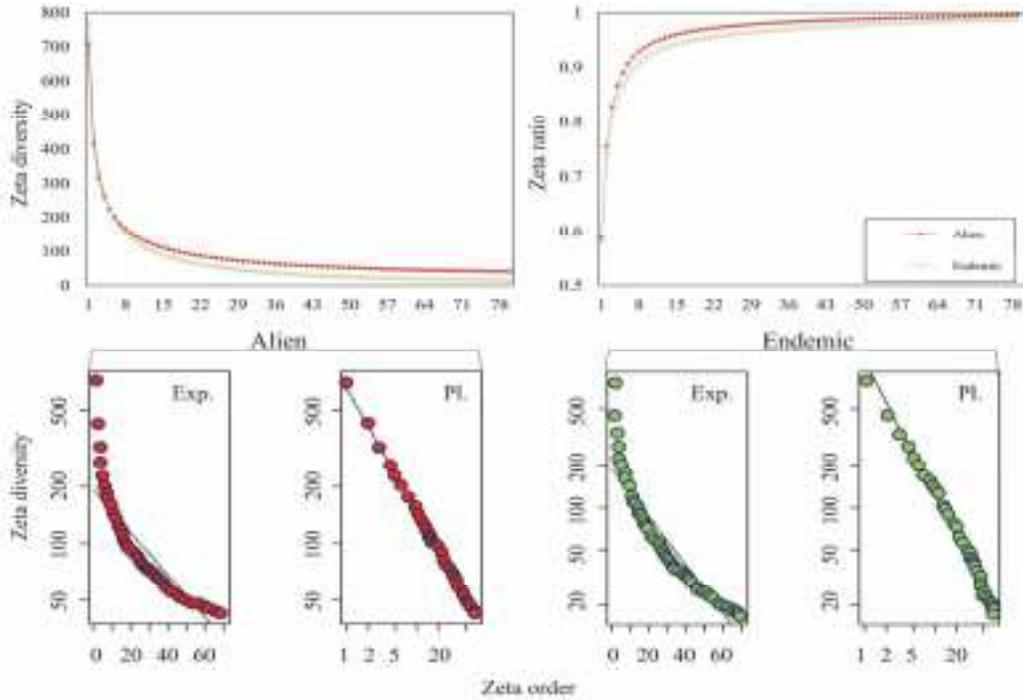


그림 9. 외래식물군과 특산식물군 간의 서식지별 생태 과정을 규명하기 위해 각 그룹의 제타다양성(ζ -다양성) 감소 양상과 제타 비율(ζ -비율)을 비교. 제타다양성 감소에 대해 지수함수 모델과 멱법칙(power-law) 모델을 적합(fitting)하여 계산한 AIC 값을 비교

표 10. 외래식물군과 특산식물군의 제타다양성 감소에 적합한 지수함수 모델과 멱함수 모델의 AIC 값 비교

Index	Power law	Exponential
Alien	-530.3144	-109.6002
Endemic	-302.4994	-85.1348

3) 외래식물 종교체(species turnover)에 영향을 미치는 요인 도출

- MS-GDM을 활용해 조사구 간의 종교체 패턴을 환경 요인과 지리적 거리에 대하여 모델링한 분석(Hui and McGeoch, 2014; Latombe et al., 2018; McGeoch et al., 2019).
- 특정 환경구배에서 종교체에 영향을 미치는지 확인
- 공간적 거리 효과 및 환경인자의 영향의 상대적 기여도를 평가.
- 환경변수는 rescaled range화 하여 분석하였으며, 환경요인별 l-spline 곡선 추출
- 외래식물 및 특산식물의 종풍부도의 상위 10%(각 80개소)를 추출하여 2, 5, 10, 20, 35, 70의 제타 차수를 적용.
- 낮은 제타 차수는 인접한 소수의 조사구에서 공유되는 종조성을 반영하며, 국지적 환경 요인에 의해 결정되는 결정론적 과정(deterministic filtering process)이 강하게 나타날 수 있는 확률이 높음.
- 높은 제타 차수로 갈수록 넓은 범위에서 안정적으로 유지되는 종들의 영향관계가 반영. 대부분 종 turnover가 누적되어 사라지고, 광범위 적응성을 가진 소수의 종이 남음.
- 외래식물의 ms-gdm 분석결과, 낮은 제타 차수(2~5)에서 기온(Temperature), 강수(Precipitation), 경사(Slope), 수량공급(Water yield) 등이 누적효과 0.3 이상으로 뚜렷하게 작용. 저차 단계에서 다양한 환경 변수들이 종조성 차이를 강하게 설명하며, 국지적 환경 필터링이 활발히 일어남을 시사.

- 중간차수(10~20)에서는 전체 변수의 기여도가 점차 감소하지만 기온과 수문 변수는 여전히 주요 요인으로 유지됨. 공간적 거리(Distance)의 영향력은 제한적이며, 환경 차이가 종 공유를 좌우함을 강조.
- 대부분의 환경 변수 기여가 거의 사라지고, 광역 기후·수문 요인만이 일정한 설명력을 유지. 이는 고차 수준에서 넓은 분포 범위를 가진 소수의 일반종만이 살아남는 패턴을 반영하며, 외래식물이 폭넓은 환경 허용폭을 기반으로 광범위한 지역에 정착하고 있음을 의미함.
- 특산식물의 경우, 낮은 제타 차수(2~5)에서 수문(Water yield), 강수(Precipitation), 기온 (Temperature) 외에도 조류종 풍부도(Bird richness)가 누적효과 0.25~1.0 이상으로 높은 기여를 보임. 특산식물의 종조성은 초기 단계부터 생물다양성 지표와 강하게 연계됨.
- 중간 제타 차수에서는 Bird richness가 가장 높은 기여를 유지하며, 서식처 품질(Habitat Quality, HQ)과 강수도 중간 이상의 기여를 보임. 생물다양성과 서식처 질이 복합적으로 작용하는 특성이 나타남.
- 높은 제타 차수에서는 Bird richness, SDR(토양침식 지표), HQ 등이 여전히 의미 있는 설명력을 유지하며, 외래식물과 달리 고차 ζ 에서도 다양한 생태계 질 지표가 중요하게 작용. 이는 특산식물이 좁은 생태적 지위와 특정 생태계 조건에 강하게 의존한다는 점을 뒷받침함.
- 종합하면, 외래식물은 주로 광역 기후·수문 요인에 의해 정착하며 환경 허용폭이 넓은 종으로 구성되는 경향.
- 반면, 특산식물은 생물다양성 지표(Bird richness), 서식처 질(HQ), 토양 상태(SDR) 등과 강하게 연계되어 특정 생태조건에 대한 의존성이 높음.
- 따라서 외래식물 관리에는 광역 기후 위험 요인을 고려한 접근이 필요하며, 특산식물 보전에는 서식처 질과 생태계 건강성 지표를 중심으로 한 관리 전략이 필요함.

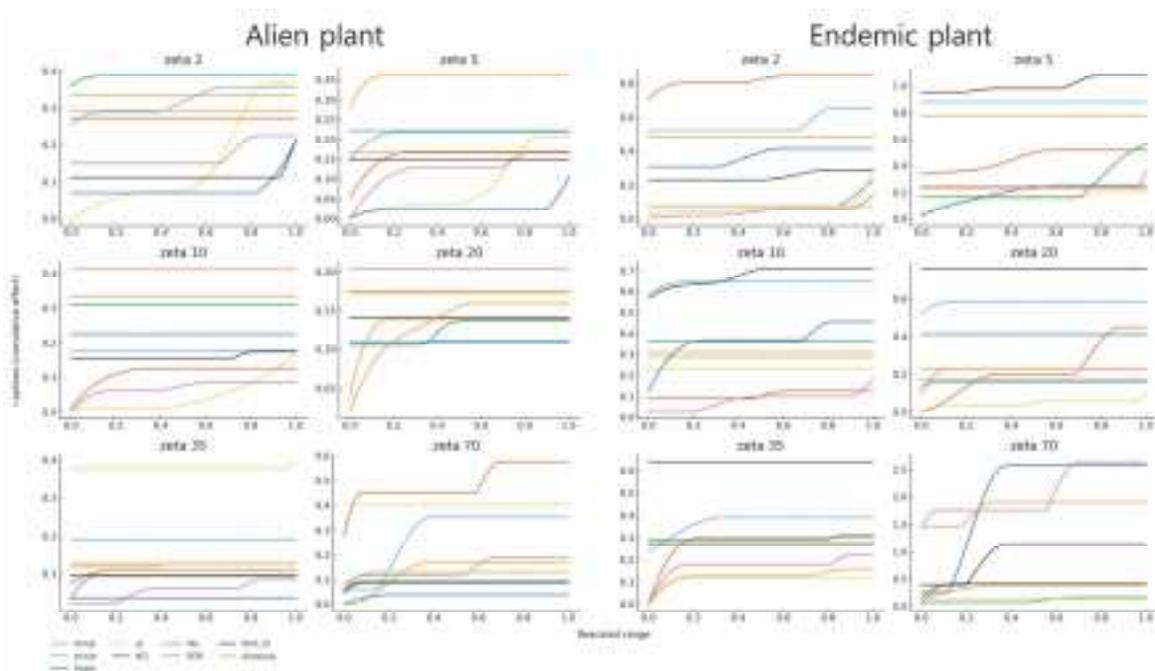


그림 10. 외래식물과 특산식물의 종교체에 영향을 미치는 환경 변수의 누적 효과를 여러 제타 차수(ζ)별로 나타낸 그래프는 zetadiv R 패키지를 사용한 다지점 일반화 비유사도 모델링(Multi-Site Generalised Dissimilarity Modelling, MS-GDM)에서 도출한 t-스플라인 부분 응답 곡선. 각 패널은 다른 제타 차수($\zeta_2, \zeta_5, \zeta_{10}, \zeta_{15}, \zeta_{20}, \zeta_{25}, \zeta_{30}, \zeta_{70}$)를 나타내며, 이는 조사 지점 수가 늘어남에 따라 공유되는 종의 정도를 의미. 환경 예측 변수에는 기온(temp), 강수량(precip), 경사(slope), 고도(ai), 서식처 품질(HQ), 수문 산출량(Wy), 토양 침식지수(SDR), 조류종풍부도(Bird_Sr), 지리적 거리(distance)가 포함. 높은 제타 차수는 광범위하게 분포하는 종의 집합을 나타내며, 낮은 제타 차수는 국지적 규모의 환경 필터링을 강조.

[참고 문헌]

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 19: 716–723.
- CBD (Convention on Biological Diversity). 2025. Kunming–montreal Global Biodiversity Framework. <https://www.cbd.int/gbf>.
- Davies, K.W., 2011. Plant community diversity and native plant abundance decline with increasing abundance of an exotic annual grass. *Oecologia* 167(2): 481–491.
- Fieberg, J., and Kochanny, C.O. 2005. Quantifying home–range overlap: the importance of the utilization distribution. *Journal of Wildlife Management*, 69(4), 1346–1359.
- Gallardo, B., Bacher, S., Barbosa, A.M., Gallien, L., González–Moreno, P., Martínez–Bolea, V., Sorte, C., Vimercati, G. and Vilà, M. 2024. Risks posed by invasive species to the provision of ecosystem services in Europe. *Nature Communications* 15(1): 2631.
- Gallinat, A.S., Primack, R.B., and Lloyd–Evans, T.L. 2020. Can invasive species replace native species as a resource for birds under climate change? A case study on bird–fruit interactions. *Biological Conservation* 241: 108268.
- Grzedzicka, E. 2022. Impact of invasive weeds on the diversity and dissimilarity of bird communities in forested areas. *Diversity* 14(3): 229.
- Grzedzicka, E. 2023. Assessment of habitat selection by invasive plants and conditions with the best performance of invasiveness traits. *Diversity* 15(3): 333.
- Grzedzicka, E., Reif, J., and Hanzelka, J. 2024. Large invasive herbaceous plants decrease the taxonomic, functional and phylogenetic diversity of birds via their reproductive traits. *Functional Ecology* 38(12): 2595–2609.
- Hejda, M., Pyšek, P. and Jarošík, V. 2009. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of ecology* 97(3): 393–403.
- Houlahan, J.E. and Findlay, C.S. 2004. Effect of invasive plant species on temperate wetland plant diversity. *Conservation Biology* 18(4): 1132–1138.
- Hui, C. and McGeoch, M.A. 2014. Zeta diversity as a concept and metric that unifies incidence–based biodiversity patterns. *The American Naturalist* 184(5): 684–694.
- IPBES, 2023, IPBES Invasive Alien Species Assessment: Summary for Policymakers. pp. 8–20.

- Koo, K.A. and Park, S.U. 2021. A Review of Ecological Niche Theory from the Early 1000s to the Present. *Korean Journal of Environmental Ecology* 35(4): 316–335.
- Latombe, G., McGeoch, M.A., Nipperess, D.A. and Hui, C. 2018. zetadiv: Functions to Compute Compositional Turnover Using Zeta Diversity. *Methods in Ecology and Evolution* 9: 431–442.
- Latombe, G., Richardson, D.M., Pyšek, P., Kučera, T. and Hui, C. 2018. Drivers of species turnover vary with species commonness for native and alien plants with different residence times. *Ecology* 99(12): 2763–2775.
- Lee, Y.M., Park, S.H., Jung S.Y., Oh S.H. and Yang J.C. 2011. Study on the corrent status of naturalized plants in South Korea. *Korean Journal of Plant Taxonomy* 41(1): 87–101.
- Lim, B. S., Seok, J. E., Lim, C. H., Kim, G. S., Shin, H. C., and Lee, C. S. (2023). Distribution, Effect, and Control of Exotic Plants in Republic of Korea. *Biology* 12(6): 826.
- Lim, D.O. and Hwang, I.C. 2006. Exotic Plants and Conservation in Gayasan National Park. *Korean Journal of Environment and Ecology* 20: 281.288.
- Lim, D.O. Kim, H.S. and Park, M.S. 2009. Distribution and Management of Naturalized Plants in the Northern Area of South Jeolla Province, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* 23: 506–515.
- McGeoch, M.A., Latombe, G., Andrew, N.R., Nakagawa, S., Nipperess, D.A., Roige, M., Marzinelli, E.M., Campbell, A.H., Vergés, A., Thomas, T. and Steinberg, P.D. 2017. The application of zeta diversity as a continuous measure of compositional change in ecology. *Biorxiv* 216580.
- McGeoch, M.A., Latombe, G., Andrew, N.R., Nakagawa, S., Nipperess, D.A., Roigé, M., Marzinelli, E.M., Campbell, A.H., Vergés, A., Thomas, T. and Steinberg, P.D. 2019. Measuring continuous compositional change using decline and decay in zeta diversity. *Ecology* 100(11): e02832.
- McGeoch, M.A., Latombe, G., Andrew, N.R., Nakagawa, S., Nipperess, D.A., Roigé, M., Marzinelli, E.M., Campbell, A.H., Vergés, A., Thomas, T., Steinberg, P.D., Selwood, K.E., Henriksen, M.V. and Hui, C. 2019. Measuring continuous compositional change using decline and decay in zeta diversity. *Ecology* 100: e02832.
- Mollot, G., Pantel, J.H. and Romanuk, T.N. 2017. The effects of invasive species on the decline in species richness: a global meta-analysis. In *Advances in ecological research* 56: 61–83.
- Park B.J., Lee J.W., Kim J.D., Heo.T.I., Lee D.H., Lee J.H., Nam K.B., Kim H.J., Shin C.H. and Byeon J.G. 2020. Forest Stand Structure of *Abies nephrolepis* Population in Mt. Hwangbyeong. *Journal of Agricultural and Life Science* 54: 35–45.

- Powell, K.I., Chase, J.M. and Knight, T.M. 2013. Invasive plants have scale-dependent effects on diversity by altering species-area relationships. *science* 339(6117): 316-318.
- Rai, P.K. and Singh, J.S., 2020. Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological indicators* 111: 106020.
- Sale, P.F. 1974. Overlap in resource use, and interspecific competition. *Oecologia*, 17; 245-256.
- Schoener, T.W. 1970. Nonsynchronous spatial overlap of lizards in patchy habitats. *Ecology* 51(3): 408-418.
- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). 2025. Sustainable development goals. <http://w3.unece.org/SDG/en/Home>.
- Wandrag, E.M., Catford, J.A., and Duncan, R.P. 2019. Quantifying niche availability, niche overlap and competition for recruitment sites in plant populations without explicit knowledge of niche axes. *Journal of Ecology*, 107(4): 1791-1803.
- Zurell, D., Thuiller, W., Pagel, J., Cabral, J.S., Münkemüller, T., Gravel, D., Dullinger, S., Normand, S., Schiffers, K.H., Moore, K.A. and Zimmermann, N.E. 2016. Benchmarking novel approaches for modelling species range dynamics. *Global Change Biology* 22: 2651-2664.
- 환경부. 2023. 제5차 국가생물다양성전략

〈부록〉 기후에너지환경부 지정 침입외래식물의 생태적 지위지수 목록

식물명	온도	경사	고도	HQ	조류	출현빈도	평균
개망초	0.6444	0.9128	0.4581	0.6837	0.3751	0.9563	0.6717
망초	0.6416	0.9116	0.4563	0.6823	0.3765	0.9563	0.6708
달맞이꽃	0.6381	0.9137	0.4661	0.6822	0.3687	0.9438	0.6688
토끼풀	0.6415	0.9131	0.4659	0.6866	0.3642	0.9413	0.6688
서양민들레	0.6359	0.9132	0.4716	0.6812	0.3693	0.9338	0.6675
미국가막사리	0.6335	0.9107	0.4689	0.6808	0.3635	0.9263	0.6640
아까시나무	0.6240	0.9013	0.4550	0.6741	0.3736	0.9125	0.6567
큰김의털	0.6195	0.8991	0.4499	0.6820	0.3696	0.8675	0.6479
명아주	0.6192	0.8965	0.4380	0.6715	0.3690	0.8925	0.6478
족제비싸리	0.6059	0.8986	0.4623	0.6698	0.3677	0.8650	0.6449
오리새	0.6227	0.9062	0.4608	0.6810	0.3632	0.8238	0.6430
미국쑥부쟁이	0.5881	0.8921	0.5079	0.6933	0.3644	0.7888	0.6391
큰금계국	0.6051	0.8819	0.4616	0.6729	0.3580	0.8550	0.6391
별꽃	0.6084	0.8960	0.4369	0.6824	0.3738	0.8238	0.6369
개쑥갓	0.6450	0.9071	0.4237	0.7000	0.3861	0.7038	0.6276
똥딴지	0.5910	0.8854	0.4475	0.6816	0.3589	0.8013	0.6276
코스모스	0.6052	0.8765	0.4533	0.6677	0.3573	0.7513	0.6186
미국자리공	0.5605	0.8572	0.3834	0.6826	0.3729	0.8350	0.6153
좀명아주	0.5792	0.8698	0.4308	0.6862	0.3621	0.7563	0.6141
붉은토끼풀	0.6078	0.8724	0.4955	0.7017	0.3610	0.6325	0.6118
붉은서나물	0.5767	0.8715	0.4298	0.6775	0.3569	0.7200	0.6054
큰방가지똥	0.5740	0.8803	0.3840	0.6793	0.3761	0.7388	0.6054
애기땅빈대	0.5809	0.8593	0.4120	0.6923	0.3546	0.7150	0.6024
선개불알풀	0.5435	0.8576	0.3953	0.6784	0.3612	0.7725	0.6014
등근잎나팔꽃	0.5639	0.8602	0.4385	0.6795	0.3555	0.7025	0.6000
미국실새삼	0.5784	0.8382	0.4481	0.6612	0.3392	0.7238	0.5981
방가지똥	0.5885	0.8428	0.3468	0.6896	0.3752	0.6600	0.5838
전동싸리	0.6686	0.9257	0.4302	0.7100	0.4113	0.3450	0.5818
털빚새귀리	0.5696	0.9096	0.4759	0.6714	0.3611	0.5000	0.5813
원추천인국	0.6164	0.8701	0.5079	0.6370	0.3471	0.5025	0.5802
취보리	0.5947	0.8669	0.3488	0.7154	0.3707	0.5513	0.5746
미국개기장	0.5467	0.8140	0.4147	0.6677	0.3464	0.6413	0.5718
단풍잎돼지풀	0.5552	0.8480	0.4631	0.7187	0.3479	0.4975	0.5717
큰독새풀	0.7519	0.9385	0.5844	0.7143	0.3537	0.0750	0.5696
큰도꼬마리	0.5335	0.8326	0.3857	0.6821	0.3491	0.5950	0.5630
미국까마중	0.5660	0.8538	0.4390	0.7106	0.3422	0.4600	0.5619
잔개자리	0.6854	0.8165	0.3422	0.8205	0.4257	0.2400	0.5551
실망초	0.6124	0.8386	0.3767	0.7224	0.3758	0.3888	0.5524
좀포아풀	0.5674	0.9127	0.4822	0.6955	0.3680	0.2550	0.5468
큰조아재비	0.7123	0.7643	0.8175	0.5371	0.3044	0.1388	0.5457
주홍서나물	0.5438	0.8508	0.3503	0.6623	0.3460	0.4913	0.5407
큰낭아초	0.5234	0.7977	0.4070	0.6574	0.3446	0.5075	0.5396
수박풀	0.5913	0.8774	0.7547	0.5723	0.3225	0.0713	0.5316
불란서국화	0.6736	0.8374	0.4953	0.6576	0.3352	0.1688	0.5280
우단담배풀	0.6921	0.8754	0.4222	0.7535	0.3529	0.0625	0.5264
서양별노랑이	0.5938	0.8254	0.3690	0.7357	0.3458	0.2825	0.5254
땃싸리	0.6094	0.8598	0.4827	0.6917	0.4054	0.0988	0.5246
취명아주	0.6190	0.8281	0.3621	0.6615	0.3770	0.2788	0.5211

식물명	온도	경사	고도	HQ	조류	출현빈도	평균
기생초	0.5069	0.8123	0.3699	0.6560	0.3474	0.4050	0.5163
사방김의털	0.5787	0.9329	0.4542	0.6978	0.3318	0.0813	0.5128
애기나팔꽃	0.4969	0.7723	0.3676	0.6692	0.3252	0.4238	0.5092
노랑코스모스	0.5643	0.8313	0.3750	0.6336	0.3339	0.3025	0.5068
삼잎국화	0.5572	0.7987	0.4925	0.6976	0.3564	0.1238	0.5044
비짜루국화	0.5503	0.7539	0.2840	0.6882	0.3721	0.3688	0.5029
부령소리쟁이	0.5521	0.8140	0.6616	0.5232	0.3956	0.0513	0.4996
큰비짜루국화	0.5083	0.7412	0.2523	0.6929	0.3699	0.4188	0.4972
문모초	0.4475	0.7698	0.4448	0.6803	0.3275	0.3013	0.4952
들목새	0.4826	0.7485	0.2771	0.6873	0.3648	0.3763	0.4894
자주달개비	0.5227	0.7757	0.4489	0.7097	0.3436	0.1350	0.4893
능수참새그렁	0.4751	0.8061	0.3243	0.6340	0.3805	0.3125	0.4887
청비름	0.5674	0.8026	0.3170	0.6508	0.3424	0.2238	0.4840
큰이삭풀	0.4412	0.7412	0.2619	0.6613	0.3668	0.4163	0.4815
큰물칭개나물	0.4445	0.7013	0.4697	0.5911	0.3147	0.3413	0.4771
겹삼잎국화	0.4610	0.7851	0.5234	0.6777	0.3219	0.0650	0.4724
재속	0.4033	0.7540	0.3924	0.6633	0.3442	0.2725	0.4716
창질경이	0.5805	0.6992	0.2567	0.7026	0.3826	0.1775	0.4665
쇠채아재비	0.4699	0.7379	0.4742	0.6389	0.3265	0.1263	0.4623
일본목련	0.3715	0.7523	0.3415	0.7899	0.3884	0.1175	0.4602
땅파리	0.5600	0.7825	0.2984	0.6075	0.3774	0.1063	0.4553
분꽃	0.6049	0.6891	0.2738	0.7244	0.3283	0.1025	0.4538
자주광대나물	0.3818	0.7421	0.3399	0.6629	0.3564	0.2213	0.4507
각시갈퀴나물	0.4458	0.7629	0.3021	0.6701	0.3170	0.2000	0.4496
도깨비가지	0.4198	0.7308	0.2782	0.6785	0.3517	0.2250	0.4473
긴까락뱀새귀리	0.4997	0.6979	0.2786	0.6859	0.3532	0.1538	0.4448
개자리	0.5843	0.5398	0.2334	0.6937	0.4425	0.1663	0.4433
물냉이	0.5102	0.6316	0.5125	0.5898	0.2818	0.1125	0.4397
서양금혼초	0.5636	0.6095	0.2298	0.6443	0.4033	0.1800	0.4384
향기풀	0.6364	0.7778	0.5385	0.3333	0.3333	0.0088	0.4380
서양산딸기	0.4149	0.6401	0.2897	0.6998	0.4773	0.0425	0.4274
냄새명아주	0.5486	0.6741	0.2857	0.6612	0.3461	0.0475	0.4272
나도민들레	0.6050	0.6857	0.3810	0.4898	0.3810	0.0150	0.4262
유럽광대나물	0.4346	0.7506	0.3719	0.6162	0.3412	0.0213	0.4226
별나팔꽃	0.4992	0.7086	0.2675	0.5957	0.3229	0.1250	0.4198
난쟁리아욱	0.4893	0.6180	0.2200	0.6739	0.4325	0.0613	0.4158
큰참새귀리	0.4395	0.7417	0.2310	0.5963	0.3847	0.0663	0.4099
공단풀	0.4733	0.6395	0.2543	0.7105	0.3084	0.0638	0.4083
개맨드라미	0.5495	0.7143	0.3810	0.4762	0.2747	0.0250	0.4034
서양메꽃	0.3511	0.6960	0.2683	0.7792	0.2705	0.0463	0.4019
노란꽃땅파리	0.4877	0.6898	0.2489	0.6706	0.2476	0.0325	0.3962
애기노랑토끼풀	0.4942	0.5378	0.2286	0.6531	0.3911	0.0400	0.3908
양하	0.3782	0.6579	0.2695	0.6652	0.2954	0.0513	0.3862
상치아재비	0.2664	0.6865	0.2952	0.6494	0.3743	0.0363	0.3847
흰털새	0.5031	0.4451	0.3733	0.5786	0.3794	0.0225	0.3836
애기겨이삭	0.4432	0.4939	0.3841	0.6402	0.2930	0.0138	0.3780
물참새피	0.3557	0.6514	0.2046	0.5629	0.3090	0.1550	0.3731
유럽옥절보리풀	0.3585	0.6305	0.3099	0.5224	0.3891	0.0200	0.3718
유럽개미자리	0.4939	0.4333	0.2111	0.6735	0.3560	0.0413	0.3682
애기야욱	0.4724	0.4487	0.2356	0.7030	0.3155	0.0313	0.3677

식물명	온도	경사	고도	HQ	조류	출현빈도	평균
덩이괘이밥	0.3476	0.5800	0.2147	0.5997	0.3511	0.1113	0.3674
들묵새야재비	0.4667	0.7778	0.3333	0.3333	0.2800	0.0088	0.3666
등심붓꽃	0.4262	0.4758	0.2823	0.6248	0.3331	0.0413	0.3639
큰참새피	0.4758	0.4672	0.2998	0.6198	0.2763	0.0413	0.3633
들비노리	0.2747	0.3968	0.2747	0.7143	0.5102	0.0063	0.3628
방울새풀	0.4802	0.4024	0.2761	0.6531	0.3114	0.0500	0.3622
염소풀	0.3401	0.5952	0.2646	0.5952	0.3401	0.0125	0.3580
부들레야	0.6090	0.5031	0.3506	0.3733	0.2967	0.0113	0.3573
창명야주	0.4700	0.4536	0.1828	0.5421	0.4309	0.0413	0.3534
수잔루드베기아	0.4020	0.5238	0.4432	0.4020	0.2834	0.0138	0.3447
비너스도라지	0.2747	0.6303	0.3968	0.4174	0.3182	0.0188	0.3427
낙상홍	0.5714	0.5714	0.2857	0.2286	0.3810	0.0050	0.3405
회향	0.5143	0.5143	0.5143	0.1978	0.2857	0.0075	0.3390
은털새	0.4286	0.3673	0.4286	0.5143	0.2857	0.0075	0.3387
애기달맞이꽃	0.4343	0.2929	0.2168	0.6046	0.4141	0.0575	0.3367
기름골	0.3058	0.5815	0.1819	0.5505	0.3412	0.0213	0.3304
긴포꽃질경이	0.2857	0.5143	0.2857	0.5143	0.3673	0.0075	0.3291
애기범부채	0.5143	0.4286	0.1978	0.5143	0.2857	0.0075	0.3247
홍초	0.5143	0.4286	0.2857	0.5143	0.1978	0.0075	0.3247
염주	0.4629	0.4629	0.2269	0.4286	0.3506	0.0113	0.3238
서양가시엉겅퀴	0.3506	0.4629	0.2269	0.6090	0.2822	0.0113	0.3238
자주풀솜나물	0.3316	0.4193	0.1875	0.6446	0.2981	0.0475	0.3215
세열유럽쥐손이	0.4629	0.5510	0.2269	0.3990	0.2571	0.0113	0.3180
미국풀솜나물	0.5102	0.3247	0.2747	0.5102	0.2747	0.0063	0.3168
양장구채	0.3974	0.2368	0.2561	0.5488	0.4268	0.0275	0.3156
큰갈퀴덩굴	0.2857	0.3810	0.3810	0.3810	0.3810	0.0050	0.3024
서양갯냉이	0.3265	0.3641	0.1686	0.4784	0.4377	0.0300	0.3009
가는잎털냉이	0.4286	0.4286	0.4286	0.2571	0.2571	0.0038	0.3006
금잔디	0.3673	0.4286	0.1978	0.5143	0.2857	0.0075	0.3002
뽕이삭풀	0.3405	0.2360	0.1571	0.5575	0.4809	0.0263	0.2997
꼬인새	0.3247	0.7143	0.2101	0.3247	0.2101	0.0063	0.2983
고사리새	0.2286	0.4156	0.2286	0.5714	0.3048	0.0100	0.2932
가는끈끈이장구채	0.3684	0.3684	0.1429	0.3333	0.2800	0.0088	0.2503
털개구리자리	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.0025	0.2385
한석사초	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.0025	0.2385
구주갈퀴덩굴	0.4286	0.2571	0.2571	0.2571	0.1429	0.0038	0.2244
큰백령풀	0.1429	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.0025	0.2147
개사탕수수	0.2857	0.1429	0.1429	0.2857	0.1429	0.0025	0.1671
산방백운풀	0.1429	0.1429	0.1429	0.2857	0.2857	0.0025	0.1671
모래냉이	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0025	0.1195
민털비름	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0013	0.1193
열대방동사니	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0013	0.1193

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.

천광일 외. 2025. 「생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립(’25)」. 국립생태원



ISBN 979-11-6698-834-9