

제2차

국가 장기생태연구 성과 및 미래 방향



제2차 국가 장기생태연구 성과 및 미래 방향

Summary Report of the 2nd
National Long-Term Ecological Research



제2차 국가 장기생태연구 성과 및 미래 방향

Summary Report of the 2nd National Long-Term Ecological Research

발 행 일 : 2025년 11월

발 행처 : 국립생태원 생태변화연구팀

충청남도 서천군 마서면 금강로 1210

www.nie.re.kr

저 자 : 박정수, 한아름, 주성배, 이응필, 이영상, 이일환,

이재연, 흥민기, 김미라, 장혜정, 김준모, 정의

연 구 사 업 : 2025년 국가장기생태연구 (NIE-고유연구-2025-02)

편집·제작 : (주)다정플러스 충남지사

Contents

I. 국가 장기생태연구 소개

- 4 1. 연구 개요
- 4 2. 주요 연구 내용
- 4 3. 기대효과

II. 국가 장기생태연구 논문 성과

- 6 1. 개요
- 8 2. 논문 주제어 네크워크 분석

III. 기후변화 시대의 생태계 : 국가 장기생태연구의 핵심 성과와 미래 방향

- 10 1. 서론
- 10 2. 본론
- 15 3. 결론

IV. 참고문헌

- 17 참고문헌

I. 국가 장기생태연구 소개

1. 연구 개요

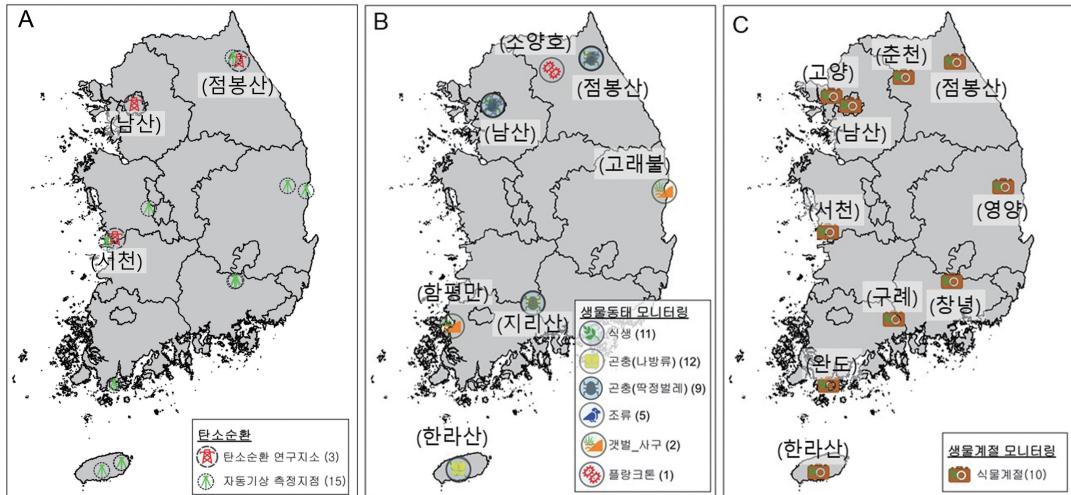
전 지구적 기후변화와 인간 활동은 생물다양성의 급격한 감소와 생태계 기능의 악화라는 심각한 위기를 초래하고 있다. 생태계의 반응은 다양한 요인이 복잡하게 얹혀 있으며, 그 변화는 인간이 쉽게 인지하기 어려운 임계점을 넘어섰을 때 비로소 뚜렷하게 나타나는 경우가 많다. 따라서 단기적 관찰을 넘어 장기간에 걸쳐 체계적이고 표준화된 방법으로 데이터를 축적하는 것이 필수적이다. 우리나라는 2004년 환경부와 생태학계가 협력하여 제1차 국가 장기생태연구(National Long-Term Ecological Research, LTER)가 출범하였으며, 2014년부터 국립생태원 주도로 산림, 하천, 연안, 습지 등 한반도의 주요 생태계를 대상으로 장기 모니터링을 수행해 오고 있다.

2. 주요 연구 내용

국가 장기생태연구의 주요 목표는 ① 기후요인 변화에 따른 생물군집의 구조적 변동 및 생물계절 변화를 지속적으로 관찰하여 생태계 반응 메커니즘을 규명하고, ② 탄소중립 실현을 위한 생태계의 탄소흡수 및 저장 기능을 규명하는데 있다. 이를 위해 점봉산, 지리산, 한라산, 남산 등 전국의 대표 생태관측소에서 식생, 조류, 곤충 등 다양한 생물군집 변화를 장기적으로 모니터링하고 있다. 또한 점봉산과 서천 지역에는 탄소플러스 타워를 설치하여 대기-식생-토양 간 탄소 교환량을 측정하고 있으며, 이를 통해 산림생태계의 탄소흡수량 변동과 기후요인 간의 상호작용을 분석하고 있다. 또한 전국 10개 지점에 설치된 생물계절 자동관측카메라(Phenocam)를 활용하여 식물의 생장·개화·낙엽 시기를 자동 모니터링하고, 아울러, 가뭄 및 폭우 등 극한기후 조건에서의 수목 생리반응 실험을 수행하여 주요 수종의 내성 및 회복력을 평가하였다. 최근에는 자동 관측 시스템 확대와 데이터 표준화를 통해 장기생태 자료의 품질과 활용성을 높이는데 노력을 기울이고 있다.

3. 기대효과

국가 장기생태연구는 단순한 생태 모니터링을 넘어, 기후변화 시대 생태계 회복력과 지속가능성을 확보하기 위한 핵심 연구사업이다. 축적된 장기 시계열 자료는 한반도 생태계의 구조적 변화와 기능적 반응을 통합적으로 해석할 수 있는 기초 데이터를 제공하며, 향후 기후변화 대응 전략 수립 및 생태계 보전 정책 수립의 과학적 근거로 활용함으로써, 우리 사회의 지속가능한 발전에 기여할 것이다.

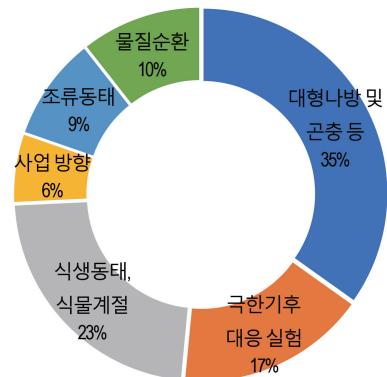


<탄소순환(A), 생물동태 모니터링(B), 생물계절(C) 연구 지소 분포도>

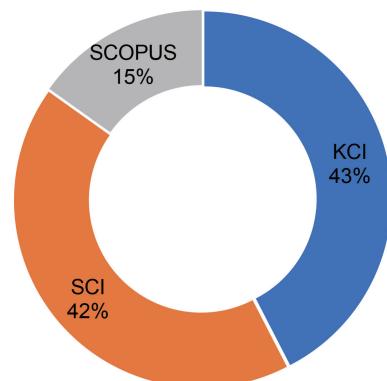
II. 국가 장기생태연구 논문 성과

1. 개요

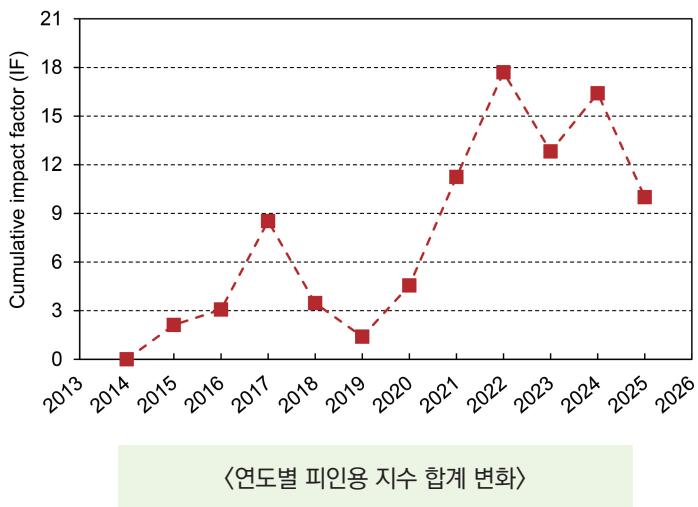
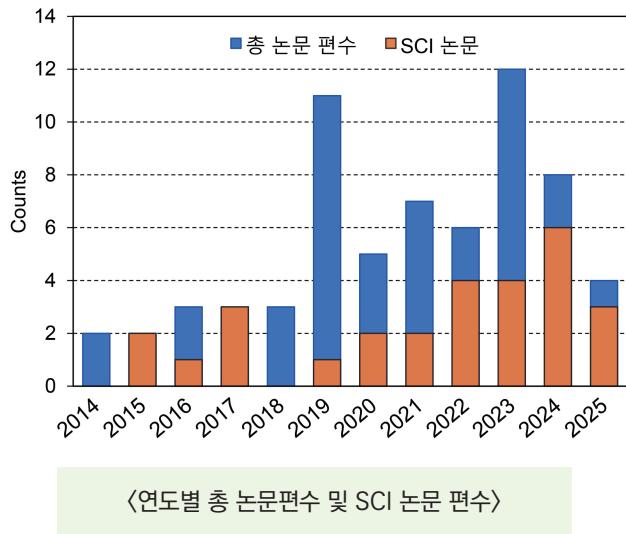
2014년에 시작된 제2차 국가 장기생태연구를 통해 총 66편의 연구논문이 발간되었다. 논문 주제는 곤충, 식물, 조류, 물질순환, 극한기후 실험 연구 등 다양한 분야를 포함하고 있다. 매년 10팀 이상의 외부연구원이 참여하여 국립생태원 내부 연구진과 함께 연구성과를 만들고 있다. 연구 결과는 국외의 저명한 SCI 과학논문에 28편을 수록하였다. 2014년 이후 축적된 데이터를 바탕으로 논문 성과는 지속적으로 증가하고 있으며, 논문의 피인용 영향력지수(IF) 또한 크게 증가하고 있다. 생태계의 변화를 설명하기 위해서는 단기간의 조사 자료로는 부족한 경우가 많다. 지난 20년 가량 축적된 조사 데이터를 바탕으로 앞으로 더욱 중요한 연구 결과를 도출할 것으로 기대한다.



〈논문 주제 유형 분류〉



〈논문 유형 분류〉



2. 논문 주제어 네트워크 분석

1) 서론

지난 10여 년 동안 국가 장기생태연구를 통해 발표된 66편의 논문 제목, 초록, 주제어 텍스트 정보를 활용하여 LDA(Latent Dirichlet Allocation) 기반 주제어 네트워크 분석을 수행하였다. 이를 통해 대규모 텍스트 데이터를 통계적으로 구조화하여, 연구 주제의 내재적 구조와 개념 간 연계성을 규명하고자 한다.

LDA(Latent Dirichlet Allocation) 방법을 통한 도출된 단어를 중심으로 동시출현 네트워크(co-occurrence network)를 구성하여 논문 내에서 특정 단어들이 함께 등장하는 패턴을 시각적으로 표현하였다. 각 노드(node)는 단어를 의미하며, 노드의 크기는 해당 단어의 출현 빈도를 반영한다. 노드 간의 연결선(edge)은 두 단어가 동일 문맥 내에서 같이 등장(co-occurrence)하는 정도를 나타내며, 엣지의 두께는 단어 간 연관성의 강도를 의미한다. 이를 통해 연구 주제 내에서 중심적인 개념과 그 주변에 위치한 연관 개념들의 구조적 관계를 파악할 수 있다. 워드클라우드(word cloud)는 분석 대상 전체에서 출현 빈도가 높은 단어를 시각화한 결과이다. 단어의 크기는 빈도수에 비례하여 표현되며, 이를 통해 주요 키워드와 핵심 개념이 직관적으로 강조된다. 이러한 시각화는 주제모델링 결과를 보완적으로 제시함으로써, 연구 대상 텍스트의 주제적 경향성과 핵심 연구 영역을 보다 명확하게 이해할 수 있다.

2) 논문 주제어 네트워크 분석 결과

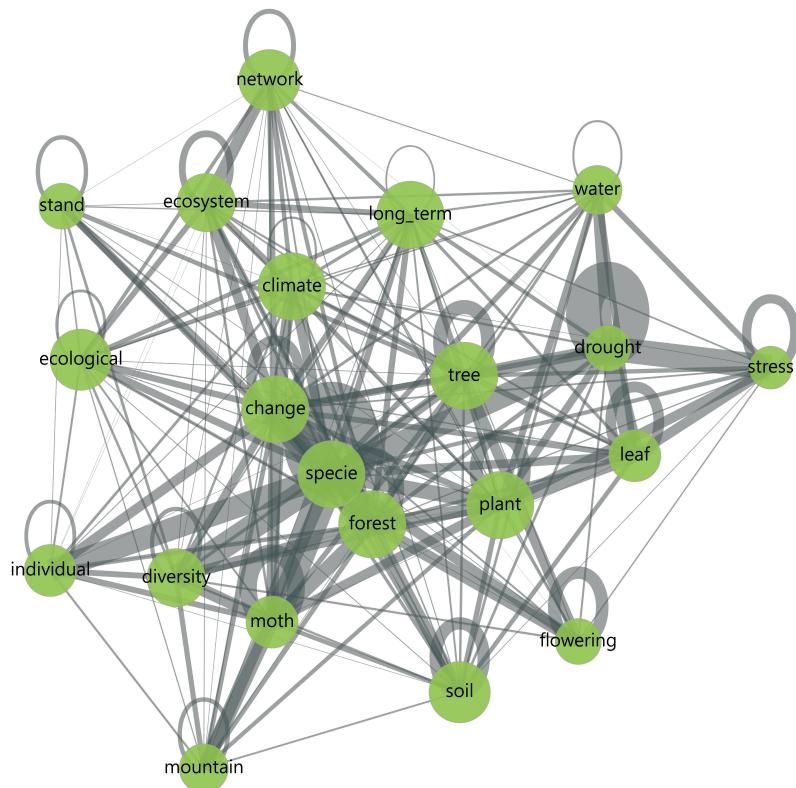
논문에서 출현 빈도가 높은 단어는 species(220회), forest(126회), change(114회), drought(98회), moth(87회), plant(82회) 이었다. 본 사업의 연구 결과는 환경 구배 또는 시차에 따른 생물종의 변화상을 관찰한 결과가 주를 이루고 있으며, 대표적인 분류군은 나방류와 식물로 주로 산림생태계를 대상으로 한 연구가 수행된

것을 알 수 있다. 다음으로 국내 대표 수종을 대상으로 구례에서 수행한 가뭄 실험연구가 다양한 연구 성과를 도출하였다.

동시출현 네트워크(co-occurrence network) 분석 결과에서는 species, change, forest 등의 단어가 중심 노드를 구성하는 것을 확인할 수 있다. 네트워크에서 중심부에 위치한 단어들은 여러 주제 간에서 공통적으로 활용되는 핵심 개념으로, 연결선(edge)의 밀도가 높을 수록 해당 단어가 다른 단어들과 강한 의미적 연관성을 가진다는 것을 의미한다. 이는 연구 전반에서 생물종의 변화와 산림 연구가 핵심적인 연구 측으로 기능함을 시사한다. 또한 주변부에는 moth, diversity 등이 하나의 연구 주제를 이루고, 다음으로 tree, drought, stress 가 또 다른 연구 주제로 확장되는 것을 알 수 있다. 마지막으로 climate, ecosystem, network 등과 같은 기후변화 및 관측망에 대한 연구 주제로 구분되었다.

3) 제언 및 발전방향

지난 10여 년간의 제2차 국가 장기생태연구는 2004년에 시작된 제1차 국가장기생태연구를 이어받아 식생, 곤충, 조류, 동식물 플랑크톤, 저서성 대형무척추동물 등의 연구를 수행하고 있다. 연구성과는 곤충과 식생 조사 결과 중심으로 도출되어, 특정 분류군에 치중되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 환경구배 또는 시차에 따른 생물종 구성 변화 결과가 주를 이루고 있어 좀 더 심도 있는 분석이 요구된다. 생태계는 수많은 생물과 복합적인 환경요인이 영향을 주고 받기 때문에 기후변화로 인한 생태계 변화를 제대로 설명하기 위해서는 생물 분류군 간의 연계성 파악과 복합적인 환경요인 변화 관측과 분석이 요구된다.



〈전체 논문(66편)의 주제어 네크워크 분석 결과〉



〈출현 빈도가 높은 주제어 50개의 word cloud〉

III. 기후변화 시대의 생태계 : 국가 장기생태연구의 핵심 성과와 미래 방향

1. 서론

1) 목적과 배경

기후변화와 인간 활동의 증가는 한반도 생태계에 전례 없는 변화를 초래하며, 그 구조와 기능 전반에 심대한 영향을 미치고 있다. 생물종의 분포, 개체군 동태, 물질 순환 등 생태계의 근간을 이루는 과정들이 복합적으로 변동하는 상황에서, 미래를 예측하고 지속가능한 관리 방안을 모색하기 위해서는 장기적이고 체계적인 과학적 데이터 축적이 필수적이다. 따라서 장기생태연구는 불확실한 생태계 변화를 관찰하기 위한 도구가 아니라, 지속 가능한 미래 예측을 위한 필수적인 사업이다.

본 보고서는 '국가 장기생태연구(Korean Long-Term Ecological Research, KLTER)' 사업을 통해 지난 10여 년간 축적된 핵심 연구 성과 논문들을 종합적으로 분석하고, 이를 통해 한반도 생태계 변화의 실상을 다각적으로 조명하는 것을 목적으로 한다. 곤충 군집의 미세한 변화에서부터 산림 탄소 순환과 같은 거시적 과정에 이르기까지, 축적된 데이터를 바탕으로 생태계의 유기적 상호작용을 분석하고, 과학적 증거에 기반한 미래 변화를 예측하였다.

2) 논문의 구성

본 과제를 통해 발표된 66편의 논문은 한반도 생태계의 변화를 이해하는 데 핵심적인 6개 연구 분야로 구분할 수 있다.

- 곤충 군집을 통한 생태계 건강성 진단 : 환경 변화의 민감한 지표인 곤충 군집의 다양성 패턴과 생태계 내 상호작용.
- 가뭄에 대한 식물의 생리적 반응 : 기후변화의 직접적 위협인 가뭄에 대한 주요 수종들의 저항성과 적응 메커니즘 탐구.

- 산림 식생 동태 및 식물계절 : 산림 하층 식생 (조릿대) 및 구상나무 동태와 식물계절 변동 자동 모니터링
- 조류 군집의 동태 : 서식지 변화에 민감한 조류 군집의 시공간적 분포와 생태적 지위 분석
- 탄소 중심 물질 순환 : 생태계의 근간을 이루는 탄소 순환 과정을 분해, 고정, 교란의 관점에서 통합적으로 파악.
- 국가 연구 인프라 동향 : 과학 기반 정책의 초석이 되는 국내외 장기생태연구 인프라의 현황과 미래 발전 방향 고찰.

본 보고서를 통해 장기생태 연구논문의 종합적 의의를 되짚어보고, 기후변화 시대에 장기생태연구가 나아갈 방향을 탐색하고자 한다.

2. 본론

1) 생태계 건강성의 지표 : 나방과 곤충 군집의 다양성 패턴과 상호작용

곤충은 짧은 세대주기와 높은 환경 민감도를 지녀 생태계의 미세한 변화를 신속하게 반영하는 중요한 생물지표(bioindicator)이다. 특히 나방류는 종 다양성이 높고 식물과의 상호작용이 긴밀하여, 이들의 군집 구조 변화를 추적하는 것은 산림 생태계의 건강성을 평가하고 미래 변화를 예측하는 데 효과적이다. 국가 장기생태연구는 곤충 군집의 동태를 통해 생태계의 복잡한 반응을 해독하는 데 중요한 단서들을 제공하고 있다.

• 산림 유형과 곤충 다양성

완도수목원에서 수행된 연구(Ahn et al., 2024)는 난온대 상록활엽수림과 낙엽활엽수림 간 나방 및 나비

군집의 다양성 패턴에 뚜렷한 차이가 있음을 보여주었다. 나방의 경우, 추정 종 풍부도가 낙엽활엽수림보다 상록 활엽수림에서 더 높게 나타났다. 또한 베타 다양성 분석 결과, 두 삼림 유형 간의 나방 군집은 높은 종 교체 양상을 보였다. 이는 각 삼림 유형이 고유한 곤충 군집을 지탱하고 있음을 의미한다. 기후변화로 난온대림의 북상이 가속화되면서 두 삼림 유형 간의 경쟁이 심화되고 있으며, 이러한 식생 구조의 변화는 특정 식물을 먹이로 삼는 곤충 군집의 조성과 풍부도에 직접적인 영향을 미칠 것이다.

• 토양 – 식생 – 곤충의 상호작용

생태계의 각 요소는 긴밀하게 연결되어 있으며, 이러한 관계는 상향식 효과를 통해 명확히 드러난다. 지리산과 한라산에서 수행된 연구(Choi, 2015)에 따르면, 토양의 유기물과 총질소 함량 같은 비옥도 요인이 식물의 생물량과 다양성을 결정하는 일차적 동인으로 작용했다. 풍부해진 식물 자원은 다시 나방 군집의 풍부도와 종 다양성을 높이는 결과로 이어졌다. 이 발견은 토양의 생지화학적 특성이 초식동물 군집의 구조를 직접적으로 조절하는 상향식 영양 단계 폭포 효과를 명확하게 보여주는 결정적인 사례이다.

• 환경 구배와 교란에 대한 반응

곤충 군집은 고도와 같은 환경 구배와 산불 같은 돌발적 교란에 역동적으로 반응한다. 지리산과 한라산 연구 (Choi et al., 2022)에서는 고도가 높아짐에 따라 나방 군집의 다양성이 중간 고도에서 정점을 이루는 패턴을 보였다. 이는 전 세계 산지 곤충 군집에서 공통적으로 관찰되는 현상이다. 한편, 2012년 한라산에서 발생한 산불 이후의 변화를 추적한 연구에서는, 산불로 인해 종 풍부도와 개체수가 일시적으로 감소했으나, 3년 이내에 빠르게 회복되는 높은 회복탄력성을 보였다. 이는 곤충 군집이 교란에 대한 빠른 적응 능력을 가지고 있음을 보여 주었다. 이처럼 곤충 군집의 변화는 삼림 유형의 전환, 토양 비옥도의 변화, 그리고 산불과 같은 교란에 대한 생태계의 반응을 종합적으로 반영하는 중요한 신호이다.

2) 기후변화의 위협 : 가뭄에 대한 식물의 생리적 반응 분석

기후변화로 인해 전 세계적으로 가뭄의 빈도와 강도가 증가하고 있으며, 이는 산림 생태계의 구조와 기능에 중대한 위협이 되고 있다. 가뭄 스트레스에 대한 식물의 생리적 반응을 이해하는 것은 특정 수종의 생존 가능성을 예측하고, 미래 기후에 적응할 수 있는 산림 복원 및 관리 전략을 수립하는 데 필수적이다. 통제된 환경에서의 가뭄 실험은 이러한 복잡한 반응을 규명하는 데 핵심적인 통찰을 제공한다.

• 수종별 가뭄 저항성 비교

산벚나무(*Prunus sargentii*)와 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*) 묘목을 대상으로 한 가뭄 스트레스 반응 연구(Bhusal et al., 2020)는 수종 간 저항성 차이를 명확히 보여주었다. 가뭄 조건에서 두 수종 모두 잎 크기와 가지 생장이 감소하고 잎 질량 면적이 증가하는 공통된 반응을 보였다. 그러나 생리적 지표에서는 뚜렷한 차이가 나타났다. 강한 가뭄 조건에서 산벚나무의 최대 광합성률은 43.4% 감소한 반면, 일본잎갈나무는 32.4% 감소에 그쳤다. 이는 일본잎갈나무가 기공을 더 효율적으로 조절하여 체내 수분 손실을 최소화하는 등 더 높은 가뭄 저항성 전략을 가지고 있음을 정량적으로 보여주었다.

• 가뭄 저항성 지표 식별

11개 주요 수종을 대상으로 2년간 수행된 장기 가뭄 실험(Bhusal et al., 2021)은 가뭄 저항성을 예측할 수 있는 핵심 지표를 식별하는 데 기여했다. 연구 결과,

가뭄 저항성이 높은 종들은 공통적으로 높은 잎 질량 면적과 광합성을 유지하며, 낮은 탄소 동위원소 분별 ($\delta^{13}\text{C}$) 값을 보이는 특성을 가졌다. 이러한 지표들을 종합하여 잣나무(*Pinus koraiensis*)는 가뭄에 대한 저항성이 가장 높은 종으로, 반면 상수리나무(*Quercus acutissima*)는 가장 민감한 종으로 분류되었다. 이 결과는 미래의 건조한 기후 환경에 적합한 조림 수종을 과학적으로 선정하는 데 중요한 기준을 제공한다.

• 가뭄 경화(Drought Hardening) 효과

과거의 스트레스 경험에 미래의 스트레스에 대한 저항성을 높일 수 있다는 '가뭄 경화' 효과가 소나무(*Pinus densiflora*) 묘목 연구(Byeon et al., 2023)를 통해 입증되었다. 2년간 '중간 강도의 가뭄'을 경험한 묘목들은 가혹한 가뭄이나 통제 환경에서 자란 묘목들보다 다른 장소로 이식된 후 겪는 스트레스에 더 잘 견디는 것으로 나타났다. 이식 후, 중간 가뭄 처리구의 묘목들은 더 높은 수분 포텐셜을 유지하며 생리적 안정성을 보였다. 이는 적절한 수준의 가뭄을 유도하는 양묘 기술이 묘목의 현장 활착률을 높이고, 건조 기후에 대비한 산림 복원 전략의 성공률을 제고하는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

3) 산림 식생 동태 및 식물계절 : 기후변화로 인한 식생 반응

기후변화는 산림 생태계의 구조와 기능에 영향을 미치고 있다. 구상나무로 대표되는 기후변화 민간 수종의 쇠퇴, 대규모 산불, 식물계절의 변동은 산림생태계의 서비스 기능 변동을 예고한다. 또한 우리나라 산림의 하층부를 광범위하게 우점하는 조릿대(*Sasa borealis*)는 산림의 천이와 재생에 중대한 영향을 미치고 있어 산림 관리에 중요한 요소이다.

• 환경 요인에 따른 조릿대의 생육 특성 변화

한라산에서 수행된 연구(Lee et al., 2019)는 조릿대의 생육 특성이 고도와 수관 개방도에 따라 크게 달라짐을 보여주었다. 고도가 높아지고 상층부 수관이 열려 빛의

양이 증가할수록 조릿대의 밀도와 탄소/질소 비율(C/N ratio)은 증가하는 경향을 보였다. 반면, 잎의 면적, 수분 함량, 질소 함량은 감소했다. 이러한 식물 특성의 변화는 조릿대를 먹이로 삼는 초식곤충과 이들을 포식하는 포식자 군집에 연쇄적으로 영향을 미친다. 즉, 식물의 질 변화가 상위 영양 단계로 파급되는 효과가 발생하며, 이는 조릿대가 산림 하층부 생태계의 핵심 조절자임을 보여준다.

• 자연적 교란과 조릿대 제어 가능성

조릿대 군락을 효과적으로 관리하고 산림 재생을 촉진하는 방안은 오랜 숙원이었다. 본 연구는 두 가지 자연적 교란, 즉 조릿대의 동시 개화 후 고사 현상과 멧돼지의 땅 파기 활동이 결합될 때 강력한 시너지 효과를 낼 수 있음을 밝혔다(Cho et al., 2021). 조릿대가 개화 후 고사한 지역에서 멧돼지의 땅 파기 활동이 더해지자, 수목 유묘의 종 풍부도가 다른 어떤 처리구보다 유의미하게 증가했다. 멧돼지가 땅을 파헤치면서 토양을 노출시키고 조릿대의 지하경을 파괴하여 다른 수목 종자가 발아하고 정착할 수 있는 '재생 니치' 또는 '안전한 장소'를 제공했기 때문이다. 반면, 인위적인 벌초 작업은 오히려 조릿대의 지하경을 자극하여 더 왕성한 재생을 유도하는 역효과를 낳았다. 이는 자연적 교란 과정을 이해하고 활용하는 것이 지속 가능한 산림 관리의 중요한 기회가 될 수 있음을 시사한다.

• 구상나무의 쇠퇴

구상나무는 해발 1,000m 이상의 고산지대에 분포하는 한국 특산종으로, 2011년에 IUCN 적색목록에서 위기 종(EN)으로 등록되었다. 한라산 영실지역의 구상나무를 6년간(2011년~2017년) 비교분석한 연구 결과(송주현 외, 2019), 구상나무의 총 개체수가 ha당 780개체에서 655개체로 약 16.3% 감소했다. 또한 곧게 서서 생육하는 개체의 비율은 66.1%에서 60.2%로 감소했으며, 쓰러져 고사한 개체의 비율은 193.7%로 크게 증가하고 있음을 확인하였다.

• 피노캠을 활용한 식물계절 변동 파악

피노캠(Phenocam)은 RGB 센서 카메라를 활용하여 근거리에서 고빈도(30분~1시간)로 식물 이미지를 수집하는 자동영상촬영장치로, 기후변화에 따른 식물 계절 변화를 분석하는 데 중요한 역할을 한다. 장기생태연구에서는 2017년부터 피노캠을 운영하여 2025년 현재 총 10개 지소에서 데이터를 수집하고 있다. 연구 결과, 대표적인 침엽수(소나무, 곰솔)는 전체 생장기간이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 주로 겨울철 기온 및 강수량과 양의 상관성을 보였다. 또한 상록활엽수(붉은가시나무)는 기온보다 건기 강수량이 GCC(Green Chromatic Coordinate) 변동에 지대한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

• 산불 복원 전략 제시

2000년 동해안 산불 이후 소나무 숲의 20년간 자연 재생 과정을 추적하였다(Jung et al., 2023). 산불 강도(경미 또는 심각)와 초기 재생 정도(높음, 중간, 낮음)에 따라 영구 플롯을 설치하여 나무종 재생 전략과 숲 구조 변화를 조사한 결과, 화재 직후 2년 이내에 활발한 맹아(싹틔우기) 재생이 일어나 수목이 초기에 복원되었고, 20년 후에는 소나무 우세 숲이 신갈나무와 같은 참나무류가 지배하는 숲 또는 혼합림으로 전환되는 분기 현상이 나타났다. 특히 화재 전 맹아 능력이 있는 나무종의 풍부도가 이후 숲 구조 발달을 예측하는 중요한 지표가 되었으며, 이는 향후 산림 복원 정책 수립에 유용한 정보로 활용될 수 있다.

4) 환경 변화에 민감한 조류 군집의 동태

조류는 넓은 활동 반경과 높은 이동성을 가지며 서식지의 질, 먹이 자원의 풍부함, 기후 변화 등 다양한 환경 요인에 민감하게 반응한다. 이러한 특성으로 인해 조류 군집은 생태계 전반의 건강성과 변화를 파악하는 데 유용한 지표 분류군으로 활용된다. 특히 고산 지대와 같은 취약한 환경에서 조류 군집의 동태를 연구하는 것은 기후변화의 영향을 가늠하는 중요한 척도이다.

• 시공간적 생태 지위 분화

한라산 고산 습지에서 카메라 트랩을 이용해 수행된 연구(Jeong et al., 2024)는 제한된 서식지 내에서 여러 조류 종들이 어떻게 공존하는지를 명확히 보여주었다. 연구 결과, 참새목(Passeriformes)에 속하는 조류들은 활동 시간대(아침, 오후 등)와 서식지 유형을 미세하게 분화하여 경쟁을 회피하는 '시공간적 생태 지위 분화' 전략을 사용하고 있었다. 이러한 행동적 유연성은 다양한 종이 한정된 자원을 공유하며 공존할 수 있게 하는 핵심적인 생태학적 메커니즘이다.

• 핵심 서식지로서의 습지의 중요성

본 연구(Jeong et al., 2024)는 고산 습지가 조류 군집에게 얼마나 중요한지를 정량적으로 입증했다. 전체 연구 지역에서 습지가 차지하는 면적은 매우 작았지만, 조류의 관찰 빈도를 기반으로 한 서식지 이용률 분석 결과, 습지는 다른 서식지 유형에 비해 압도적으로 높은 선호도를 보였다. 이는 고산 습지가 물, 먹이, 은신처 등을 제공하는 핵심적인 생태 거점으로 기능하고 있음을 의미한다. 따라서 기후변화로 인해 면적이 줄어들거나 건조화 될 위험에 처한 고산 습지를 보전하는 것은 조류 다양성 유지를 위해 매우 시급하고 중요한 과제이다.

• 생태계 내 연결성

조류 군집의 동태는 독립적으로 존재하지 않으며, 생태계 내 다른 구성원들과 긴밀한 먹이망으로 연결되어 있다. 지리산에서 수행된 연구(Kim & Choi, 2014)에 따르면, 곤줄박이와 같은 산림 조류의 번식 시기는 주요 먹이 자원인 초식곤충 애벌레의 활동이 가장 왕성한 시기와 정확히 일치하는 것으로 나타났다. 상록활엽수림과 낙엽활엽수림의 나방 군집 건강성은 곤줄박이와 같은 식충성 조류의 먹이 확보 가능성을 직접적으로 결정한다. 이는 식물-곤충-조류로 이어지는 영양 단계 간의 동조화(synchrony)가 조류의 번식 성공과 개체군 유지에 결정적인 역할을 함을 보여준다.

5) 생태계의 균간 : 탄소를 중심으로 한 물질 순환

생태계의 생산성과 안정성은 영양염류와 에너지의 끊임없는 순환에 의해 유지된다. 특히 탄소 순환은 식물의 광합성을 통한 유기물 생산, 미생물에 의한 분해, 그리고 토양과 식생 내 저장에 이르는 전 과정을 아우르며, 지구 온난화와 직결된 핵심적인 생태계 과정이다. 따라서 탄소 순환의 각 단계를 이해하는 것은 기후변화의 영향을 평가하고 대응 전략을 수립하는 데 있어 필수적이다.

• 분해 과정과 양분 회수

낙엽의 분해는 식생에 의해 고정된 탄소와 영양염류를 다시 토양으로 되돌려 보내는 핵심적인 관문이다. 소나무와 곰솔 낙엽을 대상으로 60개월간 진행된 장기 분해 실험(Lee et al., 2021) 결과, 분해가 진행됨에 따라 낙엽의 무게가 감소하고 C/N 비율과 C/P 비율이 점차 낮아졌다. 이는 탄소는 흡수로 방출되는 반면 질소(N)와 인(P)은 토양으로 방출(무기화)되기 때문이며, 이렇게 회수된 양분은 다음 세대 식생이 이용할 수 있는 자원이 되어 생태계의 지속적인 생산성을 뒷받침한다.

• 토양 비옥도와 탄소 고정

분해를 통해 토양으로 회수된 양분은 다시 식물에 흡수되어 생물량으로 고정되는 순환 고리를 형성한다. 토양의 유기물과 질소 함량 등 토양 비옥도가 높은 지역일수록 지상부 식생의 생물량, 즉 탄소 저장량이 유의미하게 증가하는 것으로 나타났다(Choi, 2015). 이는 건강한 토양이 더 많은 탄소를 식생 내에 고정시키는 능력을 가짐을 의미한다. 동시에, 바로 이 토양 비옥도가 식물 다양성을 높이고, 궁극적으로 곤충 군집의 다양성을 결정하는 '상향식 효과'의 근간이 된다. 이처럼 탄소 순환과 생물다양성은 토양이라는 공통 기반 위에서 긴밀하게 연결되어 있다.

• 토양호흡량 산정을 위한 시스템 개발

토양호흡량 정량화를 위해 다중채널 자동챔버시스템을 개발하고 이를 활용하여 신갈나무림 토양 표면에서 발생하는 이산화탄소(CO_2) 유출량을 연속적으로 측정하였다(주승진 외., 2021). 1년 동안 장기 측정을 통해 MCACs의 안정성과 신뢰도를 검증했으며, 토양 CO_2 유출 속도의 계절적 및 일별 변동이 토양 온도 변화에 매우 밀접하게 연관되어 있음을 발견했다. 특히 5cm 깊이의 토양 온도와 유출 속도가 가장 높은 상관관계를 보였고, 이는 이 시스템이 삼림 생태계의 탄소 순환 동태와 미기상 요인의 영향을 장기적으로 모니터링하는데 매우 유용함을 입증했다.

6) 과학 기반 정책을 위한 초석 : 국가 연구 인프라 동향

기후변화와 같이 시공간적 규모가 크고 복잡한 환경 문제를 해결하기 위해서는 개별적이고 단편적인 연구로는 부족하다. 표준화된 프로토콜에 따라 장기간에 걸쳐 데이터를 수집하고, 이를 연구자 커뮤니티 전체가 공유하며 공동으로 활용할 수 있는 체계적인 연구 인프라가 필수적이다.

• 장기생태연구 방향

2004년부터 환경부 주관으로 '한국 장기생태연구 (KLTER)' 사업을 시작했으며, 2024년에는 생태계 표준관측망 사업 계획을 수립하고, 표준화된 데이터 생산을 위한 인프라(고정지소 5개소, 이동식 관측소 2기)를 구축하고 있다. 이를 통해 기후변화로 인한 생태계 변동을 실시간 모니터링하고, 실효적인 기후 변화 대응 전략 수립에 기여하고자 한다.

• 해외 선진 사례의 교훈

성공적인 국가 장기생태 연구 인프라를 구축하기 위해서는 해외 선진 사례의 교훈을 참고할 필요가 있다.

- 미국 NEON (National Ecological Observatory Network) : NEON은 미국 대륙 전역에 걸쳐 81개의 관측소를 동일한 표준 프로토콜로 운영하며, 수집된 모든 데이터를 연구자들에게 완전 개방하는 것을 원칙으로 한다(McKay, 2023). 특히 주목할 점은, 표준화를 추구하면서도 하천 유량에 따라 수중 관측 장비 설치 방식을 다르게 하는 등 현장 조건에 맞춰 유연성을 확보했다. 이는 표준화와 현장 적용성 사이의 균형이 중요함을 시사한다.
- 호주 TERN (Terrestrial Ecosystem Research Network) : TERN은 집중 관측이 이루어지는 핵심 관측소(SuperSite)와 더불어, 건조나 산불 후 경과 시간과 같은 특정 환경 구배를 따라 조사구를 설치하는 전략을 채택하고 있다 (Prober et al., 2023). 이러한 접근법은 기후변화 적응이나 산불 관리와 같은 지역의 핵심 현안에 대해 직접적이고 과학적인 해답을 제공하는 데 매우 효과적이다.
- 일본 타카야마 사이트 (Takayama Site) : 타카야마 사이트는 하나의 '슈퍼 사이트' 내에서 현장관측, 원격탐사, 생태계 모델링을 유기적으로 통합하여 다학제적 융합 연구를 수행하는 모델의 강점을 보여준다(Muraoka, 2023). 이는 개별 연구 분야를 넘어 생태계 전체를 시스템적으로 이해하는 데 필수적인 접근법이며, 여러 연구 네트워크를 연결하는 '네트워크의 네트워크화(networking the networks)'로 나아가 것의 중요성을 보여준다.

국내 장기생태연구 인프라가 한 단계 더 도약하기 위해서는 데이터 수집 방법의 표준화를 강화하고, 수집된 데이터를 모든 연구자가 자유롭게 활용할 수 있도록 데이터 개방 정책을 확대해야 한다. 또한, 다학제적 통합 연구를 촉진하고 국제 네트워크와의 연계를 강화하여 전 지구적 환경 문제 해결에 기여하는 글로벌 연구 인프라로 발전해 나가야 할 것이다.

3. 결론

1) 장기생태연구의 종합적 의의와 중요성

본 연구논문의 6개 핵심 분야의 연구 결과들은 한반도 생태계가 기후변화와 다양한 환경 교란에 대해 복합적이고 유기적으로 반응하는 하나의 거대한 시스템임을 명확히 보여준다. 연구 논문에서 보여준 바와 같이, 토양의 작은 변화가 식생을 거쳐 곤충 군집의 풍부도를 결정하고, 단일 우점종인 조릿대의 동태가 산림 전체의 재생과 조류의 서식 환경을 좌우하며, 이러한 모든 생명 활동은 탄소와 영양염류의 보이지 않는 순환에 의해 지탱된다.

이처럼 생태계의 각 구성요소들은 긴밀하게 연결되어 있으며, 그 변화의 패턴과 근본적인 원인을 규명하는 것은 장기적인 관찰과 데이터를 통해서만 가능하다. 곤충, 식물, 조류, 그리고 물질 순환에 이르기까지, 단편적인 연구로는 결코 포착할 수 없는 생태계의 복잡성과 연계성을 밝히는 것이 바로 장기생태연구의 핵심적인 의의이다. 따라서 장기생태연구는 불확실한 미래 환경에 대비하기 위한 단순한 현상 조사 활동을 넘어, 국가의 지속가능성을 담보하는 필수적인 과학적 투자라 할 수 있다.

2) 기후변화 대응을 위한 발전 방향 제언

환경변화에 생태계는 다양한 요소들이 상호 작용하여 반응한다. 이를 이해하고 올바른 정책방향을 제시하기 위해서는 장기간의 통합연구가 필수적이다. 국가 장기 생태연구는 기후변화에 효과적으로 대응하기 위한 데이터 생산과 과학적인 근거 제시를 목표로 수행되어 왔다. 그러나 그간 장기생태연구는 효과적인 기후변화 정책 방향 제시와 데이터 생산에 부족함이 있었다. 이를 극복하기 위한 방향성을 제언한다.

- 첫째, 증거 기반의 생태계 관리 연구 확대 : 과학적 데이터를 실질적인 현장 관리 정책으로 전환해야

한다. 예를 들어, 가뭄 저항성 실험 결과(Bhusal et al., 2021)를 바탕으로 미래 기후에 적합한 조림 수종을 선정하고, 조릿대 군락 관리 시 인위적 벌초가 오히려 지하경을 자극해 재생을 촉진하는 역효과를 낸다는 연구 결과(Cho et al., 2021)에 따라 자연적 교란 메커니즘을 활용하는 방식으로 전략을 전환할 필요가 있음을 증명했다. 이처럼 과학적 증거에 기반한 우선순위 설정과 맞춤형 연구가 강화되어야 한다.

• 둘째, 통합적 연구 인프라에 대한 투자 확대 :

미국의 NEON, 호주의 TERN 사례처럼 국가생태 관측망을 표준화된 방식으로 확충하고, 이를 통해 수집된 고품질의 데이터를 모든 연구자와 정책 결정자가 쉽게 접근하고 활용할 수 있도록 '데이터 개방' 원칙을 더욱 강화해야 한다. 이는 중복 투자를 방지하고 연구 효율성을 극대화하며, 데이터 융합을 통한 새로운 과학적 발견과 혁신을 촉진하는 기반이 될 것이다. 통합 데이터 플랫폼 구축은 국가적 차원의 생태계 진단과 예측 능력을 획기적으로 향상시킬 것이다.

• 셋째, 기후변화 적응을 위한 장기적 비전 수립 :

생태계의 변화는 수십 년에 걸쳐 점진적으로 일어나므로, 단기적인 성과에 얹매이지 않는 장기적인 안목과 비전이 필요하다. 장기생태연구는 그 특성상 즉각적인 결과를 내기 어렵지만, 미래의 위기에 대응할 수 있는 가장 확실한 과학적 자산을 축적하는 과정이다. 따라서 장기생태 연구에 대한 지속적이고 안정적인 지원 및 체계 확립이 필요하다. 이를 통해 축적된 지식은 미래 세대를 위한 건강한 생태계를 보전하고 기후변화에 대한 국가적 회복탄력성을 높이는 데 핵심적인 역할을 할 것이다.

IV. 참고문헌

강태한, 이상보, 이한수, 백운기, 유재평, 진선덕. 한국에 월동하는 독수리의 비행 행동 특성 분석. *한국환경생물학회지*, 37(4), 579-584 (2019). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.4.579>

권혁영, 권순직, 손세환, 이영상, 주성배, 박정수, 김재훈, 전영철. 점봉산 산지 수계의 저서성 대형 무척추동물 분포 특성 및 강우가 군집에 미치는 영향 연구. *한국습지학회지*, 26(4), 448-456 (2024). <https://doi.org/10.17663/JWR.2024.26.4.448>

김낭희, 최세웅. 온대낙엽수림에서 초식곤충의 계절과 고도에 따른 먹이활동. *한국산림환경학회지*, 47(1), 24-31 (2014). <https://doi.org/10.11614/KSL.2014.47.1.024>

김정규, 유동수, 권오창, 김홍기. 2017~2018년 말레이즈 트랩을 이용한 남한 내 야생벌(벌목: 벌목)의 시·공간별 출현 및 분포 현황. *한국환경생태학회지*, 33(6), 654-663 (2019). <https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.6.654>

박진영, 정길상, 최유성, 박소연, 노푸름, 이윤경, 최성훈, 윤종민, 진선덕. 한국에 도래하는 쇠백로의 집단유전 분석. *한국조류학회지*, 26(2), 69-74 (2019). <https://doi.org/10.30980/kjo.2019.12.26.2.69>

송주현, 한상학, 이상훈, 윤충원. 지리산과 한라산의 구상나무 임분 구조의 생태적 특성. *한국산림과학회지*, 110(4), 590-600 (2021). <https://doi.org/10.14578/jkfs.2021.110.4.590>

송주현, 한상학, 이상훈, 윤충원. 한라산 영실 지역 구상나무림의 6년간(2011년과 2017년)의 임분 구조 변화. *한국산림과학회지*, 108(1), 1-9 (2019). <https://doi.org/10.14578/jkfs.2019.108.1.1>

안나현, 이상훈, 안정섭. 청산도 나비 군집의 계절적 변화 및 다양성 연구. *한국도서연구*, 32(4), 287-299 (2020). <https://doi.org/10.26840/JKI.32.4.287>

안나현, 이상훈, 최세웅. 완도 수목원 난대림에 서식하는 대형나방의 다양성 및 계절적 변화 연구. *한국도서연구*, 33(4), 141-164 (2021). <https://doi.org/10.26840/JKI.33.4.141>

원호연, 이영상, 이재석, 이일환. 점봉산 신갈나무 낙엽의 분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석. *한국환경생물학회지*, 40(4), 455-463 (2022). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.4.455>

원호연, 이일환, 조수언, 이영상. 한반도 중부지역 조림지 소나무와 곰솔의 장기적 낙엽 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 동태변화. *한국환경생물학회지*, 39(3), 374-382 (2021). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2021.39.3.374>

이규연, 차지연, 이은주, 이승철, 손승우, 김성환, 김현준, 최준원, 오능환. 점봉산 국가장기생태연구지 시냇물 용존유기물의 생지화학적 특성. *한국물환경학회지*, 41(1), 54-69 (2025). <https://doi.org/10.15681/KSWE.2025.41.1.54>

이상연, 유영한, 정길상, 최유성, 주성배. 번식기 유부도 일대에 서식하는 검은머리물떼새 (*Haematopus ostralegus osculans*) 성체와 미성체의 섭식 능력 비교. *한국환경생물학회지*, 37(4), 483-492 (2019). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.4.483>

이상훈, 안나현, 안정섭. 지리산 나비의 고도에 따른 다양성과 서식 분포. *한국환경생물학회지*, 38(4), 497-506 (2020). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.4.497>

안정섭, 정종철, 최세웅. 지리산국립공원의 대형나방 다양성 목록. *국립공원연구지*, 7(1), 20-52(2016).

이상훈, 안나현. 전남 완도군 고금도 나비 군집의 계절변화 및 다양성 연구. *한국도서연구*, 33(4), 165-179 (2021). <https://doi.org/10.26840/JKI.33.4.165>

이재연, 김미라, 박정수, 이효혜미. 수목의 미세수준 생장 추적을 위한 자동 수목생장측정기의 효능성 평가. 생태 및 복원 인프라, 11(4), 265-272 (2024). <https://doi.org/10.17820/eri.2024.11.4.265>

이재호, 유영주, 이상훈, 신만석, 이재석. 우리나라 소나무림의 토양호흡 특성: 점봉산, 남산, 지리산 사례 연구. 한국환경과학회지, 56(4), 440-448 (2023). <https://doi.org/10.11614/KSL.2023.56.4.440>

이진, 이재영, 장범준, 정길상, 최세웅. 고도와 수관부 유무가 제주조릿대 군락과 소비자 군집에 미치는 영향. 한국환경생물학회지, 37(3), 249-259 (2019). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.3.249>

주승진, 임명희, 주재원, 원호연, 진선덕. 다중채널 자동 챔버시스템에 의한 삼림토양의 이산화탄소 유출량의 연속측정. 생태 및 복원 인프라, 8(1), 32-43 (2021). <https://doi.org/10.17820/eri.2021.8.1.032>

최성훈, 김우열, 이두표, 진선덕. 기상변화에 따른 순천만 수조류의 군집특성. 한국조류학회지, 26(2), 93-99 (2019). <https://doi.org/10.30980/kjo.2019.12.26.2.93>

최세웅, 김낭희. 온대 낙엽수림에 서식하는 나비목 애벌레 다양성에 관한 연구. 한국응용곤충학회지, 53(3), 261-270 (2014). <https://doi.org/10.5656/KSAE.2014.06.0.025>

한상학, 윤충원, 송주현, 김호진, 이정은, 윤이슬, 유윤서, 이상훈. 울릉도 너도밤나무림의 미세지형별 생태적 특성. 한국환경생태학회지, 33(6), 686-694 (2019). <https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.6.686>

한상학, 윤충원, 이상훈. 온대북부형 낙엽활엽수림의 디지털 카메라 반복 이미지를 활용한 식물 계절 분석. 한국산림과학회지, 109(4), 361-370 (2020). <https://doi.org/10.14578/jkfs.2020.109.4.361>

한승우, 진선덕, 임은홍, 최성훈, 이준우. 임도 개설에 따른 조류의 행동권 변화에 관한 연구. 한국조류학회지, 26(2), 116-121 (2019). <https://doi.org/10.30980/kjo.2019.12.26.2.116>

한아름, 진선덕, 정길상, 원호연, 이영상, 손세환, 최성훈, 강혜진, 이일환. 구례 왕벚나무 가로수의 조기낙엽 진단 및 친환경적 관리 방법. 한국환경생물학회지, 37(4), 682-689 (2019). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.4.682>

홍민기, 이재연, 박정수, 이효혜미. 함평만 갯벌의 모래 퇴적물로 인한 염습지 식물의 공간적 변화. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 9(4), 247-258 (2022). <https://doi.org/10.17820/eri.2022.9.4.247>

홍민기, 이효혜미, 박정수. Phenocam을 활용한 국내 습지 및 산림생태계 대표 수종의 계절적 변화 분석. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 10(4), 226-236 (2023). <https://doi.org/10.17820/eri.2023.10.4.226>

Bhusal, N., Adhikari, A., Lee, M., Han, A.-R., Han, A.-R., Kim, H.-S. & Kim, H.-S. Evaluation of growth responses of six gymnosperm species under long-term excessive irrigation and traits determining species resistance to waterlogging. *Agric. For. Meteorol.* 323, 109071 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109071>

Bhusal, N., Lee, M., Lee, H., Adhikari, A., Han, A., Han, A., & Kim, H.-S. Evaluation of morphological, physiological, and biochemical traits for assessing drought resistance in eleven tree species. *Sci. Total Environ.* 779, 146466 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146466>

Byeon, S., Kim, S., Hong, J., Kim, T. K., Huh, W., Kim, K., Lee, M., Lee, H., Kim, S., Park, C., Song, W., Han, A., Oh, C., Chandrasekaran, U.,

& Kim, H.-S. Promotion of cold stress tolerance in transplanted *Pinus densiflora* seedlings after long-term moderate drought hardening. *Forest Ecol. Manage.* 557, 121773 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121773>

Byeon, S., Kim, S., Hong, J., Kim, T. K., Huh, W., Kim, K., Lee, M., Lee, H., Kim, S., Park, C. Bhusal, N., Han A-R., Chandrasekaran U., & Kim, H.-S. Waterlogging hardening effect on transplant stress tolerance in *Pinus densiflora*. *Forests* 15, 445 (2024). <https://doi.org/10.3390/f15030445>

Byeon, S., Kim, S.-H., Hong, J., Kim, T.-K., Huh, W., Kim, K., Lee, M., Lee, H., Kim, S.-K., Park, C. Bhusal, M., Han, A-R., Chandrasekaran, U., & Kim, H.-S. Drought hardening effect on improving transplant stress tolerance in *Pinus densiflora*. *Environ. Exp. Bot.* 207, 105222 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105222>

Chandrasekaran, U., Byeon, S., Kim, K., Huh, W., Han, A.-R., Lee, Y.-S. & Kim, H.-S. Influence of severe drought on mineral nutrient status in *Pinus strobus* L. *Forest Sci. Technol.* 19, 190–196 (2023). <https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2220584>

Chandrasekaran, U., Kim, K., Byeon, S., Huh, W., Han, A.-R., Lee, Y.-S., & Kim, H.-S. Long-term drought modifies carbon allocation and abscisic acid levels in five forest tree species. *J. Ecol. Environ.* 47, 23 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.071>

Chandrasekaran, U., Lee, M., Baek, J., Park, Y., Han, A.-R., Oh, N.-H., Choe, H. & Kim, H.-S. Flash drought as a possible contributor to seedling dieback in the endangered conifer *Abies koreana*. *Physiol. Plant.* 177, e70218 (2025). <https://doi.org/10.1111/ppl.70218>

Chandrasekaran, U., Park, S., Kim, K., Byeon, S., Han, A.-R., Lee, Y.-S., Oh, N.-H., Chung, H., Choe, H. & Kim, H.-S. Energy deprivation affects nitrogen assimilation and fatty acid biosynthesis leading to leaf chlorosis under waterlogging stress in the endangered *Abies koreana*. *Tree Physiol.* 44, tpa055 (2024). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpa055>

Cho, S., Kim, Y., & Choung, Y. Distribution and synchronized massive flowering of *Sasa borealis* in the forests of Korean National Parks. *J. Ecol. Environ.* 42, 37 (2018). <https://doi.org/10.1186/s41610-018-0099-7>

Cho, S., Kim, Y., Jung, S., & Choung, Y. Synergistic effect of dwarf bamboo flowering and wild boar rooting on forest regeneration. *Forests* 12, 1207 (2021). <https://doi.org/10.3390/f12091207>

Cho, S., Lee, B., & Choung, Y. Rare nationwide synchronized massive flowering and decline event of *Sasa borealis* (Hack.) Makino in South Korea. *J. Plant Biol.* 60, 423–430 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12374-017-0094-z>

Cho, S., Lee, K., & Choung, Y. Distribution, abundance, and effect on plant species diversity of *Sasa borealis* in Korean forests. *J. Ecol. Environ.* 42, 9 (2018). <https://doi.org/10.1186/s41610-018-0069-0>

Choi, S.-W. & Thein, P. P. Distribution breadth and species turnover of night-flying beetles and moths on different mainland and island mountains. *Ecol. Res.* 33, 237–247 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1555-z>

Choi, S.-W. A high mountain moth assemblage quickly recovers after fire on Mt. Hallasan, Jejudo Island, South Korea. *Ann. Entomol.*

Soc. Am. 111, 304–311 (2018). <https://doi.org/10.1093/aesa/say023>

Choi, S.-W. Bottom-up impact of soils on the network of soil, plants, and moths (Lepidoptera) in a South Korean temperate forest. Can. Entomol. 147, 405–418 (2015). <https://doi.org/10.4039/tce.2014.57>

Beck, J., McCain, C. M., Axmacher, J. C., Ashton, L. A., Bärtschi, F., Brehm, G., Choi, S.-W., Cizek, O., Colwell, R. K., Fiedler, K., Francois, C. L., Highland, S., Holloway, J. D., Intachat, J., Kadlec, T., Kitching, R. L., Maunsell, S. C., Merckx, T., Nakamura, A., Odell, E., Sang, W., Toko, P. S., Zamecnik, J., Zou, Y., & Novotny, V. Elevational species richness gradients in a hyperdiverse insect taxon: a global meta-study on geometrid moths. Global Ecol. Biogeogr. 26, 412–424 (2017). <https://doi.org/10.1111/geb.12548>

Choi, S.-W. Patterns of an elevational gradient affecting moths across the South Korean mountains: effects of geometric constraints, plants, and climate. Ecol. Res. 31, 321–331 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11284-016-1341-3>

Choi, S.-W., An, J.-S., Lee, J.-Y., & Koo, K. A. Spatial and temporal changes in moth assemblages along an altitudinal gradient, Jeju-do island. Sci. Rep. 12, 20534 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24600-z>

Choi, S.-W., An, J.-S., Kim, N.-H., Lee, S.-H., Ahn, N.-H. Long-term (2005–2017) macromoth community monitoring at Mt. Jirisan National Park, South Korea. Ecol. Res. 34, 443–457 (2019). <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12021>

Choi, S.-W., Jang, B.-J. Effects of elevation and slope on the alpha and beta diversity of ground-dwelling beetles in Mt. Jirisan National Park, South Korea. J. Asia-Pac. Entomol. 25, 101993 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2022.101993>

Choi, S.-W., Kim, S.-S., Lee, J.-Y., & Noh, J. Trends in the homogenization of macromoth assemblages (2016–2023) in a Seoul City park. Sci. Rep. 15, 34714 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18373-4>

Choi, S.-W. Ahn, N.-H., Lee, S.-H., & Han, S.-H. Different diversity patterns of butterfly and moth assemblages between deciduous and evergreen broad-leaf forests. J. Asia-Pac. Entomol. 27, 102278 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2024.102278>

Choi, S.-W., Na, S.-H. Quantitative data from six years (2013–2018) of light trap sampling of macromoths (Lepidoptera) in Mt. Hallasan National Park, South Korea. Biodivers. Data J. 8, e51490 (2020). <https://doi.org/10.3897/BDJ.8.e51490>

Jeong, Y.-H., Choi, S.-H., Banjade, M., Jin, S.-D., Park, S.-M., Kunwar, B. & Oh, H.-S. Spatiotemporal niche separation among passeriformes in the Halla Mountain wetland of Jeju, Republic of Korea: insights from camera trap data. Animals 14, 724 (2024). <https://doi.org/10.3390/ani14050724>

Jung, S., Lee, J., Lee, K., Cho, S., Kim, B., Shin, Y., Lee, K. S., & Choung, Y. Twenty years of regeneration process for tree species in burnt pine forests with different severity and initial regeneration. J. Plant Biol. 66, 47–61 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12374-022-09375-0>

Kim, B.-J., Yim, S.-H., Sim, Y.-S., & Choo, Y.-S. Photosynthetic characteristics and chlorophyll content of *Vitex rotundifolia* in coastal sand dunes. *J. Ecol. Environ.* 47, 10 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.039>

Kim, H.-S., Bhusal, N., Lee, M., & Han, A.-R. Responses to drought stress in *Prunus sargentii* and *Larix kaempferi* seedlings using morphological and physiological parameters. *For. Ecol. Manage.* 465, 118099 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118099>

Kim, H. S., Chandrasekaran, U., Byeon, S., Kim, K., Kim, S. H., Park, C. O., Han, A. R., & Lee, Y.-S. Short-term severe drought influences root volatile biosynthesis in eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Front. Plant Sci.* 13, 1030140 (2022). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030140>

Kim, M. J., Kim, S.-S., Choi, S.-W. & Kim, I.-S. *Saturnia jonasii* Butler, 1877 on Jejudo Island, a new saturniid moth of South Korea with DNA data and morphology (Lepidoptera: Saturniidae). *Zootaxa* 3946, 374–386 (2015). <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3946.3.5>

Kim, Y.-B., Yim, S.-H., Sim, Y.-S., & Choo, Y.-S. Ecophysiological characteristics of *Rosa rugosa* under different environmental factors. *J. Ecol. Environ.* 47, 9 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.040>

Lee, M., Seo, D., Park, J. S., & Lee, J. S. Effect of slope gradient and litter on soil moisture content in temperate deciduous broadleaf forest. *Forests* 16, 1495 (2025). <https://doi.org/10.3390/f16091495>

McKay, C. Lessons from constructing and operating the national ecological observatory network. *J. Ecol. Environ.* 47, 17 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.073>

Muraoka, H., Saitoh, T. M., & Murayama, S. Long-term and multidisciplinary research networks on biodiversity and terrestrial ecosystems: findings and insights from Takayama super-site, central Japan. *J. Ecol. Environ.* 47, 22 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.069>

Park, J. S., Joo, S. J., Lee, J., Seo, D., Kim, H. S., Jeon, J., Yun, C. W., Lee, J. E., Choi, S. W., & Lee, J. Y. Long-term ecological monitoring in South Korea: progress and perspectives. *J. Ecol. Environ.* 47, 26 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.077>

Park, J., Hong, M., & Lee, H. Phenological response of an evergreen broadleaf tree, *Quercus acuta*, to meteorological variability: Evaluation of the performance of time series models. *Forests* 15, 2216 (2024). <https://doi.org/10.3390/f1512216>

Prober, S. M., Wiehl, G., Gosper, C. R., Schultz, L., Langley, H., & Macfarlane, C. The Great Western Woodlands TERN SuperSite: ecosystem monitoring infrastructure and key science learnings. *J. Ecol. Environ.* 47, 27 (2023). <https://doi.org/10.5141/jee.23.072>

Thein, P. P. & Choi, S.-W. Forest insect assemblages attracted to light trap on two high mountains (Mt. Jirisan and Mt. Hallasan) in South Korea. *J. For. Res.* 27, 1203–1210 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0212-7>

비매품/무료

93400



9 791166 987199

ISBN 979-11-6698-719-9