

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

제2차 국가 장기생태연구 논문 요약집



제2차 국가 장기생태연구 논문 요약집

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

제2차 국가 장기생태연구 논문 요약집

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

발 행 일 : 2025년 11월

발 행 처 : 국립생태원 생태변화연구팀
충청남도 서천군 마서면 금강로 1210
www.nie.re.kr

저 자 : 박정수, 한아름, 주성배, 이응필, 이영상, 이일환,
이재연, 홍민기, 김미라, 장혜정, 김준모, 정의

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

편 집 · 제 작 : (주)다정플러스 충남지사

기여자

강태한, 강혜진, 구경아, 권순직, 권오창, 권혁영, 김건호, 김남희, 김민지, 김병영, 김병준, 김서현, 김성수, 김성환, 김수경, 김영빈, 김영진, 김우열, 김익수, 김재훈, 김정규, 김태경, 김현석, 김현준, 김호진, 나상현, 노재상, 노푸름, 박상희, 박선미, 박소연, 박윤희, 박진영, 박찬오, 백운기, 백지원, 변시연, 서동민, 손세환, 손승우, 송우경, 송주현, 신만석, 신영섭, 심영석, 안나현, 안정섭, 오능환, 오창영, 오홍식, 원호연, 유동수, 유영주, 유영한, 유윤서, 유재평, 윤이슬, 윤종민, 윤충원, 이경은, 이규송, 이규연, 이두표, 이민수, 이민영, 이범준, 이상보, 이상연, 이상훈, 이승철, 이윤경, 이은주, 이재석, 이재영, 이재호, 이정은, 이준우, 이진, 이한수, 이호진, 이효혜미, 임명희, 임성환, 임은홍, 장범준, 전영철, 전지현, 정길상, 정상엽, 정연숙, 정영훈, 정해근, 조소연, 주승진, 주재원, 진선덕, 차지연, 최성환, 최성훈, 최세웅, 최유성, 최준원, 최혜영, 추연식, 한상학, 한승우, 한아름*, 허우진, 홍정현, Akihiro Nakamura, Arjun Adhikari, Binod Kunwar, Christy M. McCain, Cristina L. Francois, Erica Odell, Florian Bärtschi, Gunnar Brehm, Jan Beck, Jan C. Axmacher, Jaroslav Zamecnik, Jeremy D. Holloway, Jurie Intachat, Konrad Fiedler, Louise A. Ashton, Maniram Banjade, Narayan Bhusala, Oldrich Cizek, Pagi S. Toko, Pyae Pyae Thein, Robert K. Colwell, Roger L. Kitching, Sarah C. Maunsell, Steven Highland, Thomas Merckx, Tomas Kadlec, Umashankar Chandrasekaran, Vojtech Novotny, Weiguo Sang, Yi Zou

* 국립생태원 연구원

Contents

I . 탄소순환, 식생, 조류 연구 분야

1. 장기생태연구 방향 및 국외 생태계 관측망 사례 연구

- 8 Long-term ecological monitoring in South Korea: progress and perspectives
- 10 Lessons from constructing and operating the national ecological observatory network
- 12 Long-term and multidisciplinary research networks on biodiversity and terrestrial ecosystems: findings and insights from Takayama super-site, central Japan
- 14 The Great Western Woodlands TERN SuperSite: ecosystem monitoring infrastructure and key science learnings

2. 탄소순환 연구

- 16 한반도 중부지역 조림지 소나무와 곶솔의 장기적 낙엽 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 동태변화
- 18 다중채널 자동챔버 시스템에 의한 삼림토양의 이산화탄소 유출량의 연속측정
- 20 점봉산 신갈나무 낙엽의 분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석
- 22 우리나라 소나무림의 토양호흡 특성: 점봉산, 남산, 지리산 사례 연구 (2009~2010)
- 24 수목의 미세수준 생장 추적을 위한 자동 수목생장측정기의 효능성 평가
- 26 점봉산 국가장기생태연구지 시냇물 용존유기물의 생지화학적 특성
- 28 Effect of slope gradient and litter on soil moisture content in temperate deciduous broadleaf forest

3. 식생동태 변화 연구

- 30 Rare nationwide synchronized massive flowering and decline event of *Sasa borealis* (Hack.) Makino in South Korea
- 32 Distribution, abundance, and effect on plant species diversity of *Sasa borealis* in Korean forests
- 34 Distribution and synchronized massive flowering of *Sasa borealis* in the forests of Korean National Parks
- 36 구례 왕벚나무 가로수의 조기낙엽 진단 및 친환경적 관리 방법
- 38 울릉도 너도밤나무림의 미세지형별 생태적 특성
- 40 한라산 영실 지역 구상나무림의 6년간(2011년과 2017년)의 임분구조 변화
- 42 온대북부형 낙엽활엽수림의 디지털 카메라 반복 이미지를 활용한 식물계절 분석
- 44 Synergistic effect of dwarf bamboo flowering and wild boar rooting on forest regeneration
- 46 지리산과 한라산의 구상나무 임분 구조의 생태적 특성
- 48 함평만 갯벌의 모래 퇴적물로 인한 염습지 식물의 공간적 변이
- 50 Phenocam을 활용한 국내 습지 및 산림생태계 대표 수종의 계절적 변화 분석
- 52 Twenty years of regeneration process for tree species in burnt pine forests with different severity and initial regeneration

- 54 Ecophysiological characteristics of *Rosa rugosa* under different environmental factors
- 56 Photosynthetic characteristics and chlorophyll of *Vitex rotundifolia* in coastal sand dune
- 58 Phenological response of an evergreen broadleaf tree, *Quercus acuta*,
to meteorological variability: evaluation of the performance of time series models

4. 조류 모니터링 연구

- 60 기상변화에 따른 순천만 수조류의 군집특성
- 62 번식기 유부도 일대에 서식하는 검은머리물떼새(*Haematopus ostralegus osculans*)
성체와 미성체의 섭식 능력 비교
- 64 임도 개설에 따른 조류의 행동권 변화에 관한 연구
- 66 한국에 도래하는 쇠백로의 집단유전 분석
- 68 한국에 월동하는 독수리의 비행 행동 특성 분석
- 70 Spatiotemporal niche separation among passeriformes in the Halla mountain wetland
of Jeju, Republic of Korea: insights from camera trap data

5. 저서형 대형무척추동물 동태 변화 연구

- 72 점봉산 산지 수계의 저서성 대형무척추동물 분포 특성 및 강우가 군집에 미치는 영향 연구

II. 곤충 연구 분야

- 74 온대 낙엽수림에서 초식곤충의 계절과 고도에 따른 먹이활동 양상 연구
- 76 온대 낙엽수림에 서식하는 나비목 애벌레 다양성에 관한 연구
- 78 Bottom-up impact of soils on the network of soil, plants, and moths (Lepidoptera) in a South Korean temperate forest
- 80 *Saturnia jonasii* Butler, 1877 on Jeju Island, a new saturniid moth of South Korea with DNA data and morphology (Lepidoptera: Saturniidae)
- 82 Patterns of an elevational gradient affecting moths across the South Korean mountains: effects of geometric constraints, plants, and climate
- 84 Forest insect assemblages attracted to light trap on two high mountains (Mt. Jirisan and Mt. Hallasan) in South Korea
- 86 지리산국립공원의 대형나방 다양성 목록
- 88 Elevational species richness gradients in a hyperdiverse insect taxon: a global meta-study on geometrid moths
- 90 Distribution breadth and species turnover of night-flying beetles and moths on different mainland and island mountains
- 92 A high mountain moth assemblage quickly recovers after fire
- 94 Long-term (2005–2017) macromoth community monitoring at Mt. Jirisan National Park, South Korea
- 96 2017~2018년 말레이즈 트랩을 이용한 남한 내 야생벌(벌목: 벌아목)의 시·공간별 출현 및 분포 현황
- 98 고도와 수관부 유무가 제주조릿대 군락과 소비자 군집에 미치는 영향
- 100 Quantitative data from six years (2013-2018) of light trap sampling of macromoths (Lepidoptera) in Mt. Hallasan National Park, South Korea
- 102 지리산 나비의 고도에 따른 다양성과 서식 분포
- 104 청산도 나비 군집의 계절적 변화 및 다양성 연구
- 106 전남 완도군 고금도 나비 군집의 계절변화 및 다양성 연구
- 108 완도 수목원 난대림에 서식하는 대형나방의 다양성 및 계절적 변화 연구
- 110 Effects of elevation and slope on the alpha and beta diversity of ground-dwelling beetles in Mt. Jirisan National Park, South Korea
- 112 Spatial and temporal changes in moth assemblages along an altitudinal gradient, Jeju-do island
- 114 Different diversity patterns of butterfly and moth assemblages between deciduous and evergreen broad-leaf forests
- 116 Trends in the homogenization of macromoth assemblages (2016–2023) in a Seoul City park

III. 극한기후 대응 실험 연구

- 118 Responses to drought stress in *Prunus sargentii* and *Larix kaempferi* seedlings using morphological and physiological parameters
- 120 Evaluation of morphological, physiological, and biochemical traits for assessing drought resistance in eleven tree species
- 122 Short-term severe drought influences root volatile biosynthesis in eastern white pine (*Pinus strobus* L)
- 124 Evaluation of growth responses of six gymnosperm species under long-term excessive irrigation and traits determining species resistance to waterlogging
- 126 Drought hardening effect on improving transplant stress tolerance in *Pinus densiflora*
- 128 Long-term drought modifies carbon allocation and abscisic acid levels in five forest tree species
- 130 Influence of severe drought on mineral nutrient status in eastern white pine (*Pinus strobus* L)
- 132 Waterlogging Hardening Effect on Transplant Stress Tolerance in *Pinus densiflora*
- 134 Promotion of cold stress tolerance in transplanted *Pinus densiflora* seedlings after long-term moderate drought hardening
- 136 Energy deprivation affects nitrogen assimilation and fatty acid biosynthesis leading to leaf chlorosis under waterlogging stress in the endangered *Abies koreana*
- 138 Flash drought as possible contributor to seedling dieback in the endangered conifer *Abies koreana*

IV. 참고문헌

- 140 참고문헌



탄소순환, 식생, 조류 연구 분야

1. 장기생태연구 방향 및 국외 생태계 관측망 사례 연구

Long-term ecological monitoring in South Korea: progress and perspectives

Jeong Soo Park^{1*}, Seung Jin Joo², Jaseok Lee³, Dongmin Seo³,
Hyun Seok Kim⁴, Jihyeon Jeon⁴, Chung Weon Yun⁵, Jeong Eun
Lee⁵, Sei-Woong Choi⁶, Jae-Young Lee¹

¹National Institute of Ecology, ²Center for Atmospheric and Environmental Modeling,

³Konkuk University, ⁴DSeoul National University, ⁵Kongju National University,

⁶Mokpo National University

Journal of Ecology and Environment (2023)

【중요 키워드】

기후변화 (climate change)

생태관측소 (ecological observatory)

장기 모니터링 (long-term monitoring)

개체군 동태 (population dynamics)

탄소순환 (carbon cycle)

생물다양성 (Biodiversity)

1) 논문 목적

- 국가 장기생태연구 성과와 현황
- 향후 장기 생태 모니터링의 방향성과 전략 제시

2) 중요 연구 결과

- 한국장기생태연구(KLTER)는 2004년부터 진행되어 왔으며 유용한 과학적 성과를 냈지만, 데이터 통합과 정책적 반영에 한계 확인함
- 이러한 한계를 극복하기 위해 한국 생태계의 특성을 반영한 한국 생태 관측 네트워크 (KEON) 계획함
- 과거 장기생태연구를 통해 냉온대림 점봉산 신갈나무(*Quercus mongolica*) 숲이 탄소 흡수원 역할을 한다는 것을 확인함. 또한 지난 10년간 고도가 낮은 소나무림에서 대형나방의 개체 수는 줄었지만 종 수 증가 확인함

3) 중요 시사점

- 기후 변화와 같은 환경 문제에 대처하기 위해 전국적 규모의 생태 관측 네트워크 필요
- KEON의 표준화된 모니터링 방식은 여러 관측소의 데이터를 통합하여 전국적인 규모의 생태학적 해답을 찾는 데 기여할 것

- KEON을 통해 얻은 데이터는 기후변화에 대한 생태계 반응을 예측하고 정책 입안자에게 데이터 기반의 해결책을 제공하는 역할 수행
- 국제적인 관측소 네트워크(NEON, TERN 등)와의 협력을 통해 데이터 공유 및 비교를 확대하고, 더 나아가 전 세계적인 환경 위기 해결에 중요한 역할을 할 것으로 기대

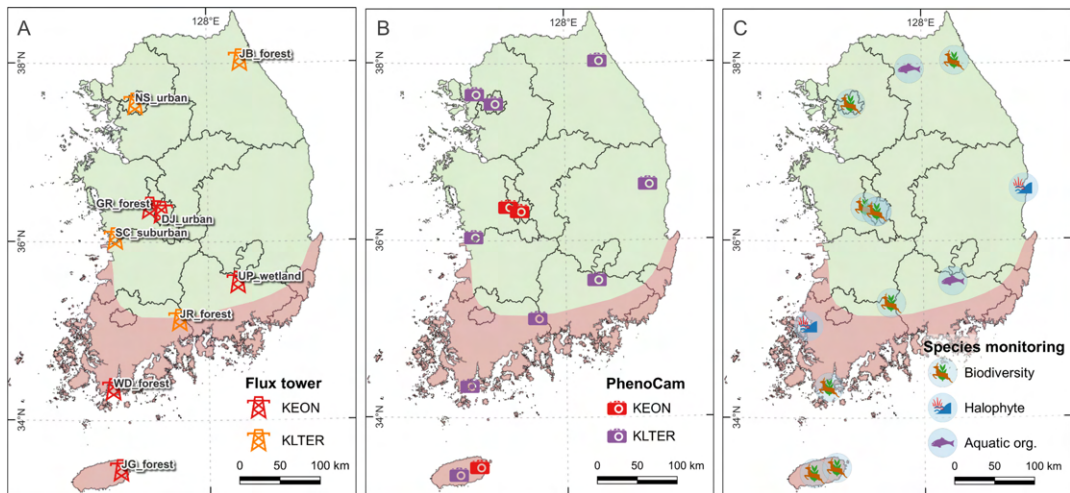


그림 1. The ecological observatory locations for (A) flux towers, (B) phenoCams, and (C) species monitoring. JB: Jeombong-san; NS: Nam-san; GR: Gyeryong-san; DJ: Daejeon-si; SC: Seochon-gun; UP: Upo wetland; JR: Jiri-san; WD: Wando; JG: Jeju gotjawal; KEON: Korean Ecological Observatory Network; KLTER: Korean Long-Term Ecological Research.

Lessons from constructing and operating the national ecological observatory network

Christopher McKay*

National Ecological Observatory Network

Journal of ecology and environment (2023)

【중요 키워드】

생태관측소 (ecological observatory)

국가생태관측네트워크 (NEON)

장기 생태 데이터 (Long-term ecological data)

표준화된 데이터 수집 (Standardized data collection)

연구 커뮤니티 참여 (Scientific community engagement)

1) 논문 목적

- NEON의 구축 및 운영 과정에서 얻은 교훈을 정리하여, 향후 대규모 분산 생태관측 네트워크 구축에 적용할 수 있는 사례 제공
- 현장 인프라 설계, 장비 설치 및 유지관리, 그리고 지역사회와 연구자 커뮤니티와의 협력에서 발생한 문제와 해결 과정을 공유
- 예산·인력·기술적 측면에서 장기 운영의 지속 가능성을 확보하기 위한 관리 전략 제안

2) 중요 연구 결과

- 초기 설계 단계에서 표준화된 장비 설치 방식을 적용했으나, 현장별 조건 차이로 인해 내구성 문제(예: 홍수 시 파손)가 발생하여 다양한 설치 방식으로 보완함
- 현장 운영에서 지역사회와의 신뢰 구축 및 투명한 데이터 공개가 장기적 지원과 연구 참여를 확대하는 핵심 요인임
- 장기간에 걸친 프로그램의 성공적인 운영을 위해서는 디자인과 설치 방법을 주기적으로 재평가하고, 다른 연구 프로그램으로부터 얻은 교훈을 반영하는 것이 중요함

3) 중요 시사점

- 장기적인 연구 인프라를 유지하기 위해서는 지역 사회와의 강력한 관계 구축이 필수적이며, 이를 위해 공개적인 참여와 투명성이 중요
- 예측 불가능한 환경 변화에 대응하기 위해 관측소 설계 및 운영에 유연성과 탄력성 확보 필요
- 데이터 품질과 사용성을 높이기 위해 데이터 제한 사항을 투명하게 공개하고, 데이터 수집 프로토콜 개선에 커뮤니티의 의견을 반영하는 것이 중요
- 장기 예산은 인플레이션과 인프라 노후화 비용을 반영해야 하며, 이를 무시하면 데이터 품질과 수집 연속성이 위협받을 수 있음

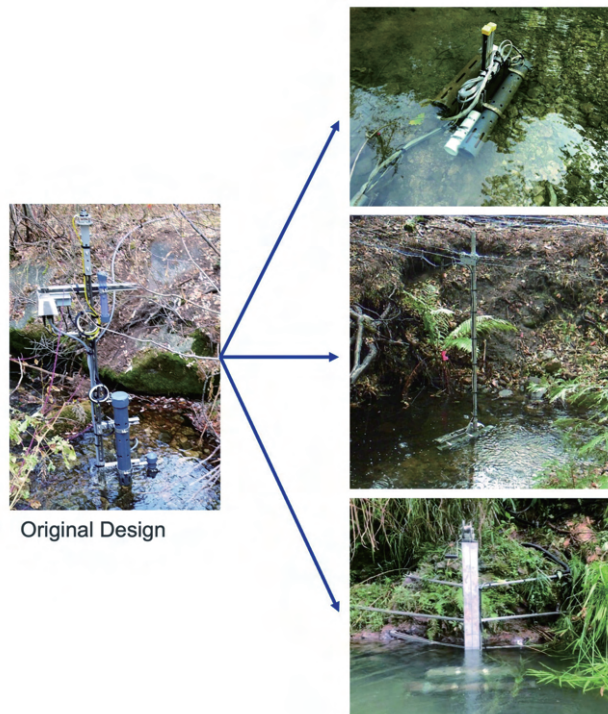


그림 2. National Ecological Observatory Network (NEON) aquatic sites have customized mounting infrastructure to deal with individual site conditions and reduce the damage during high-flow events. The original design is shown on the left and three of these designs are shown on the right, including (from top to bottom) lowering the instrumentation supports so that debris can flow over it, mounting instrumentation on overhead cables to allow it to move as the stream flow increases, and attaching to nearby boulders for structural rigidity (figure is a product of the NEON program and can be used by any member of the NEON team. It is open access and may be used).

Long-term and multidisciplinary research networks on biodiversity and terrestrial ecosystems: findings and insights from Takayama super-site, central Japan

Hiroyuki Muraoka^{1,2*}, Taku M. Saitoh¹, Shohei Murayama³

¹Gifu University, ²National Institute for Environmental Studies,

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

journal of ecology and environment (2023)

[중요 키워드]

생물다양성 관측 네트워크 (biodiversity observation network)

탄소순환 (carbon cycle)

장기 생태 연구 네트워크 (long-term ecological research network)

생물계절 (phenology)

토양호흡 (Soil respiration)

1) 논문 목적

- 일본 다카야마(Takayama) 슈퍼사이트에서 수행된 장기적, 다학제적인 연구 사례를 통해 생물다양성과 육상 생태계 기능의 변화를 종합적 이해
- LTER, Fluxnet, Biodiversity Observation Network 등 다양한 관측 네트워크를 통합하여 기후변화와 토지이용 변화에 따른 생태계 구조와 기능 변화를 해석
- 현장 관측, 생태계 모델링, 위성 원격탐사를 연계하여 공간적·시간적 규모 차이를 극복하고 아시아-오세아니아 지역의 관측 격차를 메우는 방안을 제시

2) 중요 연구 결과

- Takayama 슈퍼사이트에서는 30년 이상 장기 관측을 통해 기온 상승과 강수 패턴 변화가 잎의 광합성 능력, 계절적 생리 현상, 순생태계생산(NEP)에 큰 영향을 미친다는 사실을 규명함
- 토양 호흡 및 뿌리 호흡의 계절적 변동성과 기온·수분 의존성을 정량화함으로써 기후 변화가 산림 탄소순환에 미치는 복합적 영향을 밝힘
- 위성 원격탐사와 현장 생리학적 데이터(광합성, 엽록소 함량, NDVI/EVI 등)를 결합하여 대기-생태계 상호작용 및 광합성 생산성의 대규모 추정이 가능함을 검증함

3) 중요 시사점

- 기후 및 토지 이용 변화가 생태계 구조와 기능에 미치는 복잡한 영향을 이해하기 위해 장기적이고 다학제적인 관측 네트워크가 필수적임을 강조

- 다른 방법론을 사용하는 기존의 관측 네트워크(LTER, FluxNet, BON 등)들을 통합하여 기후 변화, 생물다양성 손실과 같은 복합적인 환경 문제에 대한 포괄적인 이해가 가능
- 통합 관측 네트워크를 통해 얻은 데이터와 지식은 학계뿐만 아니라 정책 입안자에게도 제공되어 지속 가능한 개발 목표 (SDGs) 달성, 탄소 중립, 기후 변화 대응 등 사회적 목표를 달성하는 데 활용 가능

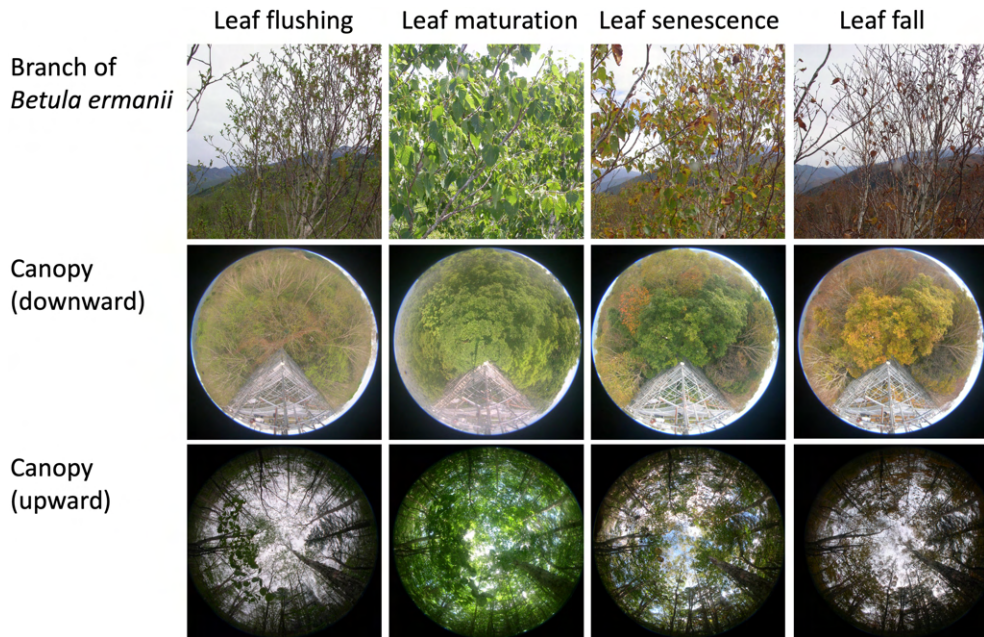


그림3. Sample images from the automated digital camera of Phenological Eyes Network at the Takayama site. The cameras are located on a canopy-access tower with a height of 18 m. The images show seasonal change of branches of *Betula ermanii* (top), forest canopy taken from the top of the tower (middle), and forest canopy taken from the understory (bottom).

The Great Western Woodlands TERN SuperSite: ecosystem monitoring infrastructure and key science learnings

Suzanne M Prober^{1*}, Georg Wiehl¹, Carl R Gosper^{1,2}, Leslie Schultz³, Helen Langley³, Craig Macfarlane¹

¹Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Environment,

²Conservation and Attractions, ³Ngadju Conservation Aboriginal Corporation

journal of ecology and environment (2023)

[중요 키워드]

생태관측망 (ecosystem observatory)

육상생태계연구네트워크 (Terrestrial Ecosystem Research Network)

생물다양성 (biodiversity)

기후변화 (climate change)

장기 모니터링 (long-term monitoring)

1. 논문 목적

- 호주 남서부 Great Western Woodlands 지역에 구축된 TERN SuperSite의 모니터링 인프라와 연구 성과를 종합적으로 소개
- 플렉스 타워와 세 가지 경사 플롯 네트워크(건조도, 사구 식생, 화재 연령)를 통해 지역 생태계 변화와 관리 전략 수립에 기여
- 전 지구적 생태계 관측망의 일환으로 지역적 차원에서 기후변화 적응과 생물다양성 보전을 지원하는 방법론적·실질적 가치 강조

2. 중요 연구 결과

- 사구(SWATT) 경사 연구에서 식물 종 교체율이 매우 높게 나타나, 단순 보호구역 지정만으로는 생물다양성 보전이 어렵다는 점을 확인함
- Gimlet fire-age plots 연구는 Eucalyptus salubris 노령림의 보전 가치와 함께, 화재 이후 생태계 회복이 수 세기에 걸쳐 진행된다는 사실을 규명함
- 화재 후 회복 과정 규명: 400년에 걸친 화재 연대 경사 네트워크 연구를 통해 화재 후 식물, 조류, 무척추동물의 회복 과정을 분석한 결과, 종 다양성과 보전 가치가 높은 조류는 주로 오래된 숲(old-growth woodlands)에서 발견됨

3. 중요 시사점

- 노령림은 화재 후 수 세기 동안 복원이 불가능하므로, 현재의 노령림 보호가 장기적인 생물다양성 유지와 탄소 저장에 핵심적임이 강조

- 생태계 관측소는 국가 및 전 세계적 추세뿐만 아니라, 지역 규모의 환경 문제 해결에도 직접적으로 기여
- 보전 전략의 전환: 높은 종 대체율을 보이는 지역에서는 보호구역 외 관리와 교란 최소화 중요성 강조
- 화재 관리의 중요성: 오래된 숲은 높은 보전 가치를 지니므로, 화재로 인한 손실을 막기 위한 관리 노력이 필요. 특히 중간 연령대 숲은 가연성이 높아 화재 관리가 시급한 '화재 함정(fire trap)'으로 작용

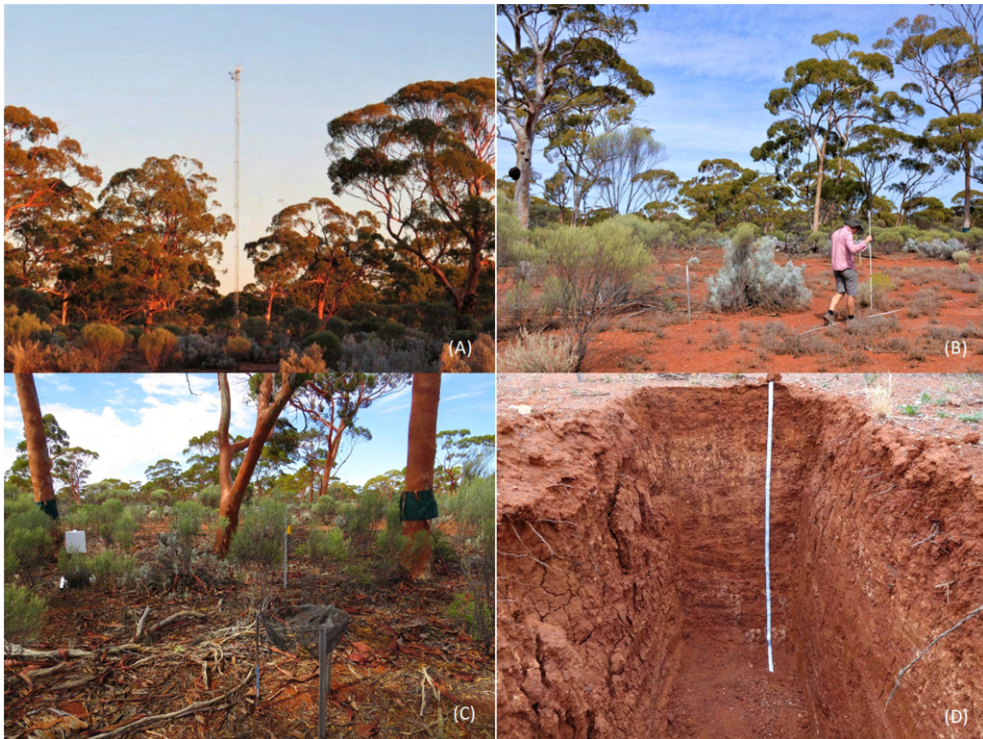


그림4. Long-term monitoring infrastructure at the flux tower site on Credo Proposed Conservation Reserve. (A) 36 m tall flux tower, (B) regularly-monitored core one hectare *Eucalyptus salmonophloia* AusPlot adjacent to flux tower, (C) litter traps and dendrometer bands in the core one hectare *E. salmonophloia* AusPlot, (D) soil pit (to 1.4 m deep) at flux tower site.

2. 탄소순환 연구

한반도 중부지역 조림지 소나무와 곰솔의 장기적 낙엽 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 동태변화

이일환, 조수언¹, 이영상, 원호연*

국립생태원, ¹수원시 상수도사업소

Korean Journal of Environmental Biology (2021)

[중요 키워드]

C/N 비율 (C/N ratio)

C/P 비율 붕괴 상수 (C/P ratio decay constant)

장기 생태 연구 (long term ecological research)

잔존율 (*remaining weight*)

소나무 (*Pinus densiflora*)

곰솔 (*Pinus thunbergii*)

1) 논문 목적

- 소나무(*Pinus densiflora*)와 곰솔(*Pinus thunbergii*) 조림지에서 낙엽의 장기적 분해 속도를 비교·분석하여 분해 특성 규명
- 낙엽 분해 과정이 토양 영양분 축적과 산림 생태계 기능 유지에 미치는 영향 평가
- 기후와 환경요인이 낙엽 분해율에 미치는 장기적 영향을 파악하여 산림 관리 기초자료 제공

2) 중요 연구 결과

- 곰솔 낙엽은 소나무 낙엽보다 분해속도가 빠르며, 60개월 후 곰솔의 잔존율은 24.7%로 소나무의 42.1%보다 낮게 나타남
- 분해 과정에서 두 수종의 C/N과 C/P 비는 모두 크게 감소하여 토양 내 질소와 인의 공급원이 되는 것으로 확인됨
- 질소와 인은 분해 과정에서 농도가 증가하고 잔존율이 높아지며, 반면 칼륨과 마그네슘은 지속적으로 무기화되는 양상을 보임

3) 중요 시사점

- 조림지 내 수종 선택은 낙엽 분해율 차이를 통해 토양 비옥도와 탄소 축적에 직접적인 영향을 줌
- 기후변화에 따른 온도와 강수 패턴 변화는 장기적인 낙엽 분해와 영양염류 순환은 생태계 유지 관리에 필수적
- 장기적인 낙엽 분해 연구는 기후 변화가 군락에 미치는 영향 파악에 유용한 자료를 제공하며, 산림 생태계 탄소 순환 이해에 중요 역할

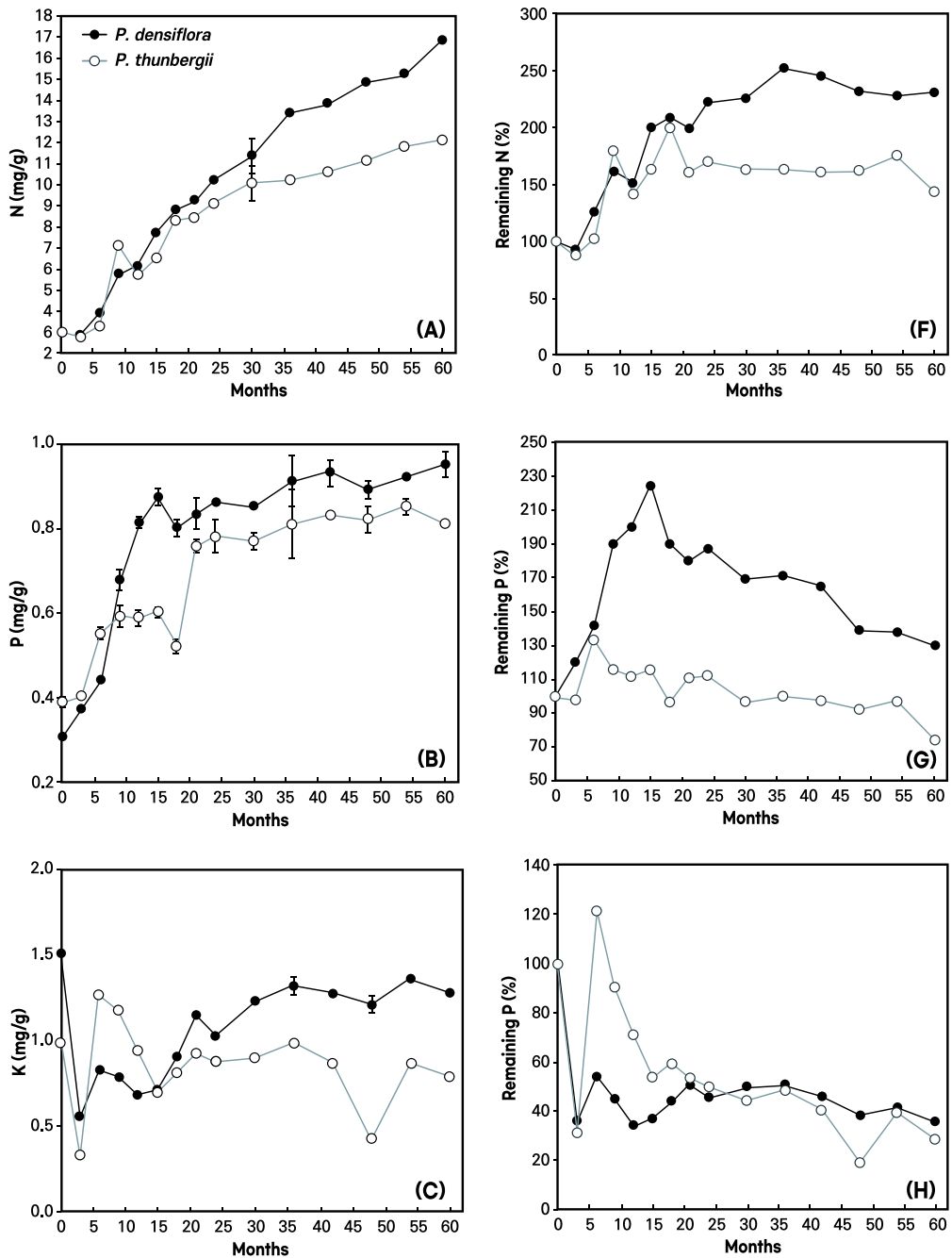


그림5. Changes of N, P, K, Ca, and Mg concentration (A, B, C, D, and E) and the % of the remaining N, P, K, Ca, and Mg (F, G, H, I, and J) in the decomposing leaf litter of *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii*.

다중채널 자동챔버 시스템에 의한 삼림토양의 이산화탄소 유출량의 연속측정

주승진¹, 임명희², 주재원², 원호연³, 진선덕⁴

^{1,2}대기환경모델링센터, ^{3,4}국립생태원

응용생태공학회 (2021)

[중요 키워드]

CO₂ 유출 (CO₂ efflux)

삼림 토양 (Forest soil)

다중채널 자동챔버시스템 (Multi-channel automated chamber systems, MCACs)

온도 민감도 (Q₁₀)

신갈나무 (*Quercus mongolica*)

토양호흡 (Soil respiration)

1) 논문 목적

- 야외 현장에서 토양 CO₂ 유출량을 장기간 연속적으로 자동 측정할 수 있는 다중채널 자동챔버시스템(MCACs)의 개발 및 성능 향상
- 토양온도 및 토양수분과 CO₂ 유출량의 관계 규명 및 환경요인이 토양호흡에 미치는 영향 분석
- 연속 측정 데이터를 기반으로 온도 민감도(Q₁₀)를 산출하고, 향후 기후변화 대응 탄소 수지 평가에 기초자료 제공

2) 중요 연구 결과

- 토양 CO₂ 유출 속도는 5cm 깊이의 토양 온도와 매우 강한 상관관계($r^2=0.92$)를 보였지만, 토양 수분 함량과는 약한 상관관계($r^2=0.27$)를 보임
- 토양 CO₂ 유출 속도의 일변화 및 계절적 변화는 온도의 변화 경향을 현저하게 따르는 것으로 나타남
- MCACs로 측정된 남산 신갈나무림의 연평균 토양 CO₂ 유출량은 약 $11.1 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 임

3) 중요 시사점

- 다중채널 자동챔버시스템은 삼림 생태계의 탄소 유출을 고해상도로 연속 관측할 수 있는 효과적인 수단이며, 생태계 탄소수지 모니터링에 활용 가능
- 토양온도는 토양호흡 조절의 주요 인자이며, Q₁₀을 통해 기후변화에 따른 탄소 배출량 예측의 기초 자료 제공
- 국가 단위의 장기 모니터링 체계에서 자동화 관측 장비의 도입은 기후변화 대응 생태계 연구의 정량성과 신뢰성 제고

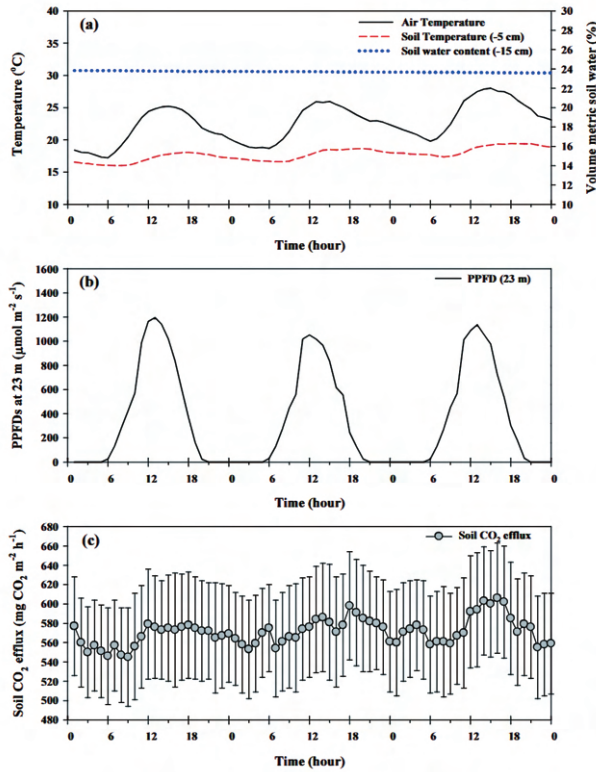


그림6. Diurnal variations in (a) air temperatures at the 1.5 m height ($^{\circ}\text{C}$, solid line), soil temperatures at the 5 cm depth ($^{\circ}\text{C}$, red dashed line) and volumetric soil water contents at the 15 cm depth (% , blue dotted line), (b) PPFDs (photosynthetically photon flux densities) at the 23 m height ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, solid line), and (c) soil CO₂ effluxes ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, gray circle and solid line) measured with the multi-channel automated chamber systems (MCACs) at the Nam-san experimental site in a *Quercus mongolica* forest during the sunny days from 7 to 9 June in 2010. Vertical bars indicate the standard error of eight soil chambers ($n = 8$).

점봉산 신갈나무 낙엽의 분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석

원호연, 이영상, 이재석¹, 이일환*

국립생태원, ¹건국대학교

환경생물 (2022)

[중요 키워드]

장기 생태 연구 (Long-term ecological research)

잔존율 (Remaining weight)

기후변화 (Climate change)

토양수분 (Soil moisture)

상관관계 분석 (Correlation analysis)

신갈나무 (*Quercus mongolica*)

1) 논문 목적

- 점봉산 신갈나무(*Quercus mongolica*) 낙엽의 분해율을 측정하고 미기상 요인과의 상관관계를 분석
- 낙엽 분해율과 토양 온도, 토양 수분 등 주요 미기상 인자 간의 상호작용을 규명
- 산림생태계에서 영양분 순환과 탄소 동태 이해에 필요한 기초자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 신갈나무 낙엽의 분해율은 토양 온도와 유의한 양의 상관관계를 보임
- 토양 수분은 낙엽 분해율에 중요한 영향을 주었으며 특히 고수분 조건에서 분해가 촉진됨
- 미기상 요인의 변동은 분해율에 직접적으로 작용하여 산림 내 낙엽 분해 속도를 조절함

3) 중요 시사점

- 낙엽 분해는 미기상 요인에 민감하게 반응하므로 기후변화에 따른 생태계의 물질 순환 및 기능적 변화를 예측하는데 중요한 기초 자료를 제공
- 신갈나무 낙엽 분해율은 토양 온도와 수분 관리의 중요성을 보여주며 산림 보전 전략 수립에 기여
- 본 연구는 산림생태계에서 영양분 순환과 물질 흐름을 이해하는 데 필수적인 자료를 제공

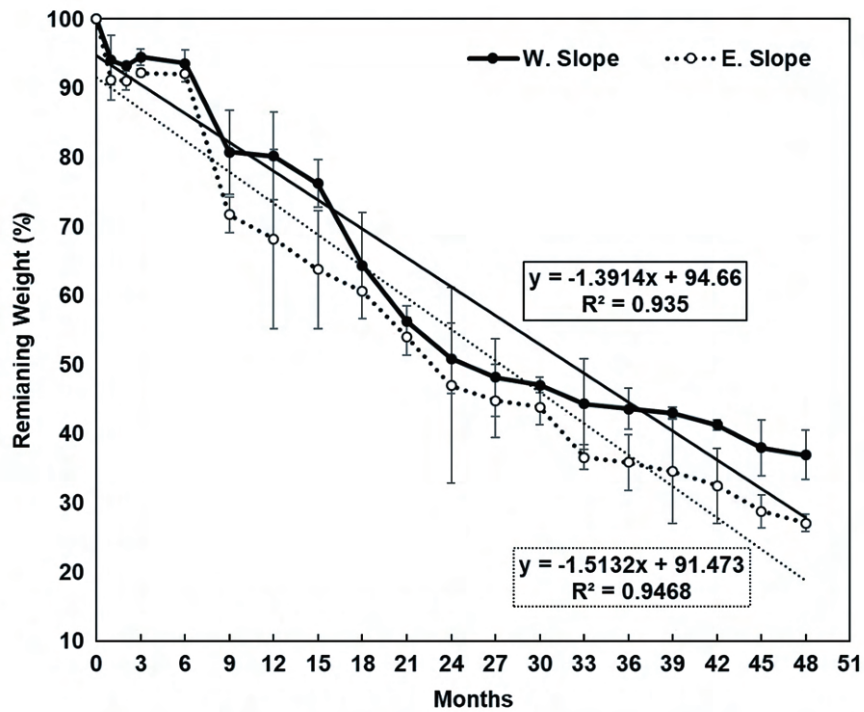


그림7. Remaining weight (%) of decomposing leaf litter of *Quercus mongolica* in the study area. Bars indicate standard deviation.

우리나라 소나무림의 토양호흡 특성: 점봉산, 남산, 지리산 사례 연구 (2009~2010)

이재호, 유영주¹, 이상훈, 신만석, 이재석^{2*}

국립생태원, ¹한국농업기술진흥원, ²건국대학교

생태와 환경 (2023)

[중요 키워드]

토양호흡 (soil respiration)

기후변화 (climate change)

탄소순환 (carbon cycle)

소나무 (*Pinus densiflora*)

토양온도 (soil temperature)

토양수분함량 (soil moisture content)

1) 논문 목적

- 우리나라 대표적인 소나무림(*Pinus densiflora* forest)에서 토양호흡 특성을 비교·분석
- 점봉산, 남산, 지리산의 소나무림을 대상으로 토양호흡의 계절적 변동성과 환경 요인을 규명
- 국내 소나무림의 탄소 순환 이해와 기후변화 대응 전략 마련에 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 소나무림의 토양호흡은 계절적 변동이 뚜렷하게 나타났으며, 온도와 밀접한 상관성을 보임
- 지역별로 토양호흡의 강도와 패턴에 차이가 있었으며, 이는 기후와 토양 특성에 기인함
- 세 지역 모두에서 토양호흡은 탄소 순환의 중요한 요소로 작용함

3) 중요 시사점

- 토양호흡은 산림 탄소 순환에서 중요한 역할을 하며, 미래의 기후 조건에서 생태계 탄소순환의 변화를 예측하는 모델에 반영 필수적
- 지역별 차이는 산림 관리와 보존 정책 수립 시 맞춤형 접근이 필요
- 본 연구는 기후변화에 따른 국내 산림 생태계 탄소 동태를 이해하는데 중요한 기초 자료를 제공

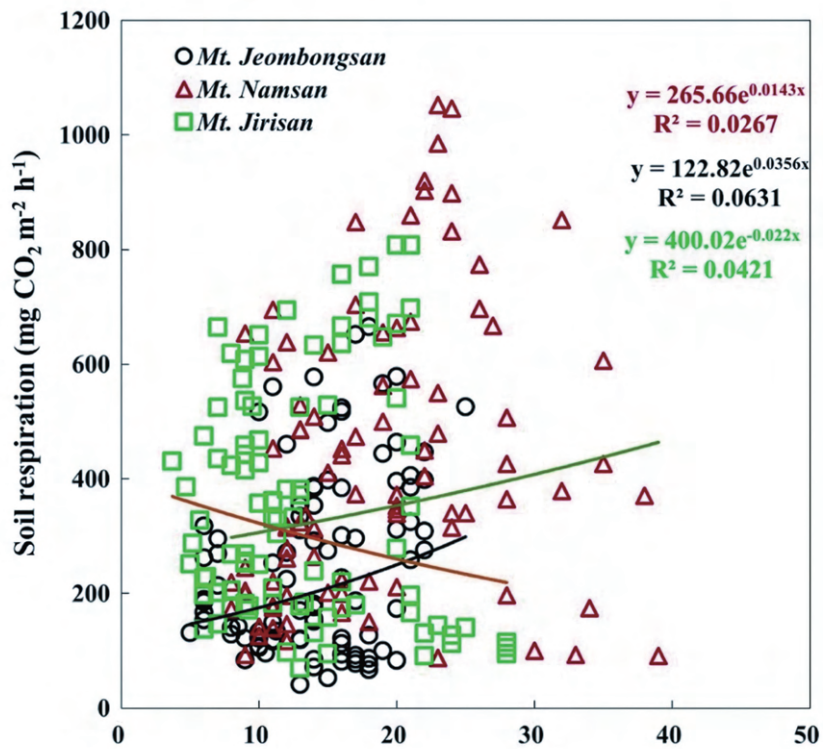


그림8. Monthly soil respiration and soil moisture content relationship (2009~2010) with regression curves.

수목의 미세수준 생장 추적을 위한 자동 수목생장측정기의 효능성 평가

이재연, 김미라, 박정수, 이효혜미*

국립생태원

응용생태공학회 (2024)

[중요 키워드]

자동 수목생장측정기 (Automatic dendrometer)

기후변화 연구 (Climate change research)

연속 자료 수집 (Continuous data collection)

장기적인 연구 (Long-term research)

수목생장 모니터링 (Tree growth monitoring)

1. 논문 목적

- 수동 수목생장측정기의 한계를 극복하기 위해 자동 수목생장측정기가 생태계 관리 및 기후 변화 연구에 얼마나 유용한지 검증
- 기후 조건이 다른 점봉산, 남산, 지리산에 설치된 자동 측정기를 통해 신갈나무의 미세한 직경 생장량 변화를 연속적으로 추적
- 자동 수목생장측정기로 수집된 데이터를 제시하고, 기존의 전통적인 방법과 비교하여 새로운 방법론을 제공

2. 중요 연구 결과

- 조사 기간 동안 평균 온도는 남산이 20.7℃로 가장 높고, 지리산이 15.0℃로 가장 낮지만, 수목의 직경 생장량은 지리산이 0.37cm로 가장 크게 나타남
- 자동 수목생장측정기는 단기간의 조사에서도 시간 경과에 따른 각 지역 수목 생장량 변화를 유용하게 추적할 수 있음
- 수목의 일간 생장 변화를 측정할 수 있다는 점에서 자동 측정기는 수동 측정 방법의 한계를 극복함

3. 중요 시사점

- 자동 수목생장측정기 연구 방법은 데이터 수집 격차, 낮은 정밀도, 높은 노동력 요구와 같은 기존 수동 측정 방법의 단점을 극복
- 이 방법은 정확하고 지속적인 데이터 수집을 가능하게 하여 기후변화의 영향과 탄소 저장량을 평가하는 데 필수적
- 본 연구는 한국 산림 생태계의 정확한 탄소수지 산정을 위한 기반 자료를 제공하며, 향후 산림 보전 및 관리 정책 수립에 활용 가능

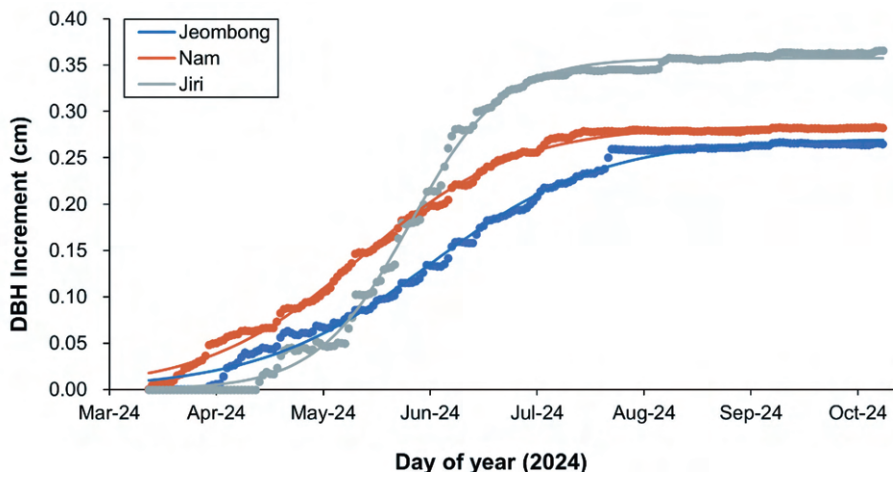


그림9. Changes of increments of the diameters at the breast height (DBH) of *Quercus mongolica* in the Mt. Jeombongsan, Mt. Namsan, and Mt. Jirisan, South Korea. The information on the logistic function of the regression line is shown in Table 4.

점봉산 국가장기생태연구지 시냇물 용존유기물의 생지화학적 특성

이규연¹, 차지연¹, 이은주¹, 이승철¹, 손승우², 김성환², 김현준¹, 최준원¹, 오능환^{1*}

¹Seoul National University, ²Kyungpook National University

한국물환경학회지 (2025)

[중요 키워드]

생지화학 (Biogeochemistry)

용존유기탄소 (Dissolved organic carbon, DOC)

용존유기물 (Dissolved organic matter, DOM)

하천수 (Forest stream)

동위원소 (Isotopes)

국가 장기생태연구 (Korean Long-term Ecological Research, KLTER)

1) 논문 목적

- 점봉산 장기생태연구지 내 시냇물에서, 비가 오지 않는 날(기저유량에 근접) 용존유기물 (DOM)의 생지화학적 특성을 규명
- 계절적 변화에 따른 DOM의 양적·질적 특성을 분석하여 산림생태계의 물질순환과 탄소 동태를 이해
- DOM 특성이 수생태계와 산림 생태계의 상호작용에 미치는 영향을 파악

2) 중요 연구 결과

- 점봉산 시냇물의 DOM은 계절에 따라 농도와 조성이 뚜렷하게 변하며, 강수 및 생물학적 활동과 밀접하게 연관되어 있음
- 형광 분석 결과, 시냇물 DOM은 주로 육상 기원 물질이 지배적이었으나 특정 시기에는 미생물 기원의 DOM 비율이 증가함
- DOM의 특성 변화는 산림 내 탄소 순환 및 수질 변동에 중요한 역할을 하며, 장기 모니터링을 통해 그 패턴이 명확히 드러남. 특히 강수량과 강수 형태(즉, 강설, 강우)에 따라 달라지는 유역내 물의 흐름이 하천수 DOM 성분을 결정하는 가장 중요한 요인으로 추정됨

3) 중요 시사점

- DOM의 계절적·생지화학적 특성에 대한 이해는 산림-수계 간 물질 순환 연구와 기후 변화 대응 전략 수립에 기여
- 시냇물 DOM의 형광 특성은 산림생태계 건강성 및 기능을 평가하는 지표로 활용

- 본 연구는 장기생태연구(LTER)의 중요성을 강조하며, 지속적 모니터링은 기후변화에 따른 생태계 반응 예측에 필수적

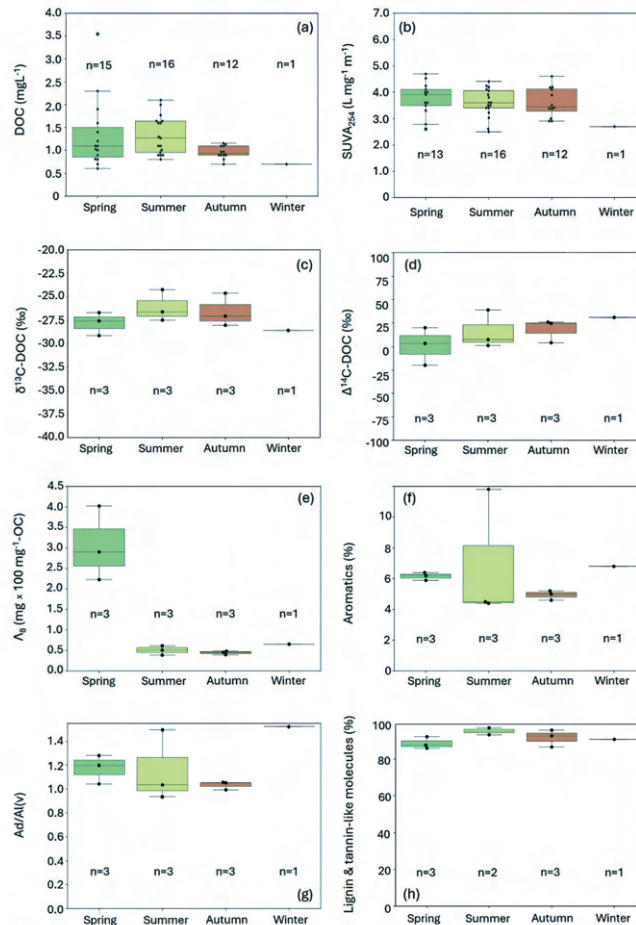


그림10. Concentrations and compositions of the forest stream DOM at the V-notch weir of Mt. Jeombong, depending on seasons. (a) [DOC], (b) SUVA₂₅₄, (c) δ¹³C-DOC, (d) Δ¹⁴C-DOC, (e) normalized lignin phenols (Λ₈), (f) proportion of aromatic functional groups in DOM as identified by 1H NMR analysis, (g) acid-to-aldehyde ratio of vanillyl phenols and (h) proportions of lignin- and tannin-like compounds estimated by FT-ICR MS.

Effect of slope gradient and litter on soil moisture content in temperate deciduous broadleaf forest

Minyoung Lee¹, Dongmin Seo¹, Jeong Soo Park², Jaeseok Lee¹

¹Konkuk University, ²National Institute of Ecology

Forests (2025)

[중요 키워드]

토양 수분 함량 (Soil moisture content, SMC)

온대 낙엽 활엽수림 (Temperate deciduous broadleaf forest)

낙엽층 (Litter)

경사도 (Slope gradient)

강우 차단 (Rainfall interception)

1) 논문 목적

- 온대 낙엽 활엽수림에서 경사도와 낙엽층이 토양 수분 함량 변동에 미치는 영향을 현장 측정을 통한 규명
- 산림 생태계에서 기후변화에 따른 강우 패턴 변화가 토양 수분과 생태계 기능에 미치는 잠재적 영향 평가
- 토양 수분 함량 예측의 정확도를 향상시키기 위한 기초 데이터를 제공

2) 중요 연구 결과

- 토양 수분 함량은 경사도와 낙엽층에 의해 영향을 받으며, 경사가 완만한 능선에서 경사가 급한 남서 경사면보다 토양 수분 함량(SMC)이 유의미하게 높음
- 낙엽층은 강우 흡수를 일시적으로 차단하며, 낙엽층이 두껍게 쌓인 완경사 지역(능선)에서는 시간이 지남에 따라 SMC의 강우 반응도가 증가하는데, 이는 분해로 인해 낙엽층의 강우 차단 효과가 점차 감소함을 의미함
- 잎이 무성한 계절(5~10월)에는 SMC와 강우량의 상관계수가 높았으나 낙엽기에는 낮아짐

3) 중요 시사점

- 토양수분 변동은 단순히 강우량만이 아니라 지형적 요인(경사도)과 생물적 요인(낙엽층)에 의해 크게 조절되어 관심이 필요
- 산림수문학 및 생태계 모델링에서 경사도와 낙엽층 분포를 반영해야 예측 정확성을 높이는 데에 기여
- 기후변화로 강우 패턴이 변할 경우, 경사지 산림의 수분 유지 및 생태계 기능이 더욱 취약해질 수 있어 관리 전략이 필요

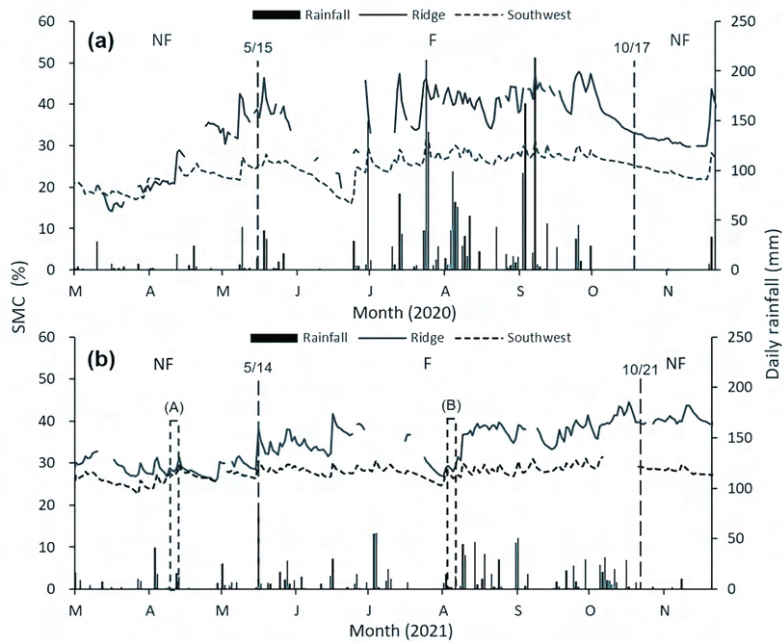


그림11. Soil moisture content (SMC, %) and daily rainfall (mm) measured in the unfrozen period at the ridge and the southwestern slope (Southwest). (a) shows SMC and rainfall during 2020 and (b) shows SMC and rainfall during 2021. Abbreviation F indicates the foliage season, and NF indicates the non-foliage season. (A) and (B) are selected rainfall events for analyzing the increase in SMC during rainfall events, which more than 10 mm of rain fell. Event (A) represents the rainfall event in the non-foliage season with 27.0 mm of rain, while event (B) occurred in the foliage season with 13.2mm of rain.

3. 식생동태 변화 연구

Rare nationwide synchronized massive flowering and decline event of *Sasa borealis* (Hack.) Makino in South Korea

Soyeon Cho, Beomjun Lee, Yeonsook Choung*

Kangwon National University

Journal of Plant Biology (2017)

[중요 키워드]

생물다양성 (Biodiversity)
조릿대 (Dwarf bamboo, *Sasa borealis*)
단과식물 (Monocarpic)
번식 (Reproduction)
복원 (Restoration)
순생식 (Semelparous)

1. 논문 목적

- 전국적으로 관찰된 조릿대(*Sasa borealis*)의 개화 현상이 실제로 동시다발적이고 대규모의 개화 주기인지 확인
- 조릿대의 개화 현상을 유발하는 주요 원인을 분석하고, 개화 후 고사 패턴을 파악
- 전국적으로 동시다발적인 조릿대 개화와 고사 현상이 조릿대가 우점하는 산림의 식생 동태에 어떤 영향을 미치는지 이해

2. 중요 연구 결과

- 전국적인 조릿대 개화는 2013년에 시작되어 2015년에 정점을 찍은 단일 개화 주기였으며, 이는 전국적, 동시적, 대규모 개화임을 보여줌
- 조릿대 개화는 2014년과 2015년에 발생한 장기간의 가뭄으로 인한 환경 스트레스가 주요 원인으로 작용했을 가능성이 높음
- 개화한 조릿대 개체들은 개화 후 1년 이내에 거의 대부분이 고사하는 경향을 보임

3. 중요 시사점

- 산림 내에서 넓은 패치를 구성하면서 생물다양성을 제한하던 조릿대의 전국 동시 개화 및 고사로 인하여 산림 생태계의 식생 변화 및 천이에 막대한 영향을 미칠 수 있음
- 가뭄과 같은 기상학적 요인이 전국적으로 동시적인 개화를 유도하며, 이는 조릿대의 생물학적 특성과 함께 복합적으로 작용

- 조릿대의 대규모 개화 및 고사는 산림 생태계 내 종 다양성과 재생 연구를 위한 좋은 기회를 제공하며, 앞으로 생태계 관리 및 복원을 위한 연구에 활용 가능

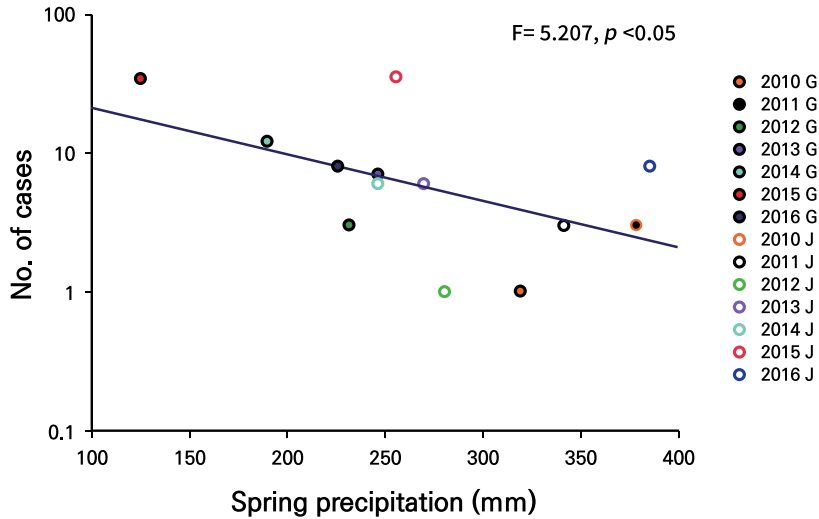


그림12. Relationship between amount of precipitation received between February and May each year and number of annual flowering cases since 2010. Values on Y-axis were log-transformed. G and J indicate area of Gangwon and Mt. Jiri, respectively.

Distribution, abundance, and effect on plant species diversity of *Sasa borealis* in Korean forests

Soyeon Cho¹, Kyungeun Lee², Yeonsook Choung^{1*}

¹Kangwon National University, ²National Institute of Ecology

Journal of Ecology and Environment (2018)

[중요 키워드]

조릿대 (Dwarf bamboo, *Sasa borealis*)

신갈나무림 (*Quercus mongolica* forest)

자생유해식물 (Native weedy pest)

전국적 동시 개화 (Synchronized massive flowering)

분포 (Distribution)

풍부도 (Abundance)

1. 논문 목적

- 한국 산림에서 조릿대(*Sasa borealis*)의 분포와 풍부도를 규명하고 서식지 특성을 분석
- 조릿대가 차지하는 면적이 다른 식물 종다양성에 미치는 영향을 계량적으로 검증
- 조릿대의 생태적 교란 가능성을 평가하여 산림 관리와 보전 전략 수립에 기초 자료를 제공

2. 중요 연구 결과

- 조릿대는 주로 해발 800~1,200m, 경사가 완만한 골짜기 근처 북사면에서 가장 흔하게 발견됨
- 초본층에서 조릿대의 개체수(풍부도)가 증가할수록 종 다양성, 총 종수 및 균등도가 유의미하게 감소하는 경향을 보임
- 447개의 조사 구역 중 조릿대가 발견된 76개 구역에서 절반 이상(58%)이 조릿대에 덮여 있었으며, 이는 초본층에서 드물게 나타나는 높은 확산 값을 보여줌

3. 중요 시사점

- 조릿대는 자생종이지만 산림 하층에서 과도하게 확산될 경우 침입외래종과 유사한 수준으로 종다양성을 저해
- 최근 전국적 동시 개화와 집단 쇠퇴 현상은 생태계 복원을 위한 관리적 개입의 기회가 될 수 있음
- 산림 보전 정책에서 조릿대를 생태계 교란 잠재종으로 고려하여 적극적인 제어와 관리 전략 마련이 필요

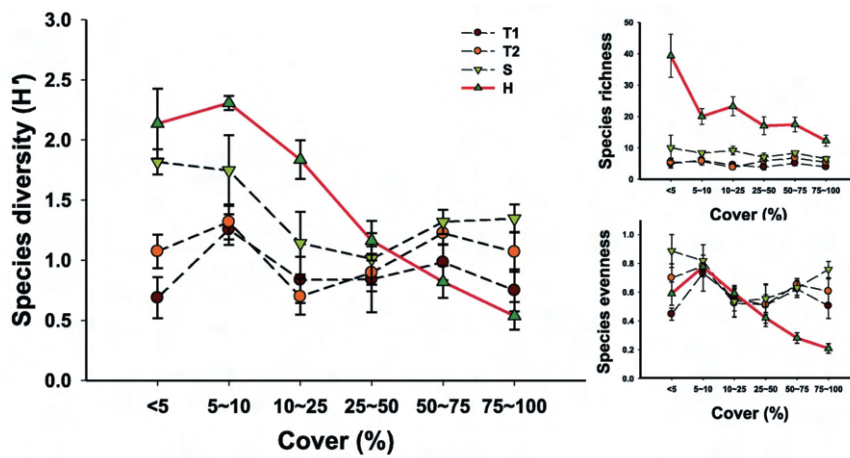


그림13. Plant species diversity (H'), richness, and evenness as a function of *Sasa borealis* abundance (% cover) in 4 strata. Data points are mean values. Strata: T1, tree; T2, subtree; S, shrub; H, herb.

Distribution and synchronized massive flowering of *Sasa borealis* in the forests of Korean National Parks

Soyeon Cho, Youngjin Kim, Yeonsook Choung*

Kangwon National University

Journal of Ecology and Environment (2018)

[중요 키워드]

집단고사 (Dieback)

산림 동태 (Forest dynamics)

대량 개화 (Mass flowering)

이생번식 (Semelparous reproduction)

동시 개화 (Simultaneous flowering)

조릿대 (*Sasa borealis*)

1) 논문 목적

- 사회관계망 서비스와 특정 지역의 현장 조사에 기반했던 이전 연구와 달리, 국립공원 5개소에 대한 현장 조사를 통해 조릿대(*Sasa borealis*)의 전국적 대규모 동시 개화 현상 기록 및 원인 규명
- 조릿대의 공간적 분포 현황과 생태적 특성을 파악
- 조릿대의 대규모 개화와 고사가 산림 생태계에 미치는 잠재적 영향을 평가

2) 중요 연구 결과

- 조사된 5개 국립공원에서 발견된 총 436개의 조릿대 군락 중 절반(219개)이 대규모 개화하며, 이 중 76%가 2015년에 개화한 것으로 나타나 전국적인 동시 개화 현상이 확인됨
- 개화한 조릿대 개체들은 개화하지 않은 개체들보다 줄기가 유의미하게 더 크고 두꺼우며, 개화 후 고사가 진행되면서 하층 식생 구조 변화와 종다양성 회복 가능성이 높아짐
- 2015년 정점을 이룬 동시다발적인 대규모 개화는 봄 가뭄과 같은 환경 스트레스에 의해 유발된 것으로 추정됨

3) 중요 시사점

- 조릿대의 전국적 대규모 개화 및 고사는 한국 산림 생태계의 장기적 변화를 이해하는 중요한 단서

- 장기적으로 숲의 구조와 종 조성이 달라질 수 있어, 생물다양성 보전이 중요한 지역의 효과적인 보전 전략 수립을 위한 주기적인 모니터링 및 지속적인 연구와 관리 필요
- 산림 관리 정책에서는 조릿대의 개화·쇠퇴 주기를 고려하여 생태계 복원 전략을 수립

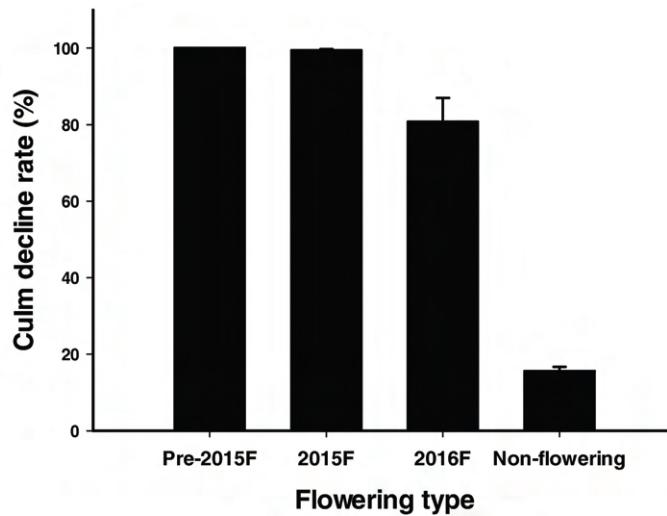


그림14. Culm decline rate after flowering in five national parks. Values are means \pm standard errors.

구례 왕벚나무 가로수의 조기낙엽 진단 및 친환경적 관리 방법

한아름, 진선덕, 정길상, 원호연, 이영상, 손세환, 최성훈, 강혜진, 이일환, 한아름*

국립생태원

Korean Journal of Environmental Biology (2019)

[중요 키워드]

한국산 벚나무 (Korean flowering cherry)

조기 낙엽 (early defoliation)

구멍병 (shot-hole disease)

생장 (growth)

개화 (flowering)

왕벚나무 (*Prunus yedoensis*)

1. 논문 목적

- 구례 지역 왕벚나무(*Prunus yedoensis*) 가로수에서 발생하는 조기 낙엽 현상의 원인을 규명
- 토양, 병해충, 환경 요인 등을 종합적으로 분석하여 왕벚나무의 수세 진단 체계 마련
- 왕벚나무 가로수의 건강성과 경관적 가치를 유지하기 위한 친환경적 관리 방안 제시

2. 중요 연구 결과

- 조기 낙엽의 주요 원인은 곰팡이병, 해충 피해, 그리고 불량한 토양 환경의 복합적 영향으로 나타남
- 관수, 병해충 방제 등 친환경적 관리 기법이 수세 회복에 효과적임
- 현장 적용 결과, 조기 낙엽 발생률이 감소하고 왕벚나무의 생육 상태가 개선됨

3. 중요 시사점

- 조기 낙엽은 다양한 환경·병리학적 요인의 복합적 결과이므로 통합적 관리 전략이 필요
- 친환경 관리 방법은 도시 가로수의 지속가능한 유지와 경관 개선에 효과적
- 본 연구는 향후 도시 가로수 관리 및 수목 진단 연구의 기초 자료로 활용 가능

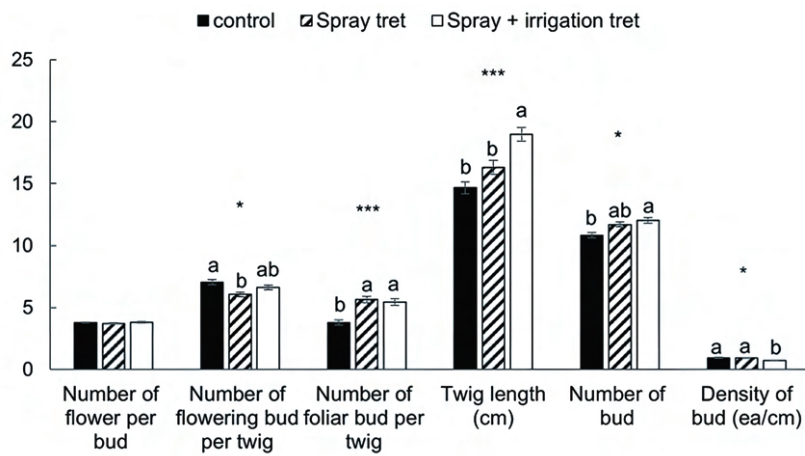


그림15. Number of flowers per bud, number of flowering buds per twig, number of foliar buds per twig, twig length (cm), number of total buds per twig, and density of buds (cm^{-1}) of the cherry trees in Gurye given different treatments and the control. The means with the same letter are not significantly different(one-way ANOVA: $p>0.05$).

울릉도 너도밤나무림의 미세지형별 생태적 특성

한상학, 윤충원¹, 송주현¹, 김호진¹, 이정은¹, 윤이슬¹, 유윤서¹, 이상훈*

국립생태원, ¹공주대학교

한국환경생태학회지 (2019)

[중요 키워드]

식물사회학 (Phytosociology)

흥고단면적 (Basal area)

흥고직경급 ((DBH-class)

중요치 (Importance value)

울릉도 (Ulleungdo)

너도밤나무림 (Beech forest)

1) 논문 목적

- 울릉도 너도밤나무림(Beech forest)의 동태변화를 통한 유지 기작 연구
- 흥고직경급 분포, 중요치, 종조성 분석을 통해 미세지형별 너도밤나무림의 임분구조 특성 파악
- 장기적인 모니터링 자료를 축적하고 효율적인 보전 및 관리를 위한 기초자료 마련

2) 중요 연구 결과

- 흥고직경급 10cm 미만의 너도밤나무는 소능선부와 사면상부에서 계곡부에 비해 개체수가 많이 나타남
- 모든 지형에서 흥고직경급 10cm 미만의 너도밤나무가 다수 분포하는 것은 종자번식이 아닌 영양번식 또는 교란에 의한 움싹갱신 때문으로 판단됨
- 지형별로 나타나는 지표종이 서로 다르며, 소능선부에서는 솔송나무, 계곡부에서는 풍계나무, 사면상부에서는 너도밤나무가 가장 많이 분포함

3) 중요 시사점

- 울릉도 너도밤나무림은 일시적 교란이 발생했을 때 움싹갱신을 통해 피해를 완화할 수 있는 임분구조임
- 너도밤나무림의 군집구조 특성을 미세지형에 따라 제시하여 효율적인 보전 및 관리에 기초자료로 활용
- 본 연구는 울릉도 너도밤나무림이 기후변화에 따른 변화 양상을 장기적으로 파악하는 데 필요한 자료를 제공



그림16. Class distribution of trees with >2cm DBH recorded in the study. AcPi = *Acer pictum* subsp. *mono*, FaEn = *Fagus engleriana*, PrTa = *Prunus takesimensis*, ALMa = *Alnus maximowiczii*, SoCo = *Sorbus commixta*, AcTa = *Acer takesimensis*, StOb = *Styrax obassia*, TiIn = *Tilia insularis*, TsSi = *Tsuga sieboldii*, TaCu = *Taxus cuspidata*, CoCo = *Cornus controversa*, ULLa = *Ulmus laciniata*, CeJe = *Celtis jessoensis*, PhAm = *Phellodendron amurense*, KaSe = *Kalopanax septemlobus*.

한라산 영실 지역 구상나무림의 6년간(2011년과 2017년)의 임분구조 변화

송주현¹, 한상학², 이상훈², 윤충원^{1*}

¹공주대학교, ²국립생태원

한국산림과학회지 (2019)

[중요 키워드]

임분구조 (stand structure)

흉고직경 분포 (DBH distribution)

수간건강상태 (tree vitality)

중요치 (importance value)

종다양도 (species diversity)

1) 논문 목적

- 한라산 영실 지역의 구상나무림(*Abies koreana* forest)에 대한 장기 생태 연구 모니터링 자료를 구축하여 장기적인 변화를 파악
- 2011년과 2017년의 두 시점의 자료를 비교하여 구상나무림의 임분구조 변화 특성을 분석하고, 구상나무 개체들의 수간 건강 상태를 파악
- 한라산 구상나무림의 쇠퇴 원인을 분석하고, 보존 및 관리 방안 수립을 위한 기초자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 6년간 구상나무의 고사율이 증가하였으며, 성목의 쇠퇴가 뚜렷하게 관찰됨
- 구상나무의 천연 갱신은 제한적으로 발생하였고, 종 내 재생산이 원활하지 않음
- 임분 구조 변화는 기후변화 및 환경 스트레스와 밀접한 관련이 있음

3) 중요 시사점

- 구상나무림의 쇠퇴는 기후변화에 따른 고산 침엽수림의 취약성을 제시
- 구상나무의 지속적 보전을 위해 천연 갱신을 촉진할 수 있는 관리 전략이 필요
- 장기적 모니터링을 통해 기후변화에 대응하는 산림 보전 정책 수립이 요구

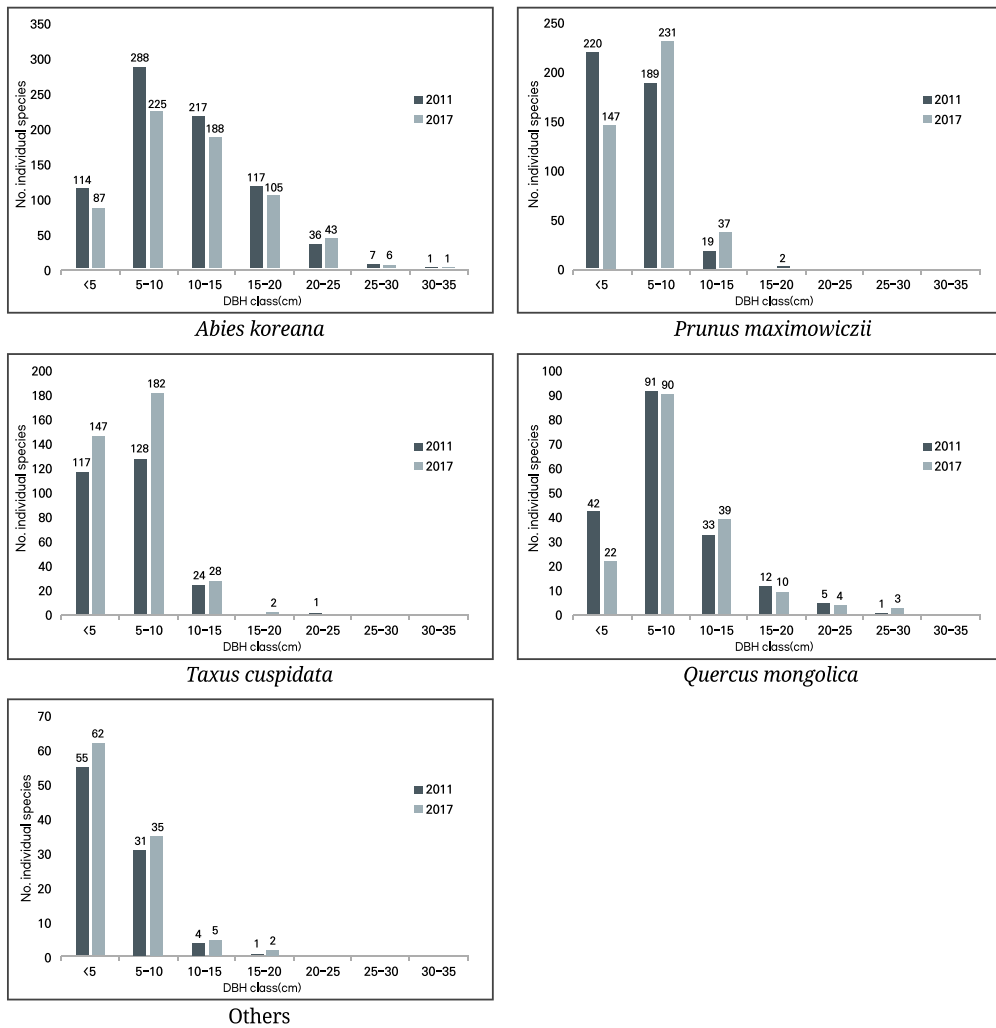


그림17. Changes of the distribution of DBH classes for major 4 species and the other species in study site.

온대북부형 낙엽활엽수림의 디지털 카메라 반복 이미지를 활용한 식물계절 분석

한상학¹, 윤충원², 이상훈^{1*}

¹국립생태원, ²공주대학교

한국산림과학회지 (2020)

[중요 키워드]

식물계절 (phenology)

카메라 기반 반복 디지털 사진 (camera-base repeat digital photography)

이미지 분석 (image analysis)

녹색좌표 (Green chromatic coordinate, Gcc)

계절 현상 (Phenophase)

1. 논문 목적

- 전통적 현장조사와 위성 원격탐사의 한계를 상호 보완하기 위해 디지털 카메라 반복 이미지를 활용하여 식물계절 변화를 정량 분석
- 점봉산의 신갈나무림과 소나무림 간 Gcc 기반 계절 특성 비교로 두 숲 유형의 차이 규명
- 디지털 카메라 기반 모니터링의 국내 적용 가능성과 기후변화 감지·검증 도구로서의 활용 가능성 검토

2. 중요 연구 결과

- 낙엽활엽수림은 상록침엽수림보다 녹색좌표(Green chromatic coordinate, Gcc) 진폭이 크고, 봄철 증가 및 가을철 감소 기울기가 더 가파르게 나타남
- 소나무림은 신갈나무림보다 생장 시작일(UD)이 빠르고 생장 종료일(RD)이 늦어, 결과적으로 생장기간(GSL)이 더 길게 나타남
- 식물계절 현상 추출 정확도는 RMSE 0.008(ROI1)과 0.006(ROI3)으로 나타나 매우 높은 정확성을 확보함

3. 중요 시사점

- 디지털 카메라 반복 이미지는 전통적 현장조사와 위성 원격탐사 간의 관측 간극을 메우는 유용한 방법임을 입증
- 기후변화에 따른 식물계절 변화를 모니터링하고 장기적 생태계 반응을 이해하는 데 중요한 기초 자료를 제공
- 향후 연구에서는 현장조사 및 위성자료와 연계하여 지역 및 국가 수준의 기후·생태 모니터링 체계로 확장될 수 있음을 시사

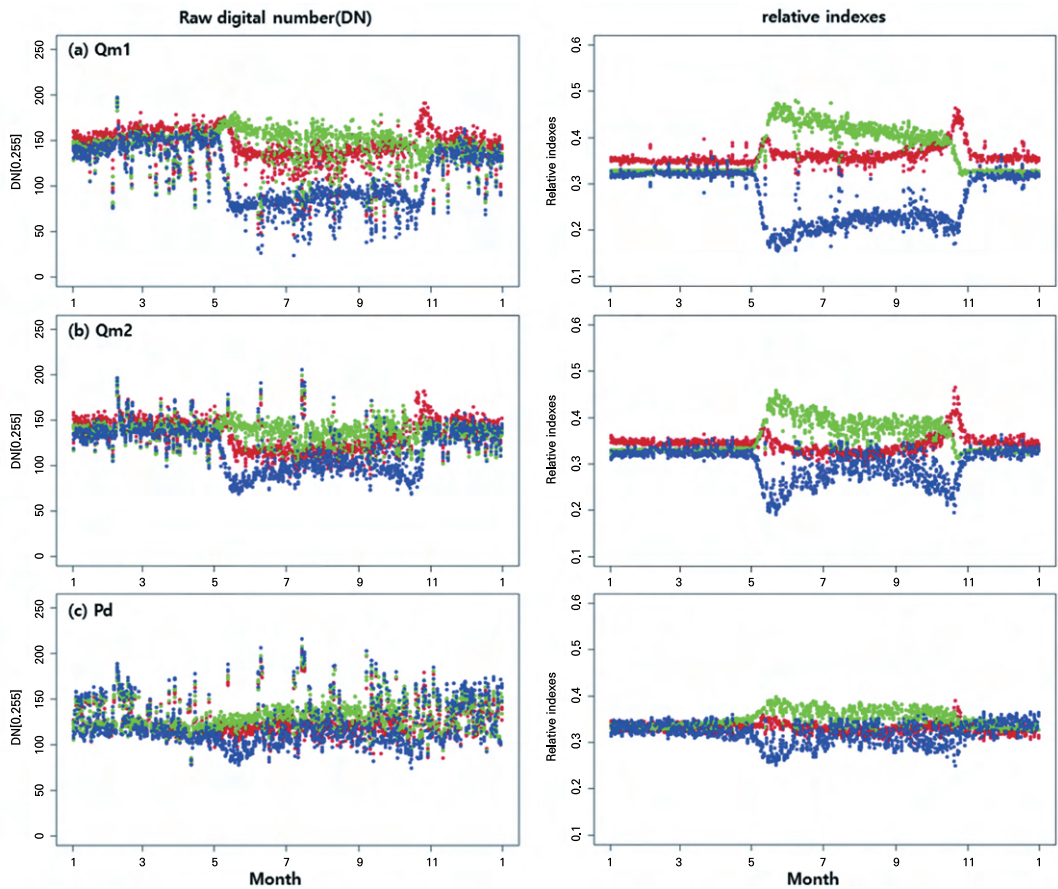


그림18. Seasonal patterns of color channel in region of interest (ROI)1 (a), ROI2 (b), and ROI3 (c) in Mt. Jeombong (left: raw digital number, right: relative index).

Synergistic effect of dwarf bamboo flowering and wild boar rooting on forest regeneration

Soyeon Cho¹, Youngjin Kim², Sangyeop Jung³, Yeonsook Choung^{3*}

¹National Institute of Ecology, ²Migang Ecology Institute, ³Kangwon National University

Forests (2021)

[중요 키워드]

정지된 천이 (arrested succession)
저항성 하층 (recalcitrant understory)
다양성 (biodiversity)
동생대 (semelparity)
동시 개화 (simultaneous flowering)
조릿대 (Dwarf Bamboo)

1) 논문 목적

- 조릿대의 집단 개화가 산림 생태계 구조와 기능에 미치는 영향 규명
- 개화 후 대규모 고사 현상이 주변 식물군집과 토양 환경에 미치는 변화 분석
- 장기적 관점에서 대나무 개화가 산림 생태계의 천이 및 생물다양성 유지에 미치는 역할 평가

2) 중요 연구 결과

- 조릿대가 일제히 개화한 후 고사하면서 숲의 종 균등도가 크게 높아졌으며, 이는 숲의 종 다양성을 향상시키는 중요한 요인으로 작용함
- 멧돼지의 땅 파헤치기 활동은 다양한 새로운 수종의 등장을 촉진하여 숲의 종 풍부도가 증가함
- 멧돼지 땅파기와 조릿대의 개화가 동시에 발생한 지역에서 숲의 재생에 가장 긍정적인 시너지 효과를 확인함

3) 중요 시사점

- 멧돼지 땅파기는 죽은 조릿대 줄기를 제거하고, 뾰족한 지하부 근경 구조를 파괴하며, 씨앗을 분산시키는 등 숲의 자연 재생을 돕는 긍정적인 작용
- 반면, 인위적으로 조릿대의 줄기를 베어내는 것은 조릿대의 재정착이나 새로운 싹을 돋아나게 해 숲의 재생을 오히려 방해
- 조릿대로 인해 숲의 재생이 억제되었던 지역에서 멧돼지 개체수 증가와 같은 자연적 교란을 통해 다양한 식생을 가진 모자이크 형태의 숲으로 재생될 것으로 예상

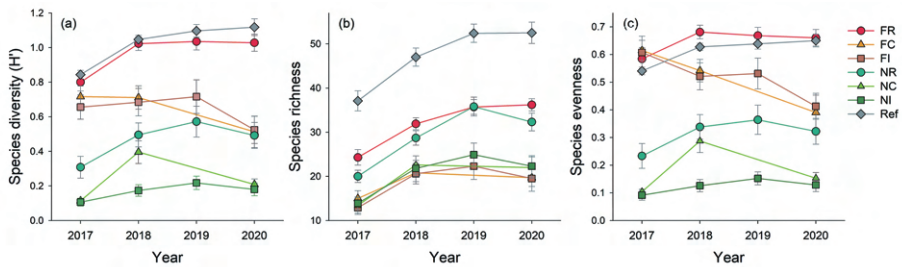


그림19. Stand-based species diversity indices in the stands with seven understory types over time. (a) Species diversity, (b) species richness, and (c) species evenness. FR: flowering and rooting, FC: flowering and cutting, FI: flowering and intactness, NR: non-flowering and rooting, NC: non-flowering and cutting, NI: non-flowering and intactness, Ref: reference. Values are average standard error.

지리산과 한라산의 구상나무 임분 구조의 생태적 특성

송주현¹, 한상학², 이상훈², 윤충원^{3*}

¹국립백두대간수목원, ²국립생태원, ³공주대학교

한국산림과학회지 (2021)

[중요 키워드]

임분구조 (stand structure)

흉고직경 분포 (DBH distribution)

수간건강상태 (stem vitality)

중요치 (importance value)

종다양도 (species diversity)

구상나무(*Abies koreana*)

1) 논문 목적

- 지리산과 한라산 구상나무림(*Abies koreana* forest)의 임분 구조적 차이 비교를 통해 생태적 특성을 규명
- 흉고직경급 분포, 수간 건강 상태, 수관 계층 구조, 중요치, 종 다양도 등을 분석하여 구상나무림의 임분 구조를 비교
- 멸종위기종인 구상나무의 지역별 합리적인 보전 및 관리를 위한 기초 자료를 마련

2) 중요 연구 결과

- 흉고직경급 20cm 미만 구상나무 개체수는 한라산에 더 많았고, 20cm 이상은 지리산에 더 많음
- 곧게 서서 생육하는 구상나무 개체의 비율은 지리산이 높고, 기울어져 생육하는 개체의 비율은 한라산이 높음
- 지리산의 종 다양도는 한라산보다 유의미하게 높게 나타나며, 지리산은 4개의 층위가 발달한 성숙한 임분의 형태를 보이지만 한라산은 3개의 층위로 발달함

3) 중요 시사점

- 기후변화로 인한 구상나무 쇠퇴 현상은 한라산에서 더 심각하게 나타나므로 지역별 차별적 보전 관리가 필요
- 지리산 구상나무림의 상대적 안정성은 다양한 수종과의 공존이 임분 지속성에 긍정적으로 작용
- 구상나무림 보전을 위해 자연적 갱신 촉진과 인위적 관리 방안을 병행하는 정책적 접근이 요구

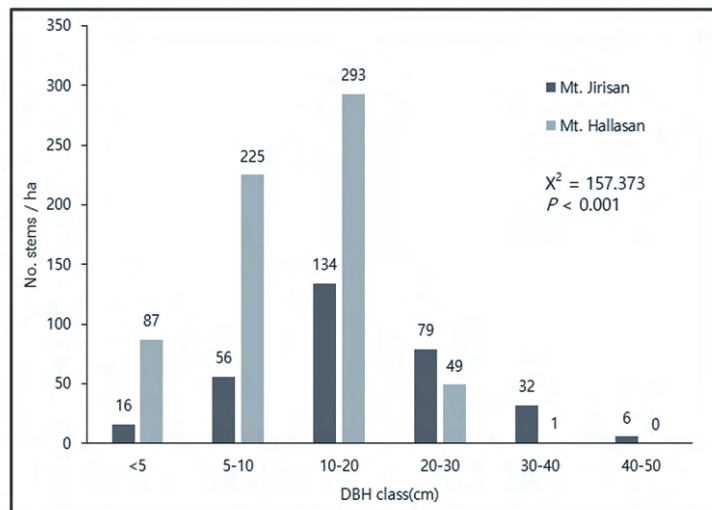


그림20. Chi square test of the DBH classes distribution for *A. koreana* in Mt. Jirisan and Mt. Hallasan.

함평만 갯벌의 모래 퇴적물로 인한 염습지 식물의 공간적 변이

홍민기, 이재연, 박정수, 이효혜미*

국립생태원

응용생태공학회 (2022)

[중요 키워드]

염습지 식물 (Salt Marsh Plants)

모래 퇴적물 (Sandy Sediment)

함평만 갯벌 (Hampyeong Tidal Flat)

식생 군락 (Vegetation Community)

갯잔디 (*Zoysia sinica*)

해홍나물(*Suaeda maritima*)

1) 논문 목적

- 함평만 갯벌에서 모래 퇴적물이 염습지 식물의 분포와 군락 구조 변화에 미치는 영향 규명
- 2016년과 2022년의 식생도를 비교하여 시간에 따른 주요 염생식물 군락의 면적 변화와 그 원인 파악
- 토양 환경 요인과 식생 군락 간의 상관관계를 분석하여 효과적인 갯벌 생태계 보전 관리 전략 수립의 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 해홍나물(*Suaeda maritima*) 군락은 2016년 대비 2022년에 약 74% 감소하며, 반대로 갯잔디(*Zoysia sinica*) 군락은 약 75% 증가함(면적 변화 경향 분석: 해홍나물 $p<0.01$ 감소, 갯잔디 $p<0.05$ 증가)
- 갯잔디 군락은 지하경과 줄기의 발달로 모래 퇴적을 가속화하여 사구 환경을 안정화 시키는 역할을 하는 것으로 나타남
- 토양 분석 결과, 해홍나물 군락은 모래 비율과 pH가 높으나, 갯잔디 군락은 수분·유기물·전기전도도 총인의 값이 유의하게 더 높게 나타남

3) 중요 시사점

- 함평만의 모래화는 절대염생식물(해홍나물) 쇠퇴와 임의염생식물(갯잔디) 확장을 동시에 촉진
- 갯잔디는 퇴적물 포획-지형 상승-침수 스트레스 완화의 자기강화 루프를 만들 수 있는 생태공학적 엔지니어 종 후보
- 장기 모니터링(식생도·단면·토양)과 기후요인(가뭄/강수) 연계가 필요한 통합 관리가 요구

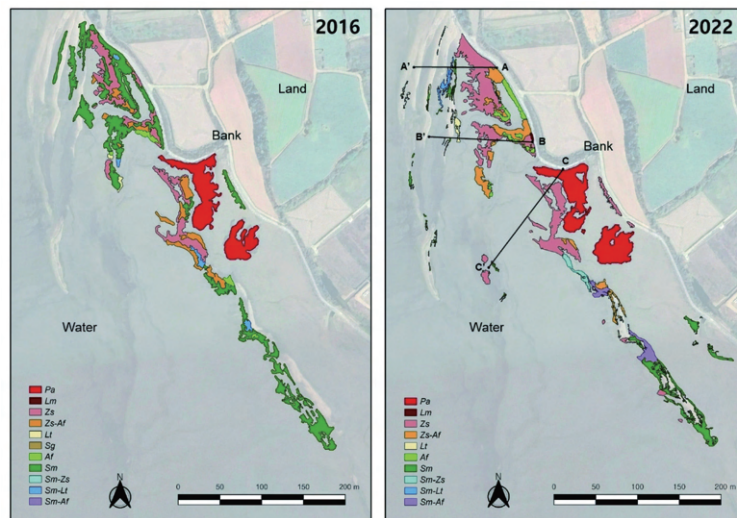


그림21. Comparison of vegetation maps at Hampyeong Bay between 2016 and 2022. The transects indicated by 3 black lines installed in different vegetation types (A- A', B-B' and C-C'). Af: *Artemisia fukudo*, Lm: *Leymus mollis*, Lt: *Limonium tetragonum*, Pa: *Phragmites australis*, Sg: *Suaeda glauca*, Sm: *Suaeda maritima*, Zs: *Zoysia sinica*.

Phenocam을 활용한 국내 습지 및 산림생태계 대표 수종의 계절적 변화 분석

홍민기, 이효혜미, 박정수*

국립생태원

응용생태공학회 (2023)

[중요 키워드]

기후변화 (Climate change)

장기 생태 연구 (Long-term ecological research)

피노캠 (Phenocam)

식물계절 (plant phenology)

엽색 지수 (Leaf color index)

1) 논문 목적

- 피노캠을 활용하여 국내 습지 및 산림생태계 주요 수종의 계절적 변화 분석
- 식생 계절성과 기후 요인의 관계를 규명하여 생태계 반응을 파악
- 원격 모니터링 기반 생태계 관리와 기후변화 대응 전략에 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 소나무류(*Pinus thunbergii*, *Pinus densiflora*)는 전체 생장 기간이 점차 증가하는 경향을 보이며 겨울철 기온 및 강수량과 양의 상관관계를 보임
- 구상나무(*Abies koreana*)는 8월 강수량이 많을수록 생장종료일(eos)이 앞당겨지는 경향을 보여 최근 보고되는 구상나무 고사 현상과 연관성을 시사함
- 우포늪의 버드나무(*Salix koreensis*)는 생장 시작이 늦어지고 종료가 빨라지며 전체 생장 기간이 단축되는 특징을 보임

3) 중요 시사점

- 기후변화에 따른 기온과 강수 패턴 변화는 수종별로 상이한 식물계절 반응을 유도하며, 장기 생태 모니터링을 통해 이를 종합적으로 파악해야 함
- 구상나무 군락의 쇠퇴와 같은 현상은 특정 시기의 강수량 변화와 밀접히 연결될 수 있어, 향후 보전 전략에 기후 요인 분석이 필수적
- 피노캠 기반 연구는 현장 조사와 위성 원격 탐사의 장점을 상호 보완할 수 있어, 장기적이고 국가 규모의 기후변화 대응 식물계절 자료 구축에 중요한 역할

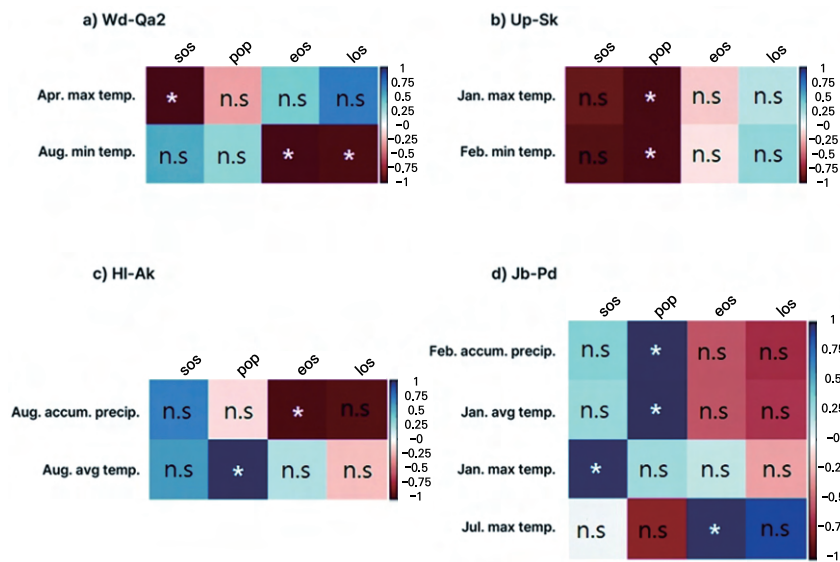


그림22. Correlation analysis between phenophases and climatic factors using Pearson correlation coefficient. *: p-value < 0.05, n.s: not significant.

Twenty years of regeneration process for tree species in burnt pine forests with different severity and initial regeneration

Sangyeop Jung¹, Jaeyeon Lee², Kyungeun Lee², Soyeon Cho²,
Byeongyoung Kim³, Yeongseob Shin⁴, Kyu Song Lee⁵, Yeon-
sook Choung³

¹Chungrok Environmental Ecosystem Research Institute, ²National Institute of Ecology,

³Kangwon National University, ⁴Entop Engineering,

⁵Gangneung-Wonju National University

Journal of Plant Biology (2023)

[중요 키워드]

소나무 (*Pinus densiflora*)

군집동태 (Population dynamics)

신갈나무 (*Quercus mongolica*)

굴참나무 (*Quercus variabilis*)

재생 전략 (Regeneration strategy)

움싹재생 (Resprouting)

1) 논문 목적

- 산불피해를 입은 소나무림에서 20년 동안의 재생 과정을 추적하여 산림 동태를 분석
- 장기 모니터링을 통해 군락 수준의 시간에 따른 생태 천이 과정을 규명하고, 종 수준에서 군락의 재생 과정에 결정적 역할을 하는 수종의 재생전략을 밝히고, 이후의 변화를 추적
- 이를 통해 초기 임분 구조가 수십년 후 미래 산림의 좋은 예측지표가 될 수 있는지 여부를 밝힘

2) 중요 연구 결과

- 산불 피해 정도에 따라 자연적인 재생에서 차이를 보임. 산불피해정도가 높은 지역은 참나무류로 재생되고, 산불 피해정도가 낮은 지역은 참나무류와 소나무가 함께 재생됨
- 산불 이후 초기 식생이 장기적인 종 구성에 영향을 미치며, 초기 재생이 활발한 지역은 20년 후에도 종다양성이 높게 유지되는 반면, 초기 재생 정도가 낮은 지역은 복원 속도가 느리며, 특정 종에 의해 점유되는 경향을 보임
- 장기 모니터링은 산림 생태계의 회복력과 종 보전 가능성을 평가하는 데 필수적임을 보여줌

3) 중요 시사점

- 산불 피해정도와 초기 복원 상황을 고려하여 복원 계획을 수립해야 함
- 산불 피해 후 자연적인 재생 과정을 이해하고 이를 돕는 장기적인 산림 관리 전략 필요
- 본 연구는 산림 생태계의 지속가능한 관리와 생물다양성 보전을 위한 중요한 기초 자료 제공

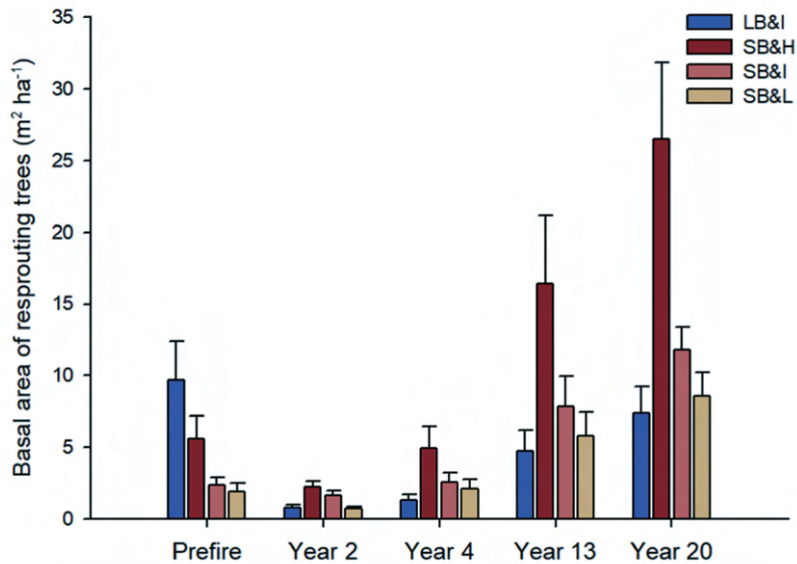


그림23. Effect of prefire resprouting tree species, as a biological legacy, on the postfire stands with different burn severities (LB: Light burn, SB: Severe burn) and initial regenerations (H: High, I: Intermediate, L: Low). Average \pm SE (n=8 for SB&L, and n=4 for the rest). Here, the basal area refers to those of broadleaved tree species with resprouting ability, excluding *Pinus densiflora*, which was dominant before fire but not resprouting.

Ecophysiological characteristics of *Rosa rugosa* under different environmental factors

Young-Been Kim^{1,2}, Sung-Hwan Yim¹, Young-Seok Sim¹, Yeon-Sik Choo^{1*}

¹Kyungpook National University, ²Baekdudaegan National Arboretum

journal of ecology and environment (2023)

[중요 키워드]

갯메꽃 (*Rosa rugosa*)

광합성 (photosynthesis)

엽면적지수 (Leaf area index)

기후변화 (Climate change)

증산 (Transpiration)

수분 이용 효율 (Water use efficiency)

1) 논문 목적

- 해안 사구 환경에서 자생하는 갯메꽃(*Rosa rugosa*)의 생리생태학적 특성을 규명하여 생육 전략 이해
- 토양 수분과 염분 조건이 갯메꽃의 광합성, 증산, 수분 이용 효율에 미치는 영향 분석
- 해안 사구 생태계의 식생 복원과 관리 전략 제언

2) 중요 연구 결과

- 갯메꽃(*Rosa rugosa*)은 고온과 강한 빛에 노출될 경우, 광합성 속도와 기공 전도율이 감소함
- 해안 사구의 갯메꽃은 비광화학적 소광(NPQ) 기작을 통해 과잉 광자 에너지를 열로 방출함으로써 광스트레스에 효과적으로 대처함
- 엽록소 a와 카로티노이드 함량이 높아 광흡수에 최적화되어 있음
- 고온 및 강한 빛에 노출된 갯메꽃은 낮은 엽수분 함량(LWC)에 대응하여 가용성 탄수화물과 이온을 활용해 높은 삼투압을 유지함

3) 중요 시사점

- 화분 식물에서 엽록소 형광 값(Fv/Fm)이 해안 사구 식물보다 낮게 나타났는데, 이는 갯메꽃이 높은 온도와 PAR 수준에 취약하다는 것을 의미
- 기후 변화가 진행됨에 따라 갯메꽃의 적합 서식지가 점차 축소되고 북쪽으로 이동할 것으로 예상됨

- 갯메꽃이 해안 사구의 다양한 환경 스트레스에 대응하기 위해 광합성, 엽록소 함량, 삼투 조절 등 여러 생리적 특성을 활용한다는 것을 확인함
- 기후 변화 및 해안 사구 교란에 대비한 사구식생(갯메꽃)의 보전 전략을 수립하는 데 중요한 기초 자료를 제공

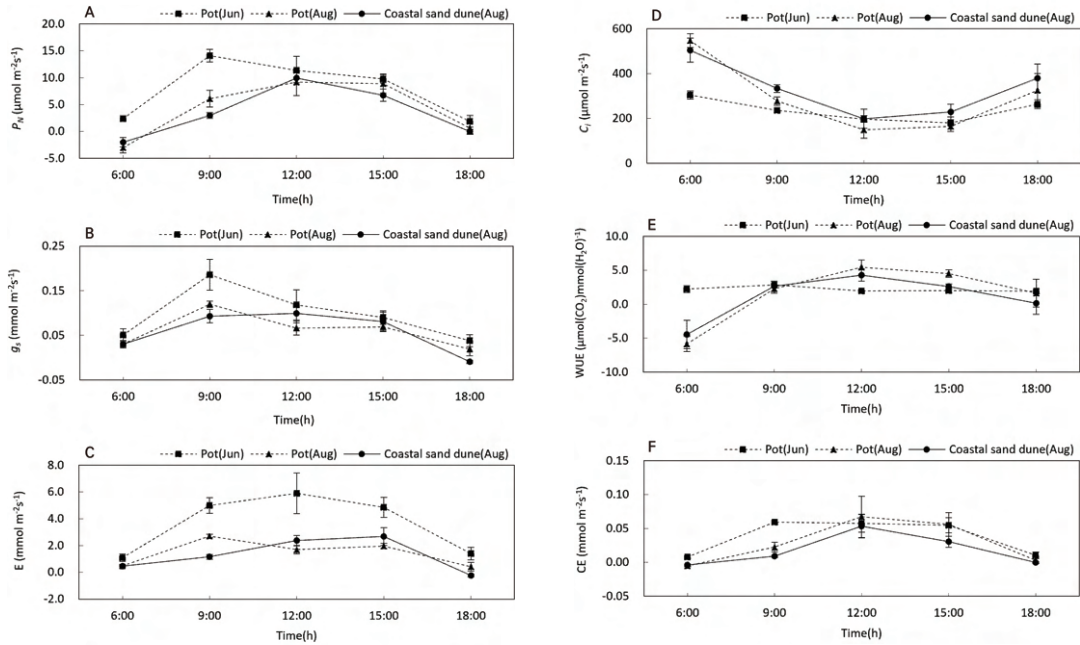


그림24. Diurnal variations in the photosynthetic parameters of *Rosa rugosa* measured in July in the pot (quadrangle), August in the pot (triangle), August in the Goraebul coastal sand dune (circle). (A) Net photosynthetic rate (P_n), (B) stomatal conductance (g_s), (C) transpiration rate (E), (D) intercellular CO_2 concentration (C_i), (E) instantaneous water use efficiency (WUE), (F) instantaneous carboxylation efficiency (CE).

Photosynthetic characteristics and chlorophyll of *Vitex rotundifolia* in coastal sand dune

Byoung-Jun Kim, Sung-Hwan Yim, Young-Seok Sim, Yeon-Sik Choo*

Kyungpook National University

journal of ecology and environment (2023)

[중요 키워드]

엽록소 (chlorophyll)

엽록소 형광 (chlorophyll fluorescence)

해안 사구 식물 환경 스트레스 (coastal dune plant environmental stress)

광합성 (photosynthesis)

순비기나무 (*Vitex rotundifolia*)

1) 논문 목적

- 고래불 해안사구에서 자생하는 순비기나무(*Vitex rotundifolia*)의 광합성과 엽록소 특성을 계절별로 분석하여 환경 스트레스 적응 기작을 규명
- 포트(pot) 조건과 사구 환경 조건을 비교하여 수분, 온도, 토양 환경 차이가 생리적 반응에 미치는 영향을 파악
- 순비기나무의 생리생태적 특성을 바탕으로 해안사구 보전과 훼손지 복원에 활용할 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 사구 환경에서 자란 개체는 광합성률과 Y(II)가 6월에 최고치를 보이거나, 고온기인 7-8 월에는 급격히 감소하고, 광보호 메커니즘(Y(NPQ) 증가)으로 적응하는 양상이 관찰됨
- 사구 개체는 포트 개체에 비해 엽록소 a/b 비율과 카로티노이드 함량이 높아, 광합성 효율 증대와 광산화 스트레스 회피 전략을 동시에 나타냄
- 사구 개체는 높은 잎 수분함량, 삼투압, 총 이온 함량을 유지하여 수분 스트레스에 적응하나, 9월 이후에는 수용성 탄수화물 감소와 빠른 낙엽화를 보임

3) 중요 시사점

- 순비기나무는 수분 부족, 빈약한 토양, 고온 등 사구 환경 스트레스에 적응하기 위해 기공 조절, 삼투 조절, 광보호 메커니즘을 복합적으로 활용한다는 점이 밝혀짐
- 순비기나무의 이러한 생리적 적응 특성은 해안사구 식생의 안정화와 유지에 기여하며, 사구 생태계 보전의 핵심 종으로서 가치가 큼
- 해안사구 훼손 복원 및 기후변화에 따른 해안 식생 관리 전략 수립에 과학적 근거 제공

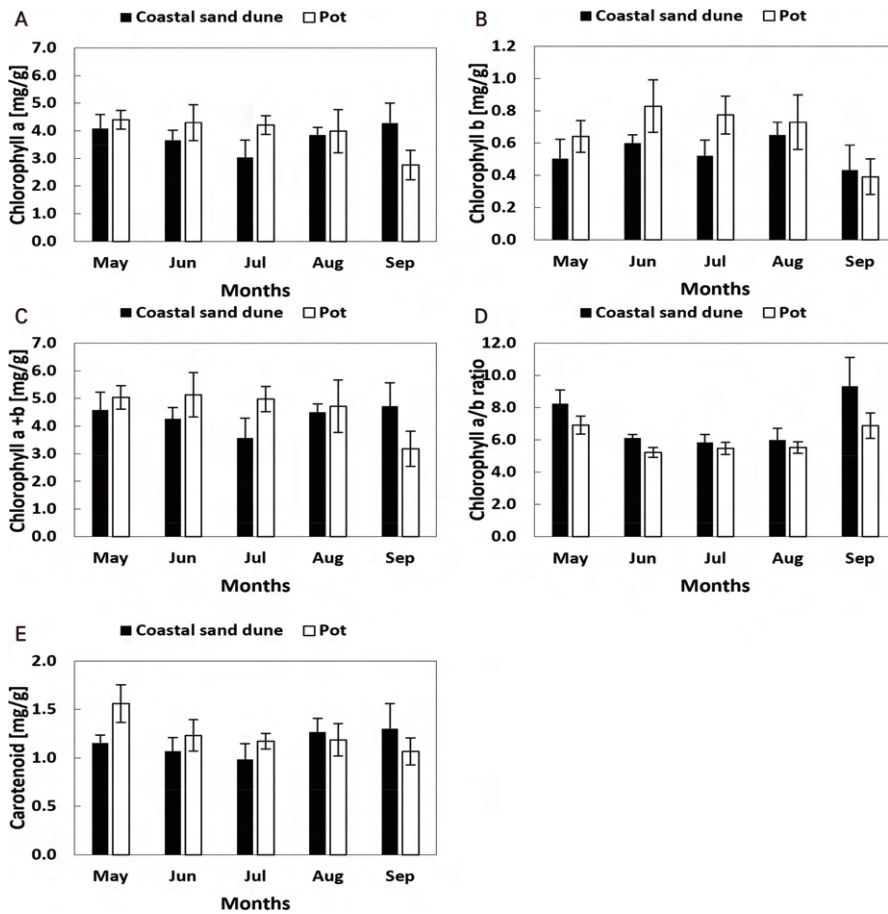


그림25. Seasonal variations in (A) chlorophyll a content, (B) chlorophyll b content, (C) chlorophyll a + b content, (D) chlorophyll a/b ratio, and (E) carotenoid content in the leaves of *Vitex rotundifolia* growing in coastal sand dune and the pot. Data are presented as mean values with standard deviation.

Phenological response of an evergreen broadleaf tree, *Quercus acuta*, to meteorological variability: evaluation of the performance of time series models

Jeongsoo Park*, Minki Hong, Hyohyemi Lee

National Institute of Ecology

Forests (2024)

[중요 키워드]

생물계절 (phenology)

녹색좌표 (Green chromatic coordinate, GCC)

상록활엽수 (evergreen broad-leaved tree)

기후변화 (climate change)

강수량 (precipitation)

1) 논문 목적

- 시계열 분석을 통해 붉가시나무 식물계절 변동과 미기상 변화와의 연관성 파악
- 다양한 기상 요인 중 붉가시나무 녹색좌표(GCC) 변동에 유의미한 영향을 미치는지 변수 확인
- 자기상관성을 가지는 장기 피노캠 식물계절 측정 데이터에 시계열 통계 모델 (SARIMAX) 적용 가능성 파악

2) 중요 연구 결과

- 녹색좌표(GCC)와 기상 변수 모두 강한 자기상관성과 계절성을 보이며, 이는 일반 회귀분석으로는 신뢰할 수 없는 결과가 나올 수 있음의 의미함
- 기온보다는 강수량 및 습도가 GCC 장기 추세와 더 밀접한 상관성을 가지며, 특히 건기 강수량 감소 이후 GCC값이 크게 감소함
- SARIMAX 모델에서 다양한 기상변수 중 강수량이 유의미한 양의 상관관계를 보임

3) 중요 시사점

- 상록활엽수(붉가시나무) 계절적 반응과 수목 활력은 온도보다 강수 패턴 변화에 민감하게 좌우됨
- 시계열 통계 기법을 활용한 피노캠 고빈도 영상 자료 분석은 장기적인 생물계절 연구의 새로운 접근법을 제공
- 향후, 기후변화 대응과 효과적인 산림 관리를 위해서는 가뭄에 따른 상록활엽수 생리적 스트레스에 대한 정밀 모니터링 필수적임

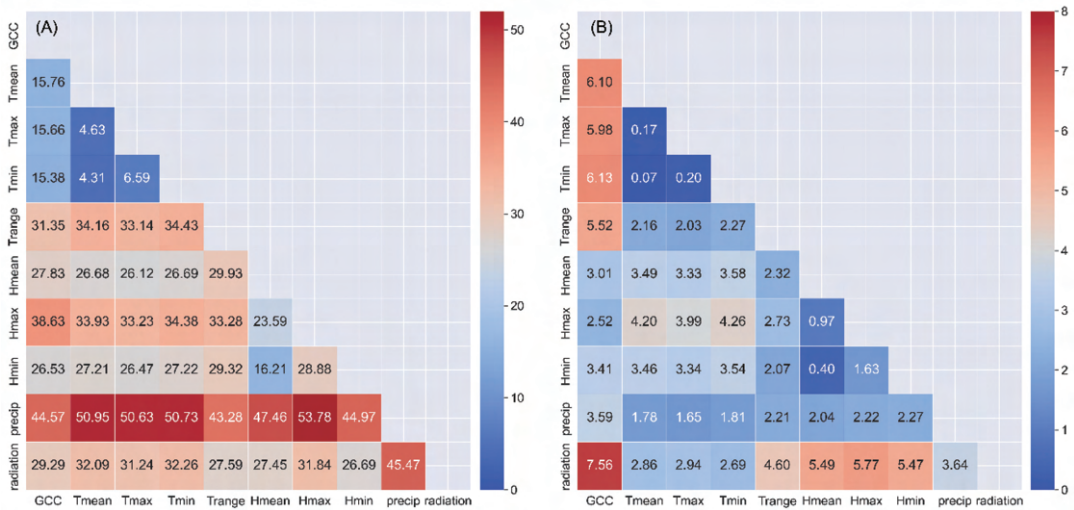


그림26. Heat map of the paired dynamic time warping (DTW) distance matrix for the observed GCC time series (A) and the trend component of the GCC (B). A lower DTW distance between the two time series variables indicates a greater similarity in their temporal changes.

4. 조류 모니터링 연구

기상변화에 따른 순천만 수조류의 군집특성

최성훈¹, 김우열¹, 이두표^{2*}, 진선덕^{1*}

¹국립생태원, ²호남대학교

한국조류학회지 (2019)

[중요 키워드]

수조류 (Waterbirds)

기상변화 (Weather change)

서식지변화 (Habitat change)

개체군 변화 (Population fluctuation)

순천만 (Suncheon-bay)

1) 논문 목적

- 순천만 수조류의 도래 현황을 조사하고, 연도별, 계절별 군집과 기상 변화 간의 상관 관계를 분석하여 수조류의 도래 실태를 파악
- 순천만 수조류의 보전 및 관리 방안에 필요한 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 2010년 4월부터 2014년 9월까지 순천만에서 총 102종 34,969개체의 수조류가 관찰됨
- 수조류의 종수와 개체수는 가을철에 가장 높고, 여름철에 가장 낮은 경향을 보임
- 우점종은 청둥오리(9,145개체), 민물도요(8,420개체), 흑부리오리(3,211개체), 흰뺨검둥오리(2,710개체), 갯이갈매기(2,701개체) 순으로 나타남
- 기온, 상대습도, 지면온도와 음의 상관관계를 보이며, 풍속과 강수량과는 양의 상관관계를 보임
- 두루미류는 지면온도와 음의 상관관계를 보이며, 맹금류는 기온, 상대습도, 지면온도와 음의 상관관계를 보이고, 백로류는 기온과 양의 상관관계를 보임

3) 중요 시사점

- 순천만은 다른 서남해안의 습지에 비해 수조류 종 다양성이 높으며, 순천만 정원 박람회와 같은 보전 노력이 수조류 개체군 증가에 긍정적인 영향을 미쳤을 가능성이 있음
- 순천만은 멸종위기종인 흑두루미의 주요 월동지로, 농약 중독 등의 위험이 있었던 만큼 세심한 관리가 필요
- 도요물떼새류의 감소 경향에 대한 추가 연구가 필요하며, 백로류의 경우 기온과의 명확한 연관성 규명을 위해 지속적인 모니터링이 필요

- 본 연구는 향후 기상 변화에 따른 조류의 다양성 변화를 파악하고, 국내 최대 철새 도래지인 순천만의 효과적인 보전 방안을 수립하는 데 중요한 기초 자료로 활용 가능

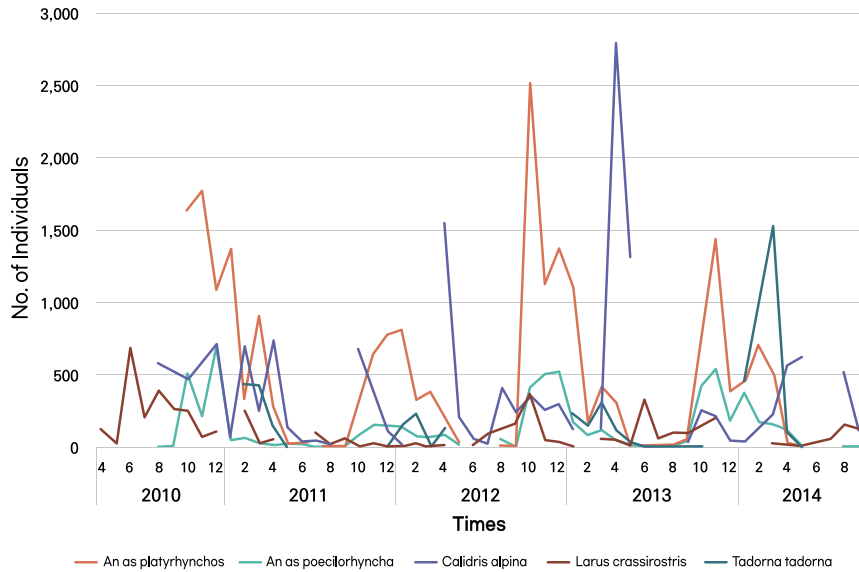


그림27. Population change of the dominance species with maximum number of individuals in Suncheon-bay.

번식기 유부도 일대에 서식하는 검은머리물떼새(*Haematopus ostralegus ostralegus*) 성체와 미성체의 섭식 능력 비교

이상연^{1,2}, 유영한³, 정길상¹, 최유성^{4*}, 주성배^{1*}

¹국립생태원, ²전남대학교, ³공주대학교, ⁴국립생물자원관

Korean Journal of Environmental Biology (2019)

[중요 키워드]

검은머리물떼새 (*Haematopus ostralegus*)

성체 (adult)

미성체 (immature)

섭식능력 (foraging efficiency)

번식기 (breeding season)

유부도 (Yubu Island)

1) 논문 목적

- 유부도 일대에 서식하는 검은머리물떼새(*Haematopus ostralegus*) 성체와 미성체의 섭식 능력 차이를 주요 먹이원별로 비교분석
- 법정보호종인 검은머리물떼새 개체군 및 서식지 보호 정책 마련을 위한 기초 자료를 확보
- 성체와 미성체 간의 섭식 행동의 차이를 규명

2) 중요 연구 결과

- 먹이원 탐색 방법에서 복족류를 섭식할 때 미성체가 성체에 비해 중복탐침과 찔러 넣기를 더 높은 비율로 이용하는 유의미한 차이가 나타남
- 이매패류를 섭식할 경우 미성체는 성체보다 먹이원 탐색 시도 횟수와 머리 들어올리기 횟수가 훨씬 빈번했음
- 미성체는 먹이원 위치를 파악하는 능력이 성체보다 떨어지지만, 전반적인 섭식 성공률과 섭식에 소요되는 시간은 성체와 유의미한 차이가 없는 유사한 수준이었음

3) 중요 시사점

- 유부도는 검은머리물떼새의 핵심 번식지로서 국제적 보전 가치 중요
- 성체와 미성체의 섭식 능력이 유사하다는 발견은 유부도에 서식하는 개체들이 텃새 형태로 남아 월동하며 섭식 능력이 향상되었을 가능성이 높음
- 본 연구는 멸종위기 도요·물떼새류의 보전 정책 수립과 서식지 보호 전략 마련에 기초 자료 제공

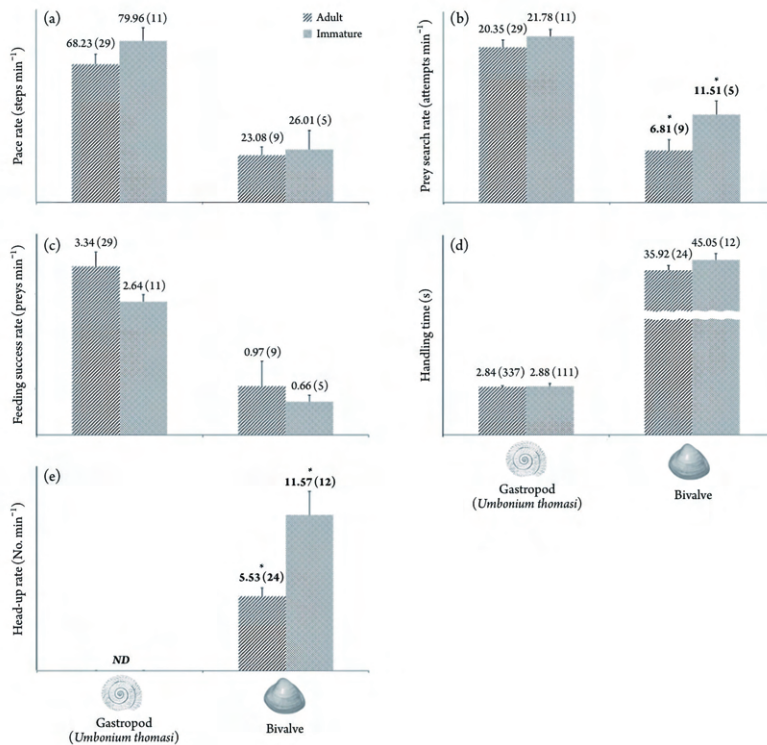


그림28. Comparisons of the foraging efficiency between adult and immature Eurasian Oystercatchers (*Haematopus ostralegus osculans*) by main prey (gastropods (*Umbonium thomasi*) and bivalves) during the breeding season on Yubu Island in Korea. (a) Pace rate (the number of steps per a minute); (b) the prey search rate (the number of the bill contacts with the surface of the tidal flat for feeding); (c) the feeding success rate (the number of prey eaten per a minute); (d) the handling time (the time consumed from prey search to swallow); and (e) the heads-up rate (the number of the times the head was raised and the bill held parallel to the tidal flat per handling time). Handling time was converted to minutes. The numbers above the graph indicate the mean and the numbers in parentheses indicate the sample size. The asterisks indicate a significant difference in mean values between the significance levels in the Mann-Whitney U test: * $p < 0.05$; ND: not detected.

임도 개설에 따른 조류의 행동권 변화에 관한 연구

한승우¹, 진선덕², 임은홍³, 최성훈³, 이준우^{4*}

¹한국환경생태연구소, ²국립생태원, ³제주대학교, ⁴충남대학교

한국조류학회지 (2019)

[중요 키워드]

임도 (Forest road)

조류 (Bird)

군집 (Community)

종다양도 (Species diversity)

행동권 (Home-range)

서식지 교란 (Habitat disturbance)

1) 논문 목적

- 민주시산을 대상으로 임도 개설이 조류의 행동권에 미치는 영향 파악
- 임도 개설이 산림 내 조류의 행동권 변화에 미치는 영향에 대한 기초 자료 제공
- 장기적인 모니터링 자료를 축적하고 효율적인 보전 및 관리를 위한 기초자료 마련

2) 중요 연구 결과

- 임도 공사 중인 시기의 모든 구간에서 조류 군집에 영향이 나타났으며, 특히 공사로 인해 조류가 인근 숲으로 넓게 분산되는 경향을 보임
- 핵심 서식지인 KDE 50%를 기준으로 분석한 결과, 임도 개설로 인해 서식지가 기존 핵심 서식지에서 이동되고 서식지 변화가 심해짐을 알 수 있음
- 일부 조류는 임도 개설 영향으로 계곡부로 유입되어 핵심 서식지로 이용하는 것으로 분석되었는데, 이는 계곡부가 풍부한 먹이원을 제공하기 때문으로 판단됨

3) 중요 시사점

- 임도 개설은 조류 서식지에 많은 변화를 가져오며, 서식지 단편화로 인해 일정 면적 이상의 서식지를 필요로 하는 조류에게 부정적인 영향을 줄 수 있어 관리가 필요
- 임도 개설로 인한 서식지 단편화 현상은 단기간에 발생한 것으로 판단되며, 지속적인 모니터링을 통해 산림 생태계의 복원 과정을 파악해야 함
- 본 연구 결과는 지속 가능한 산림 보전을 위한 기초 자료를 제공하고, 유사한 산림 정책 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대

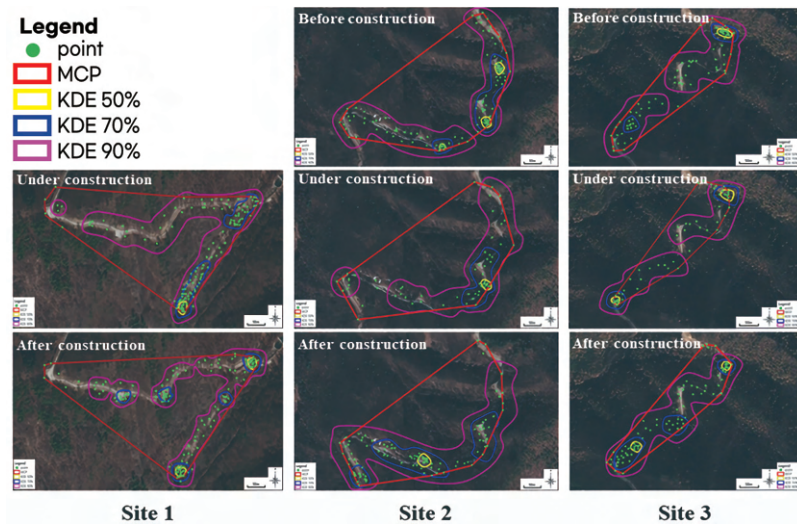


그림29. Home range map using MCP and KDE by site.

한국에 도래하는 쇠백로의 집단유전 분석

정길상¹, 최유성², 박소연¹, 노푸름³, 이윤경¹, 최성훈¹, 윤종민¹, 진선덕¹, 박진영^{2*}

¹국립생태원, ²국립생물자원관, ³이화여자대학교

한국조류학회지 (2019)

[중요 키워드]

쇠백로 (*Egretta garzetta*)

미토콘드리아 CO1 (Mitochondrial COI)

Cyt-b (Cytochrome B)

집단유전 (Population genetic structure)

보전 (Conservation)

이주성 조류 (Migratory birds)

1) 논문 목적

- 한국 각지에 분포하는 쇠백로(*Egretta garzetta*) 집단의 유전자 다양성과 분포 패턴을 분석
- 쇠백로의 희귀 유전자형을 검출하고, 집단 번식하는 백로류의 보존 방안을 제시
- 희귀 유전자형이 발견되는 번식지에 대한 보호관리 방안을 마련하여 유전자 다양성을 증대시키는 데 기여

2) 중요 연구 결과

- 연구에서 조사된 쇠백로 번식지 간의 유전적 분화 정도는 매우 낮은 것으로 나타나며, 이는 쇠백로의 높은 이동성 때문인 것으로 보임
- 모든 유전자형이 최우점하는 유전자형에서 분지한 것으로 분석되며, CO1 유전자에서는 9개의 핵형 중 haplotype_2가 65%로 가장 우점함
- 모계유전만을 하는 미토콘드리아 희귀 유전자형이 국지적으로 분포하는 현상은 암컷의 유소성 때문일 수 있음

3) 중요 시사점

- 이동성이 큰 쇠백로의 특성상 각 지역 집단 간의 유전적 교류가 활발하게 일어나고 있음을 암시
- 암컷의 유소성으로 인해 희귀 유전자형이 국지적으로 나타날 수 있으므로, 해당 번식지에 대한 국제적인 보호관리 방안 마련이 필요
- 향후 연구에서는 고해상도 마커와 함께 생태행동 연구를 병행함으로써 우리나라 쇠백로의 생태를 더욱 세밀하게 밝혀야 할 필요가 있음

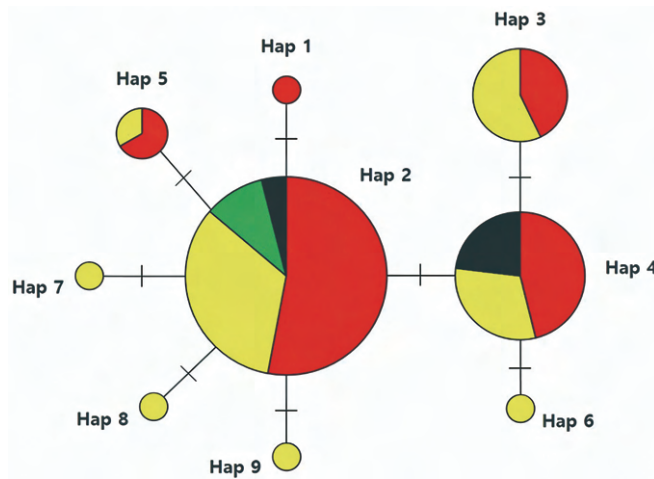


그림30. Phylogenetic haplotype network of the partial CO1 gene Group 1: Red, Group 2: Yellow, Group 3: Green, Group 4: Black.

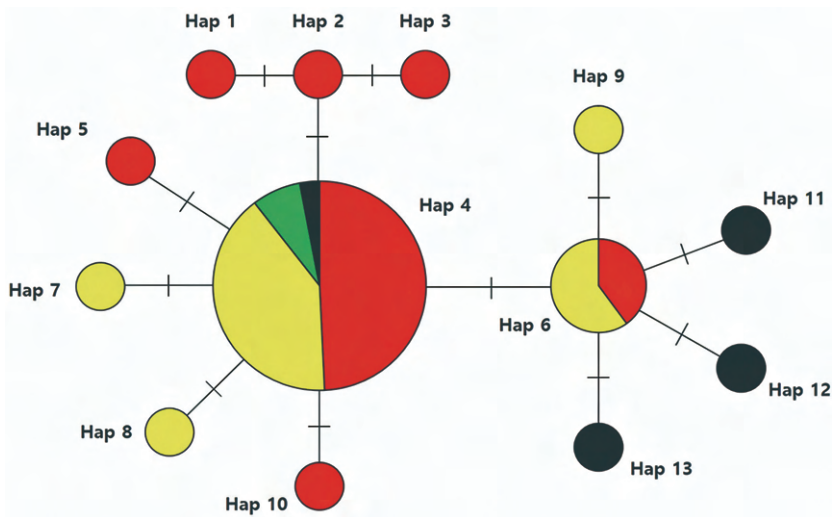


그림31. Phylogenetic haplotype network of the partial cytochrome b gene Group 1: Red, Group 2: Yellow, Group 3: Green, Group 4: Black.

한국에 월동하는 독수리의 비행 행동 특성 분석

강태한, 이상보, 이한수, 백운기¹, 유재평², 진선덕^{3*}

한국환경생태연구소, ¹국립대구과학관, ²국립중앙과학관, ³국립생태원

Korean Journal of Environmental Biology (2019)

[중요 키워드]

독수리 (*Aegypius monachus*)

비행 행동 (Flying behavior)

비행 고도 (Flight altitude)

월동 (wintering)

GPS 추적기 (GPS tracker)

1) 논문 목적

- 월동 기간 동안 한국에 머무는 독수리(*Aegypius monachus*)의 비행 행동 특성을 분석하여 보전 전략 수립의 기초 자료로 활용
- 에너지 효율을 위해 활공을 주로 하는 독수리가 월동기 동안 먹이 획득을 위해 어떤 비행 전략을 사용하는지 규명
- GPS 추적 기술을 활용하여 독수리의 비행 시공간 데이터를 정확하게 수집하고 분석

2) 중요 연구 결과

- 한국에서 월동하는 독수리는 평균 131일 동안 머물며, 평균 비행 비율은 19.6%로 나타남
- 독수리의 비행 고도는 300m 이하가 65.9%로 가장 많고, 시간대별 비행률과 고도는 양의 상관관계를 보임
- 월동 중기에는 300m 이내의 고도를 안정적으로 이용하나, 복상 시기인 4월에는 번식지로의 원거리 이동을 위해 높은 고도를 이용하는 비율이 높음

3) 중요 시사점

- 독수리가 넓은 행동권, 높은 비행비율, 높은 고도 비행 특성을 보이는 것은 먹이 부족 상황에서 다른 개체의 먹이 활동을 살펴보는 사회적 상호작용을 통해 먹이를 찾는 효율적인 비행 방법으로 판단됨
- 동일 개체일지라도 월동하는 연도에 따라 월동 기간이 차이를 보였는데, 이는 월동지의 환경에 따라 월동 기간과 장소가 달라진다는 것을 시사
- 향후 한국에 월동하는 독수리의 월동기 동안의 충분한 먹이 공급이 비행 행동 특성에 어떤 영향을 주는지에 대한 지속적인 연구가 필요

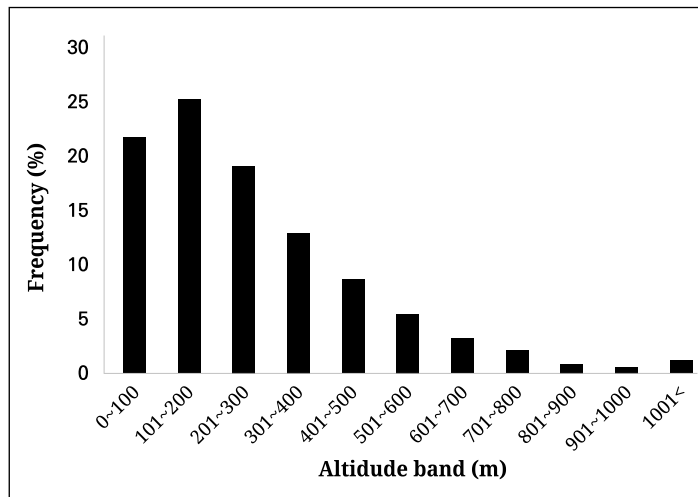


그림32. Frequency of flight altitudes of cinereous vultures above ground level.

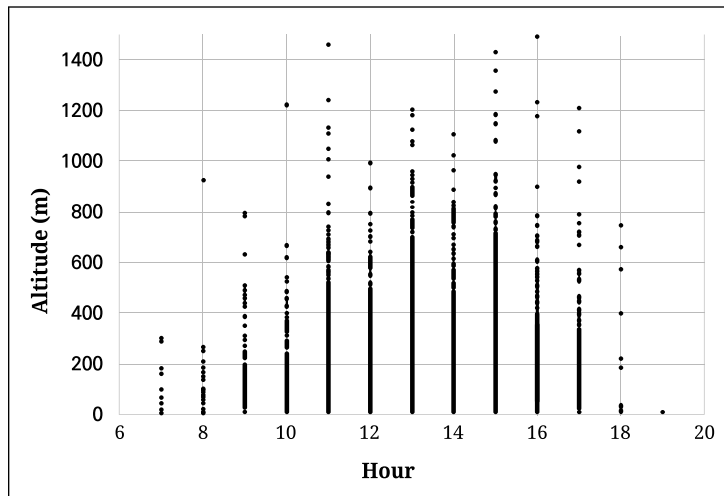


그림33. Scattering of the flight altitudes above ground level of cinereous vultures during the day.

Spatiotemporal niche separation among passeriformes in the Halla mountain wetland of Jeju, Republic of Korea: insights from camera trap data

Young-Hun Jeong^{1*}, Sung-Hwan Choi¹, Maniram Banjade², Seon-Deok Jin², Seon-Mi Park¹, Binod Kunwar¹, Hong-Shik Oh^{1*}

¹Jeju National University, ²National Institute of Ecology

animals (2024)

[중요 키워드]

행동 생태학 (Behavior ecology)

경쟁 (Competition)

군집 구조 (Community structures)

카메라 트랩 (Camera trap)

서식지 구조 (Habitat structure)

1) 논문 목적

- 연작류 조류 집단에서 공간적 및 시간적 분리가 종간 경쟁을 줄이고 공존을 촉진하는 메커니즘 조사
- 다양한 서식지와 계절적 변화를 고려하여 조류 종들이 먹이 자원을 어떻게 차별적으로 이용하는지를 규명
- 생태적 지위 분리가 조류 군집의 안정성과 종다양성 유지에 기여하는 역할을 분석

2) 중요 연구 결과

- 연작류 조류들은 같은 서식지 내에서도 시간대별 활동 패턴을 달리하여 자원 경쟁을 효과적으로 완화함
- 일부 종은 먹이 획득 위치나 층위를 달리 사용함으로써 공간적 분리를 통해 공존을 가능하게 함
- 공간적·시간적 지위 분리가 조류 군집 내에서 생태적 다양성을 유지하는 핵심 요인으로 작용함이 확인됨

3) 중요 시사점

- 서식지 내 자원 경쟁 상황에서 공간적·시간적 분리가 종 다양성 유지와 생태계 안정성에 중요한 역할을 한다는 것을 시사

- 기후변화나 서식지 교란으로 인해 시간적·공간적 자원 이용 패턴이 변할 경우, 조류 군집 구조와 종다양성에 큰 영향을 줄 수 있음을 보여줌
- 조류 보전 및 생태계 관리 전략 수립 시, 종 간 경쟁 완화 메커니즘 고려가 필요

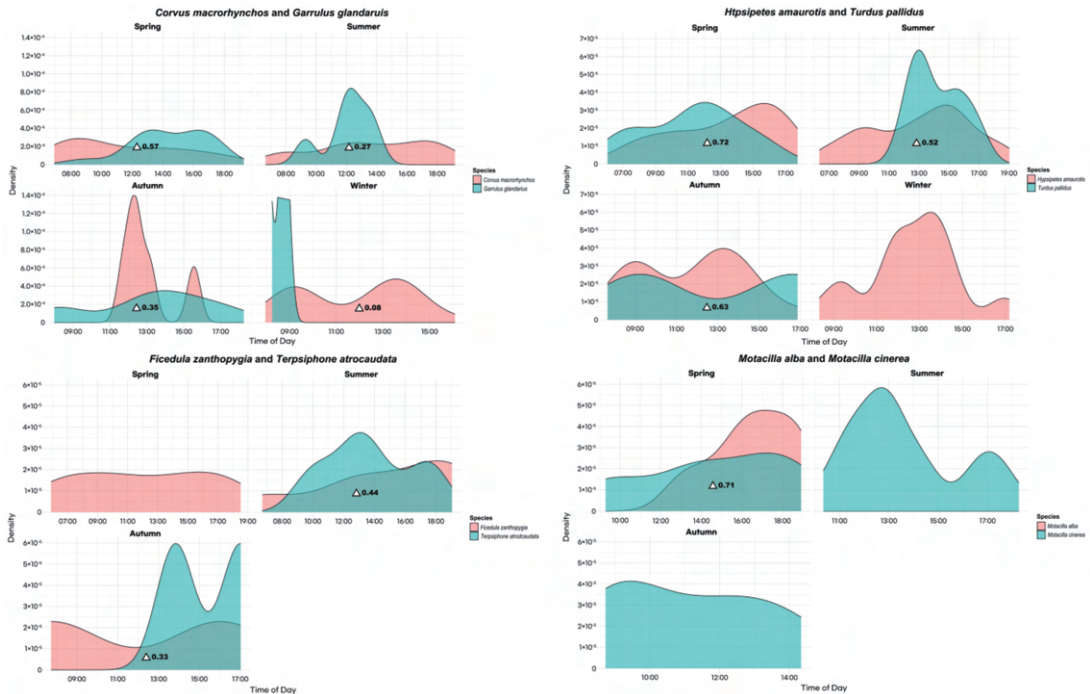


그림34. Seasonal activity patterns and temporal overlap among Passeriformes captured through camera trapping across the entire study sites (Δ indicates overlap coefficients).

5. 저서형 대형무척추동물 동태 변화 연구

점봉산 산지 수계의 저서성 대형무척추동물 분포 특성 및 강우 가 군집에 미치는 영향 연구

권혁영¹, 권순직², 손세환³, 이영상⁴, 주성배⁴, 박정수⁴, 김재훈⁵, 전영철^{6*}

¹에코빅스, ²(주)에일, ³에스에이치 수생물 연구소, ⁴국립생태원, ⁵국립안동대학교, ⁶(주)생태자원연구소

한국습지학회지 (2024)

[중요 키워드]

저서성 대형무척추동물 (Benthic Macroinvertebrates)

점봉산 (Mt. Jeombongsan)

장기생태연구 (Long-term ecological research)

강수량 (Precipitation)

1) 논문 목적

- 점봉산 장기생태연구 대상지의 결과를 기반으로 저서성 대형무척추동물의 분포 현황에 대한 객관적 생태 연구
- 산지 수계의 계류와 정수역의 습지를 구분하여 저서성 대형무척추동물의 전반적인 분포 특성 비교
- 누적 강수량과 점봉산 수계의 저서성 대형무척추동물 다양성 간의 관계 및 강우가 군집에 미치는 영향 이해

2) 중요 연구 결과

- 산간계류에서는 조사일 기준 약 20일 이전부터의 누적 강수량이 저서성 대형무척추동물 종수에 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되나, 산지습지는 강수량과의 상관성을 보이지 않음
- 계류 지점(산지습지 유입전 St.1, 산지습지 유출 후 St.3)은 청정한 계류의 지표생물 군인 EPT 분류군(하루살이목, 강도래목, 날도래목)의 출현 빈도와 밀도가 높고, 산지습지 내부지점(St.2)은 잠자리목의 구성비가 높아 전형적인 정수 환경의 출현 양상을 보임
- 산간계류에서 주워먹는무리(CG)와 달리 잡아먹는무리(Pe)와 썰어먹는무리(Sh) 등 일부 섭식기능군의 종수는 누적 강수량과 유의미한 음의 상관관계를 보여 강수에 의해 쉽게 유실될 수 있음을 시사함

3) 중요 시사점

- 향후 산지 수계의 환경 변화 관찰 측면에서 장기적인 생물 모니터링 계획 수립에 기여
- 생태계 변화 관찰을 위한 지표 종을 선정하는 데 활용될 수 있는 기초 자료 제공

- 산지 수계의 저서성 대형무척추동물 군집은 누적 강수일수보다 누적 강수량에 더 직접적인 영향을 받으며, 그 영향은 유수 환경인 계류에서 더 뚜렷함을 규명

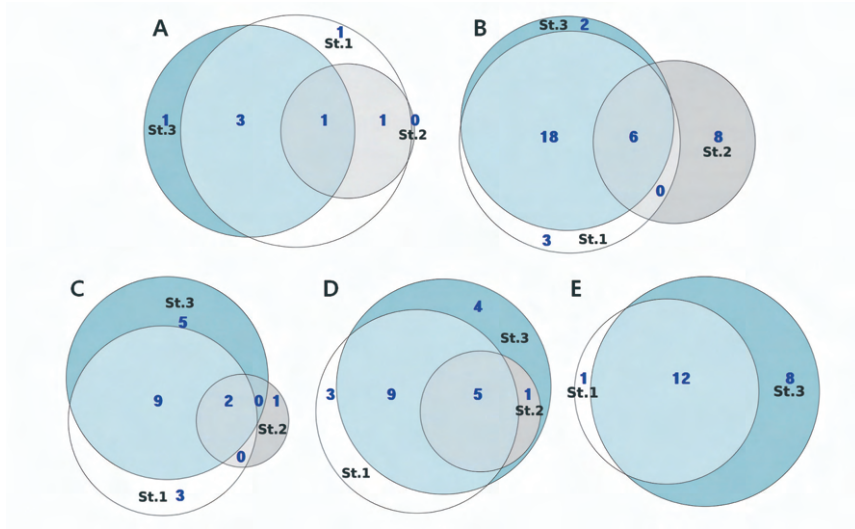


그림35. Comparison of species number among surveyed sites according to functional feeding group (A, CF 걸러먹는무리; B, Pe 잡아먹는무리; C, CG 주워먹는무리; D, Sh 찢어먹는무리; E, SC 굵어먹는무리; Blue letters, the numbers of species).

II

곤충 연구 분야

온대 낙엽수림에서 초식곤충의 계절과 고도에 따른 먹이활동 양상 연구

김남희, 최세웅*

목포대학교

생태와환경 (2014)

[중요 키워드]

초식 곤충 (Herbivore)

계절 (Season)

고도 (Elevation)

낙엽수림 (Deciduous forest)

삼자영양단계 상호작용 (tri-trophic interaction)

1) 논문 목적

- 고도와 계절에 따라 초식곤충의 먹이활동 양상이 어떻게 변하는지를 조사하여, 생태계 내 시공간적 상호작용을 파악
- 식물-곤충-조류 간의 삼자영양단계 상호작용(tri-trophic interaction) 분석 및 생태적 의미 이해
- 기후변화에 따라 먹이망 구조와 생물상 변화가 어떻게 나타날 수 있는지를 예측하기 위한 기초자료 제공

2) 중요 연구 결과

- 초식활동은 고도가 낮은 지역에서 먼저 시작되며, 고도가 높을수록 시작 시점이 지연되었고, 가장 높은 노고단에서는 짧은 기간 동안 식혼이 급속히 증가하는 경향을 보였음
- 중간고도(약 900m)인 시암재 지역에서 초식곤충의 활동량(식혼량)이 가장 높게 나타났으며, 이는 곤충 다양성 및 식물 구성, 기후 조건 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석됨
- 초식곤충의 활동 시기와 곤줄박이(박새류)의 첫 산란일이 거의 일치, 식물-곤충-조류 사이의 계절적 타이밍이 밀접하게 맞물려 있음을 확인함

3) 중요 시사점

- 초식곤충의 섭식 시기 변화는 조류 번식 시기에도 직접적인 영향을 줄 수 있어, 먹이망 전체의 동시성(synchrony) 변화 가능성에 대한 위험이 있어 지속적 모니터링이 필요
- 고도에 따른 식물 개엽 시기 및 초식활동의 차이는 기온과 밀접하게 연결되어 있으며, 지구온난화로 인해 이 타이밍이 조정될 가능성이 큼

- 장기적이고 반복적인 생태 모니터링을 통해 기후변화가 생물 간 상호작용과 생태계 구조에 미치는 영향을 조기에 감지할 수 있으므로 이에 대한 정책적, 과학적 준비 필요

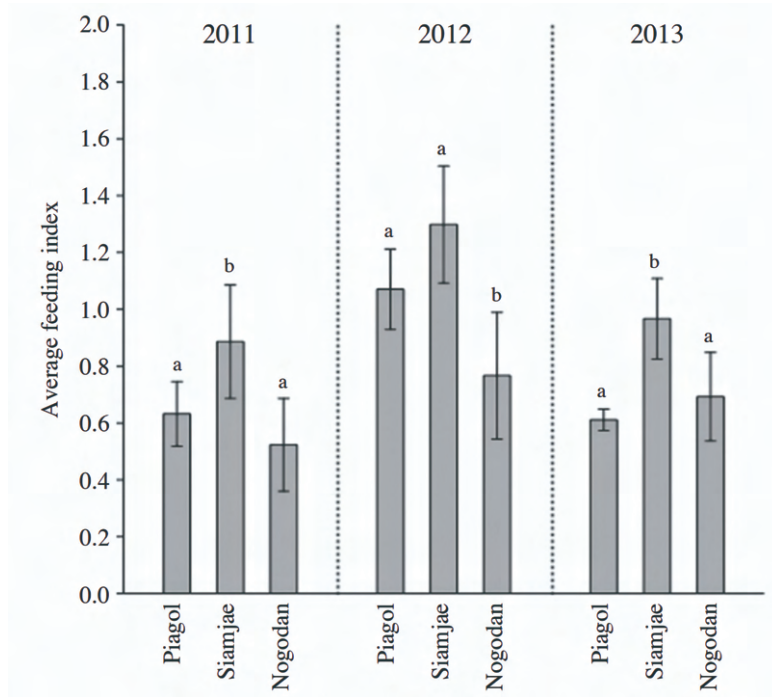


그림36. Difference of average feeding index (\pm standard error) of oak trees (*Quercus serrata*, *Quercus mongolica*) at three survey sites of Mt. Jirisan from 2011 to 2013. Different alphabets indicate statistically different value at $P < 0.05$ (Kruskal-Wallis test).

온대 낙엽수림에 서식하는 나비목 애벌레 다양성에 관한 연구

최세웅*, 김남희

목포대학교

한국응용곤충학회지 (2014)

[중요 키워드]

온대 (Temperate)

숲 (Forest)

기주식물 (Food plant)

나비와 나방 (Lepidoptera)

애벌레 (Caterpillar)

다양성 (Diversity)

1) 논문 목적

- 지리산 온대림의 나비목 애벌레 종 다양성과 기주식물 간의 상호작용을 파악
- 온대 낙엽수림에서 나비목 애벌레의 다양성을 체계적으로 조사하여 지역 생물다양성의 기초자료를 구축
- 종 다양성 추정치를 활용해 온대 낙엽수림 내 나비목 애벌레의 잠재적 다양성을 예측

2) 중요 연구 결과

- 0.1ha 방형구에서 70종 159개체의 나비목 애벌레가 채집되었고, 기주식물로는 14과 16종 141개체가 기록됨
- 참나무에서 가장 많은 애벌레(25종 36개체)가 채집되었고, 종 다양성과 균등도가 가장 높게 나타남
- 예측된 기대종수(Chao1)는 128종으로 조사된 70종은 전체의 약 55%에 불과하여, 실제 종 다양성은 더 높을 가능성이 있음

3) 중요 시사점

- 온대림에서도 식물 다양성과 곤충 다양성 간의 강한 상관관계를 확인할 수 있어, 산림 생태계 관리에 중요한 기초자료
- 참나무류는 다양한 초식곤충에게 주요 서식 및 섭식 자원으로 기능하며, 생물 다양성 차원에서 보전 및 관리 시 우선 고려해야 할 식물군
- 수관부 미포함, 짧은 조사 기간 등으로 인해 실제 다양성의 과소평가 가능성이 있으며, 향후 고도별 비교 및 장기적 조사가 필요

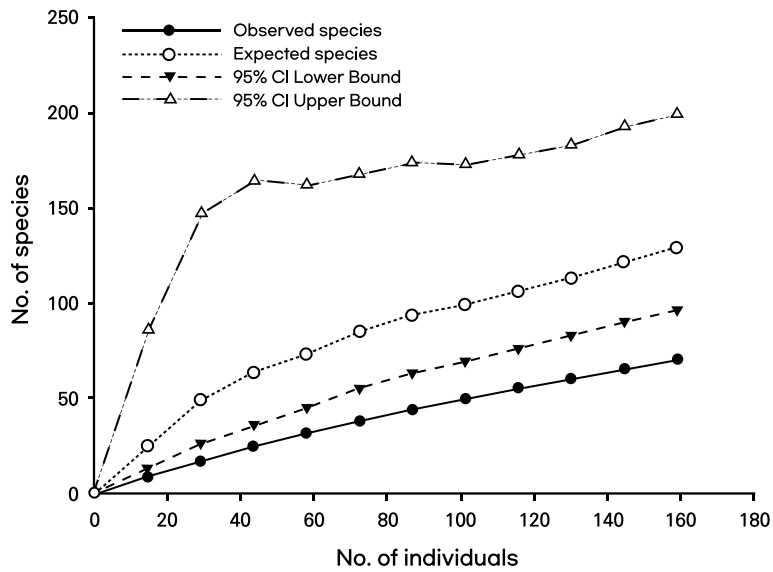


그림37. Species accumulation curve for the observed and expected caterpillar species that feed on 16 plant species in a 0.1 ha plot of Mt. Jirisan National Park, South Korea.

Bottom-up impact of soils on the network of soil, plants, and moths (Lepidoptera) in a South Korean temperate forest

Sei-Woong Choi*

Mokpo National University

The Canadian Entomologist (2015)

[중요 키워드]

상향식 영향 (Bottom-up effect)

토양 특성 (Soil properties)

나비목 (Lepidoptera)

온대림 (Temperate forest)

종다양성 (Species diversity)

토양비옥도 (Soil fertility)

1) 논문 목적

- 온대 산림 생태계에서 토양의 물리·화학적 특성이 식물 및 나방 군집에 미치는 영향을 평가
- 토양-식물-나방 간의 상호작용 네트워크를 규명하고, 이들이 하향식(top-down)이 아닌 상향식(bottom-up) 방식으로 연결되어 있음을 검증
- 세 지역(지리산, 한라산, 승달산)의 군집 자료와 토양 데이터를 비교 분석하여 지역적 요인과 토양 비옥도가 생물다양성에 미치는 영향을 확인

2) 중요 연구 결과

- 나방 종 풍부도는 나무의 기초면적과 수종 풍부도에 의해, 나방 개체수는 식물 다양성 지수(H')에 의해 유의하게 설명됨
- NMDS 분석 결과, 유기물(OM), 총 질소(TN), 인산염(P_2O_5), 양이온교환능력(CEC) 등 토양 비옥도 관련 인자가 식물과 나방 군집 구성에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 나타남
- 비록 한라산은 높은 토양 비옥도와 식물 생산성을 갖지만, 섬이라는 지리적 고립성과 제한된 생물 군집 이입으로 인해 나방의 종다양성은 본토 지역보다 낮음

3) 중요 시사점

- 토양의 비옥도는 식물과 초식성 곤충 다양성을 결정짓는 주요한 상향식(Bottom-up) 생태계 조절 요인임을 실증

- 고립된 섬 생태계는 비옥한 토양 조건에도 불구하고 외부 유입의 제약으로 인해 생물 다양성이 제한될 가능성 제시
- 생태계 다양성을 이해하고 보존하기 위해서는 토양-식물-곤충 간 다층적 상호작용을 포괄하는 통합적 접근이 필요

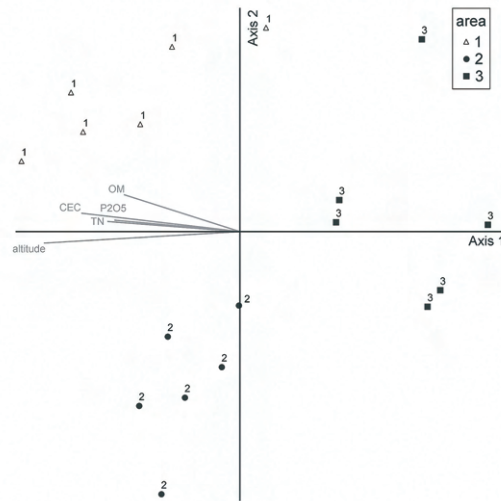


그림38. Nonmetric multidimensional scaling ordination joint plot for 320 moth species across 18 sites and 24 variables of southern South Korea. Cutoff $r^2 = 0.500$. 1. JJ, Mount Hallasan; 2. JR, Mount Jirisan; 3. MN, Mount Seungdalsan.

***Saturnia jonasii* Butler, 1877 on Jeju Island, a new saturniid moth of South Korea with DNA data and morphology (Lepidoptera: Saturniidae)**

Min Jee Kim¹, Sung-Soo Kim², Sei-Woong Choi³, Iksoo Kim^{1*}

¹Chonnam National University, ²Research Institute for East Asian Environment and Biology, ³Mokpo National University

ZOOTAXA (2015)

[중요 키워드]

분류학 (Taxonomy)

DNA 바코드 (DNA barcode)

버드나무산누에나방 (*Saturnia boisduvalii*)

한라산누에나방 (*Saturnia jonasii*)

산누에나방과 (Saturniidae)

제주도 (Jeju Island)

1) 논문 목적

- 제주도 한라산에서 채집된 대형 나방 표본의 종 정체성을 형태학적 및 분자유전학적으로 규명
- 기존 한국에 기록되지 않은 한라산누에나방(*Saturnia jonasii*)의 존재 여부를 검토
- 한라산누에나방(*Saturnia jonasii*)과 버드나무산누에나방(*Saturnia boisduvalii*) 간의 유전적 차이를 DNA 바코드 및 EF-1 α 염기서열 분석을 통해 비교

2) 중요 연구 결과

- 한라산에서 채집된 표본은 기존에 알려졌던 버드나무산누에나방이 아니라 한라산누에나방임이 형태학적 특성과 유전자 염기서열 분석을 통해 확인됨
- DNA 바코드 분석 결과, 제주도 한라산누에나방과 버드나무산누에나방 간 최소 염기서열 차이는 4.26%로 명확히 구분됨
- EF-1 α 유전자 분석에서도 두 종은 유의미한 차이를 보였으며, 계통학적 분석 결과 한라산누에나방이 독립된 계통군으로 나타남

3) 중요 시사점

- 본 연구는 한라산누에나방이 한국에 최초로 공식 기록되었음을 의미하며, 한국 나방 다양성 목록을 중요하게 보완함
- DNA 기반 종 동정의 중요성을 강조하며, 형태 유사종 간의 정확한 분류에 있어 분자

생물학적 접근의 필요성을 제시

- 제주도의 지리적 고립성이 독립적인 종 분화를 촉진할 수 있음을 시사하며, 생물지리학적 연구의 가치가 큼

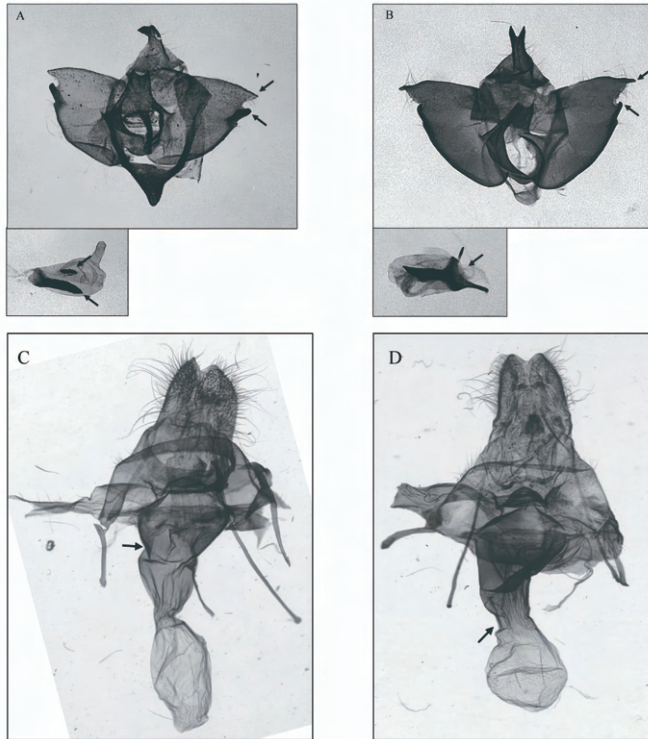


그림39. Male and female genitalia of A and C: *Saturnia jonasii* female (Mt. Hallasan, Jeju Province, South Korea) and B and D: *Saturnia boisduvalii*. (Jochimryung, Inje, Gwangwondo Province, South Korea and Mt. Jirisan, Jeollabukdo Province, South Korea).

Patterns of an elevational gradient affecting moths across the South Korean mountains: effects of geometric constraints, plants, and climate

Sei-Woong Cho*

Mokpo National University

BIODIVERSITY IN ASIA (2016)

[중요 키워드]

기후변화 (Climate change)

분포 (Distribution)

산 (Mountain)

종풍부도 (Species richness)

단봉형 (Unimodal)

나방 (Moth)

1) 논문 목적

- 한국 산악지대에서 세 나방 과(Family)의 고도별 종 다양성 패턴을 규명
- 나방 다양성에 영향을 미치는 식물 종 다양성, 온도 등의 환경 요인을 분석하여 중도영역효과(MDE)의 설명력을 검토
- 기후변화에 따른 생물종의 고도 이동 가능성을 예측하고자 종 풍부도 정점의 고도 위치 변화를 분석

2) 중요 연구 결과

- 네 개의 고도구배 지역 모두에서 나방 종 다양성은 중고도(800-900m)에서 최고치를 보이며, 이는 중도영역효과 예측과 일치함
- 식물 종 풍부도와 1월 평균기온이 전체 나방 종 풍부도 및 개체수에 유의한 영향을 미치는 변수로 나타남
- 나방 과별 다양성 패턴은 상이했으며, 태극나방과(Erebidae)는 저지대에, 자나방과(Geometridae)는 고지대에 상대적으로 더 많이 분포함

3) 중요 시사점

- 한국 산악지대의 나방 다양성은 중도영역효과와 기후, 식생 등 복합적인 요인에 의해 형성되며, 기하학적 모델만으로는 설명 불충분
- 식물-곤충 간 상관관계는 강하게 나타나며, 식물다양성 보전은 곤충다양성 유지를 위한 핵심 전략 가능성 제시

- 한국의 연평균 기온 상승은 나방을 포함한 산림 생물종의 고도상 이동을 야기할 가능성이 높으며, 이에 따른 장기적 생물 다양성 변화 모니터링이 필요

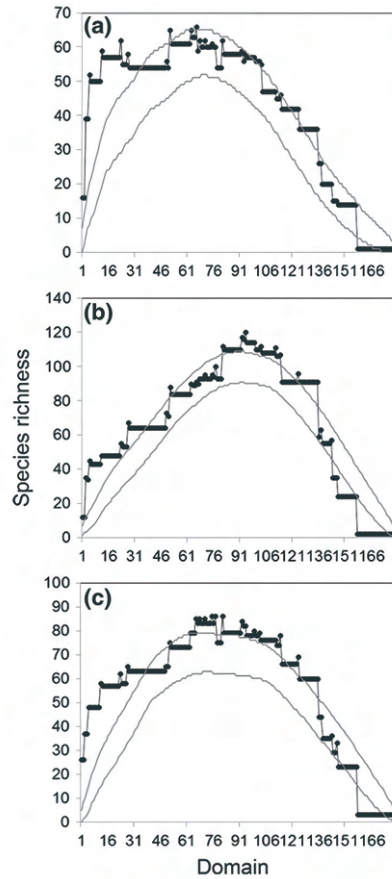


그림40. species richness curves (lines with data points) of three moth families [a Erebidae, b Geometridae and c Noctuidae] and the 95 % prediction curves sample without replacement from program Mid-Domain Null (50,000 simulations each). Alpha analysis was conducted using empirical range sizes and simulated range midpoints.

Forest insect assemblages attracted to light trap on two high mountains (Mt. Jirisan and Mt. Hallasan) in South Korea

Pyae Pyae Thein, Sei-Woong Choi*

Mokpo National University

Journal of Forestry Research (2016)

[중요 키워드]

섬 (Island)

Mainland

종풍부도 (Species richness)

풍부도 (Abundance)

야행성 곤충 (Nocturnal insects)

1) 논문 목적

- 한라산과 지리산의 고산지역에서 자외선 유인등을 활용하여 산림 곤충 군집의 다양성과 분포 비교
- 고도 및 산림 유형에 따른 야행성 곤충의 종 풍부도, 개체수 및 생물량 변화를 분석
- 섬(한라산)과 내륙(지리산) 간 생물다양성 차이를 통해 섬 효과(island effect)와 고도 구배가 생태계에 미치는 영향을 평가

2) 중요 연구 결과

- 지리산에서는 769종 7080개체, 한라산에서는 481종 2960개체가 포획되어 종수와 개체수가 내륙 지역에서 더 높았음
- 한라산의 베타다양성(4.95)이 지리산(4.33)보다 높아, 섬 특성에 따른 서식지 간 이질성이 더 큼을 보여주었음
- 고도에 따라 곤충 군집이 뚜렷하게 구분되었으며, 식생 유형(침엽수/활엽수)과 함께 고도가 주요 영향을 미치는 요인으로 나타남

3) 중요 시사점

- 섬 생태계(한라산)는 내륙보다 더 높은 서식지 차이(b-diversity)를 보여 생물 보존 전략에 있어 지리적 고립의 영향을 고려해야 함
- 자외선 유인등은 야행성 곤충의 군집 분석에 유효한 도구이며, 산림 생물다양성 모니터링에 유용하게 활용 가능
- 고도 및 식생 변화에 따른 곤충 군집 구조는 기후변화에 의한 생물 종 이동 예측 및 고산 생태계 보존에 기초자료 제공

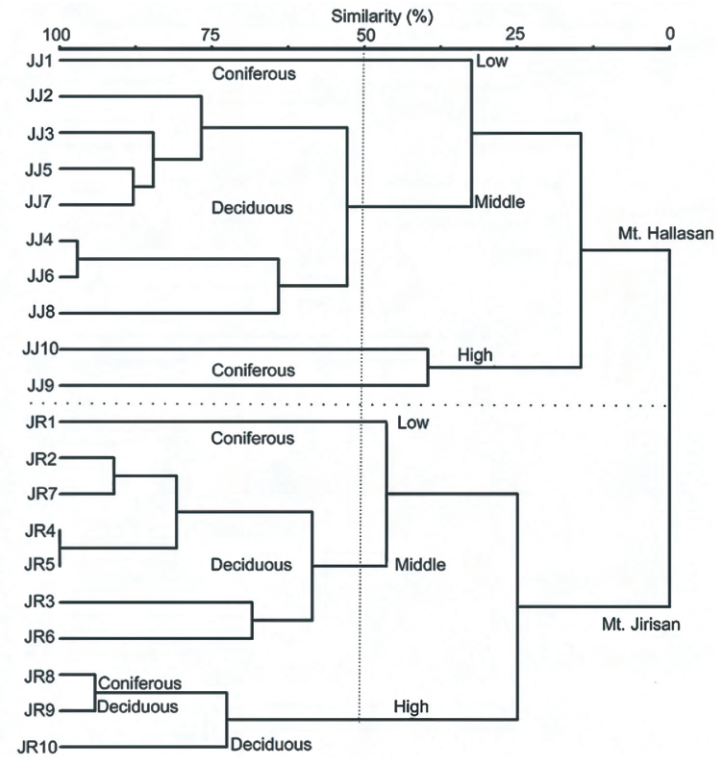


그림41. Dendrogram of insect assemblages on Mt. Hallasan and Mt. Jirisan in South Korea based on Sørensen similarity indices. Each site, the elevational ranges (Low:Middle: High) and dominant forest types (coniferous and deciduous) are shown. Vertical dotted line divides all sites at the 50 % similarity break; the horizontal dotted line divides the two mountain areas.

지리산국립공원의 대형나방 다양성 목록

안정섭¹, 정종철², 최세웅^{3*}

¹국립생태원, ²국립공원관리공단, ³목포대학교

국립공원연구지 (2016)

[중요 키워드]

지리산국립공원 (Jirisan national park)

나비목 (Lepidoptera)

나방 (Moth)

다양성 (Diversity)

종목록 (Inventory)

1) 논문 목적

- 지리산국립공원에 서식하는 대형나방의 종 목록을 구축하여 생물다양성의 현황을 파악
- 기존 문헌 기록과 야간 유인등 채집을 통해 채집된 종들을 비교하여 종 추가 및 누락 여부를 확인
- 다양한 고도 및 서식지 조건을 반영하여 지리산 내 곤충 다양성 유지 원인을 분석

2) 중요 연구 결과

- 지리산에서 총 1,373종의 대형나방이 기록되었으며 이는 국내 기록종의 약 72%에 해당함
- 야간 유인등 조사를 통해 7년간 1,020종이 새롭게 채집되었고, 그중 356종은 과거 문헌에 없던 신규 기록임
- 자나방상과와 밤나방상과가 전체 종의 약 87%를 차지해 가장 우점하였으며, 서식지 별로 특정 종의 출현 특성이 뚜렷함

3) 중요 시사점

- 지리산은 높은 고도와 넓은 면적, 보호지역으로서의 법적 지위 등을 통해 높은 생물 다양성을 유지하는 대표적인 산림 생태계
- 종목록 구축은 보전정책 수립과 생물종 모니터링 기반 구축에 필수적이며, 지속적이고 정량적인 조사가 중요
- 일부 종은 과거 기록만 있고 최근에는 채집되지 않아 서식지 변화, 기후 영향 또는 채집 방법의 한계 존재

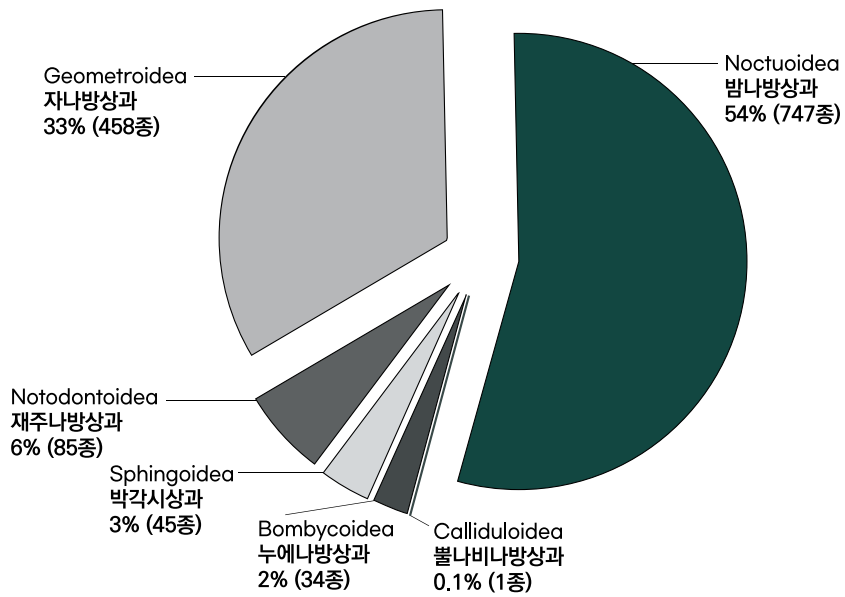


그림42. Composition of larger moths at six superfamily in Mt.Jirisan national park.

Elevational species richness gradients in a hyperdiverse insect taxon: a global meta-study on geometrid moths

Jan Beck^{1*} 외

¹University of Colorado 외

Global Ecology and Biogeography (2017)

[중요 키워드]

고도 (Altitude)

다양성 (diversity)

나비목 (Lepidoptera)

생산성 (productivity)

종-면적 관계 (species-area relationship)

기온 (temperature)

1) 논문 목적

- 전 세계 26개 지역의 고도 따른 자나방(Gemoetrid)의 종 다양성 패턴 차이를 밝힘
- 생산성, 기온, 강수량, 면적, 인간의 교란 등 다양한 환경 및 공간 요인이 고도별 다양성에 미치는 영향을 검증
- 단변량 분석과 다변량 모델링을 통해 일반화 가능한 다양성 패턴의 원인 규명

2) 중요 연구 결과

- 중간고도에서 종다양성이 최고치를 보이는 ‘중간고도 피크’ 패턴이 나타남
- 단변량 및 다변량 분석 모두에서 면적에 따른 생산성(area-integrated productivity, SNPP)이 가장 강력한 다양성 예측 변수로 나타나며, 면적과 중간영역효과는 보조적 역할을 함
- 강수량 및 습도는 대부분의 고도대에서 종다양성과 거의 상관관계가 없고, 온도는 약한 영향을 줌

3) 중요 시사점

- Geometrid 나방의 고도대별 다양성은 온도보다 총 생태계 생산성과 관련된 자원 이용 가능성과 지역의 면적 등이 더 중요한 설명 요인
- 중간고도 피크 패턴은 단일 요인보다는 복합적인 생태적 요인의 상호작용에 의해 형성되며, 이를 위한 다수 고도대 기반의 연구가 필수적
- 본 연구는 무척추동물 군집의 고도대별 다양성 패턴 이해를 도우며 기후 변화에 따른

생물다양성 예측에도 중요한 통찰을 제공

- 단일 요인으로는 설명되지 않는 복합적 요인들의 상호작용이 존재하며, 다양한 곤충 분류군을 대상으로 한 추가적인 비교 연구가 필요

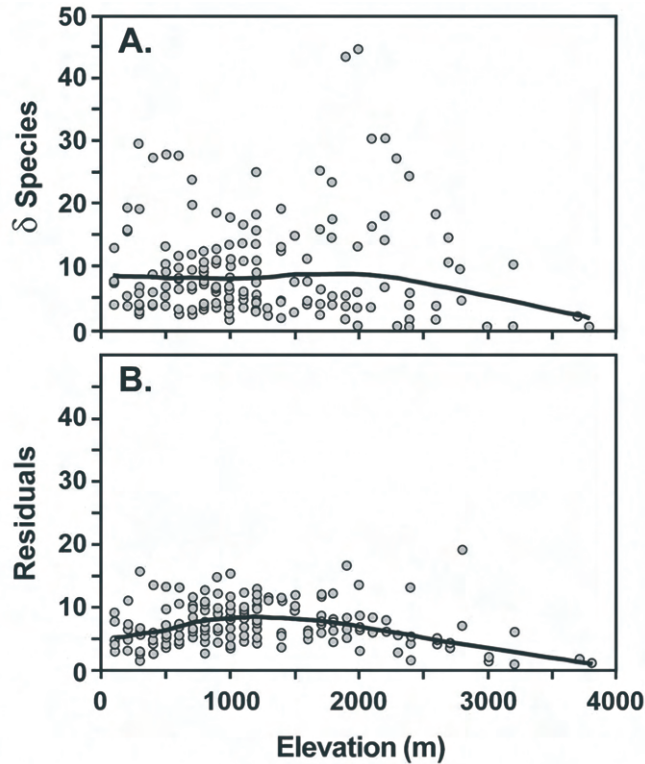


그림43. (a) Elevational pattern of species richness (S_{int} , all analysis-grade gradients pooled and adjusted to the same average richness; δ Species). Note that both y-axes have linear scaling, while log-transformed and standardized data were used for modelling. (b) Elevational pattern of residuals from the 'best' model (lowest AICc, pseudo- $R^2=0.40$). LOESS fits (black lines) are shown to visualize overall patterns in the data. See main text for linear and quadratic fits. Similar patterns were recovered when using the 'best subset' data alone (not shown).

Distribution breadth and species turnover of night-flying beetles and moths on different mainland and island mountains

Sei-Woong Choi*, Pyae Pyae Thein

Mokpo National University

Ecological Research (2017)

[중요 키워드]

분포범위 (Distribution range)

종교체 (Turnover rate)

고도 (Elevation)

딱정벌레목 (Coleoptera)

나비목 (Lepidoptera)

1) 논문 목적

- 한국의 제주 한라산(섬)과 지리산(대륙)을 비교하여 야행성 나방과 딱정벌레의 종 분포와 다양성 패턴을 밝힘
- 해발고도와 지리적 요인에 따라 나타나는 분포 범위와 종 교체 차이를 규명
- 기후, 토양, 식물 다양성 등 생태적 요인이 곤충 군집 구조에 미치는 영향을 분석

2) 중요 연구 결과

- 한라산곤충(딱정벌레목, 나비목)들의 분포 범위는 지리산보다 좁았고, 종 회전율은 더 높게 나타남
- 나방은 지리산에서 더 풍부하고 다양하나, 딱정벌레는 두 산에서 유사한 수준을 보임
- 나방 다양성은 위도와 위치가, 딱정벌레 풍부도는 토양 유기물과 식물 종 풍부도가 주요한 영향을 줌
- 비행능력이 뛰어난 종은 더 넓은 고도 범위를 점유하며, 몸집이 클수록 분포가 제한됨
- 고도가 높아질수록 종 교체가 증가하고, 딱정벌레가 나방보다 종 교체가 커서 지역적으로 더 고립됨을 확인함

3) 중요 시사점

- 섬 생태계에서는 지리적 격리로 인해 곤충 분포 범위가 좁고 종 교체가 높아, 보전 관리 시 지역적 특수성을 고려해야 함
- 나방과 딱정벌레는 분산 능력과 생태적 요인에 따라 다른 다양성 패턴을 보이므로, 곤충 군집 연구에 종별 특성을 반영해야 함

- 토양-식물-곤충 간 상호작용이 종 다양성과 군집 구조에 중요한 역할을 하며, 기후 변화와 서식지 관리의 핵심 고려 요소
- 고도에 따른 종의 분포 및 교체 패턴은 곤충의 비행 능력과 생리적 특성(몸 크기)에 크게 영향을 받기 때문에 이동력이 낮은 종은 고산 생태계의 기후 변화나 서식지 단절에 더 취약할 수 있음

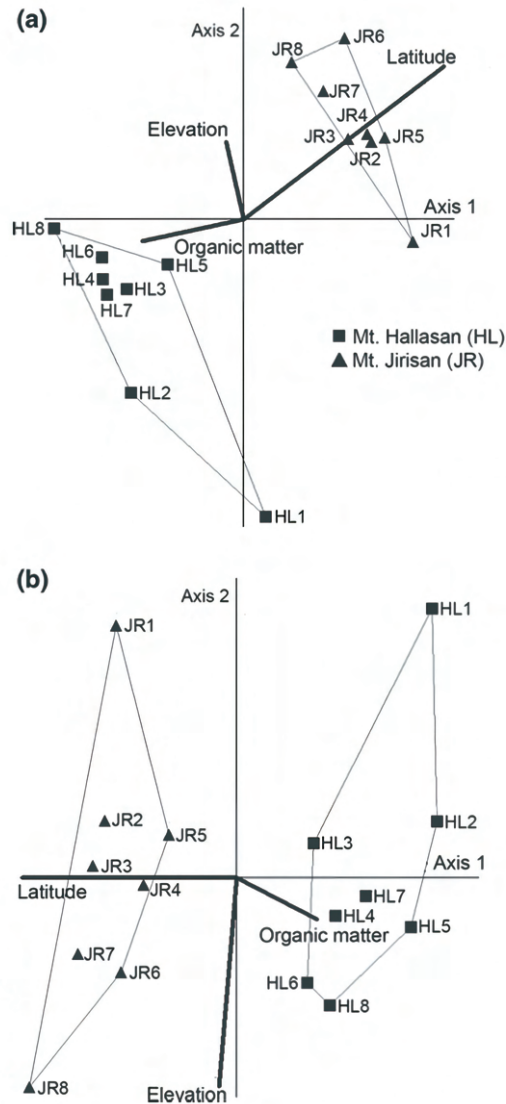


그림44. Nonmetric multidimensional scaling (NMS) ordination using (a) 331 moth species (135° rotated) and (b) 108 beetle species (-30° rotated) across 16 sites after deleting the species that occurring at less than three sites.

A high mountain moth assemblage quickly recovers after fire

Sei-Woong Choi*

Mokpo National University

Annals of the Entomological Society of America (2018)

[중요 키워드]

산불 (fire)
천이 (succession)
초식동물 (herbivore)
나방 (moth)
식물 (plant)

1) 논문 목적

- 고산 지역에서 발생한 나방 애벌레 대발생이 나방 군집 구조에 미치는 영향을 규명
- 대발생 이후 나방 군집의 회복 속도와 회복 메커니즘을 평가
- 장기적 관찰을 통해 군집 안정성과 기후 변화에 대한 민감성을 이해

2) 중요 연구 결과

- 애벌레 대발생 직후 나방 개체군 수와 종 다양성은 급격히 감소함
- 그러나 불과 2~3년 내에 나방 군집은 빠르게 회복하여 대발생 이전 수준에 도달함
- 특정 우점종의 일시적 감소에도 불구하고 전체 군집의 구조적 안정성은 유지됨

3) 중요 시사점

- 고산 나방 군집은 대발생과 같은 교란 이후에도 빠른 회복력을 보이며 특히 나방과 같이 이동성이 높은 분류군의 경우 산불과 같은 교란에 대한 회복력 높음
- 나방 군집의 빠른 회복은 산불 지역에서 나방 애벌레의 먹이 식물인 하층 식생의 빠른 복구와 관련성 있음
- 기후 변화와 교란 증가 상황에서 고산생태계가 자연적 교란에 대해 생각보다 높은 회복성을 갖고 있으며, 특히 빠른 회복을 보이는 곤충 군집은 전반적인 생태계 회복력의 중요한 지표종이 될 가능성 제시

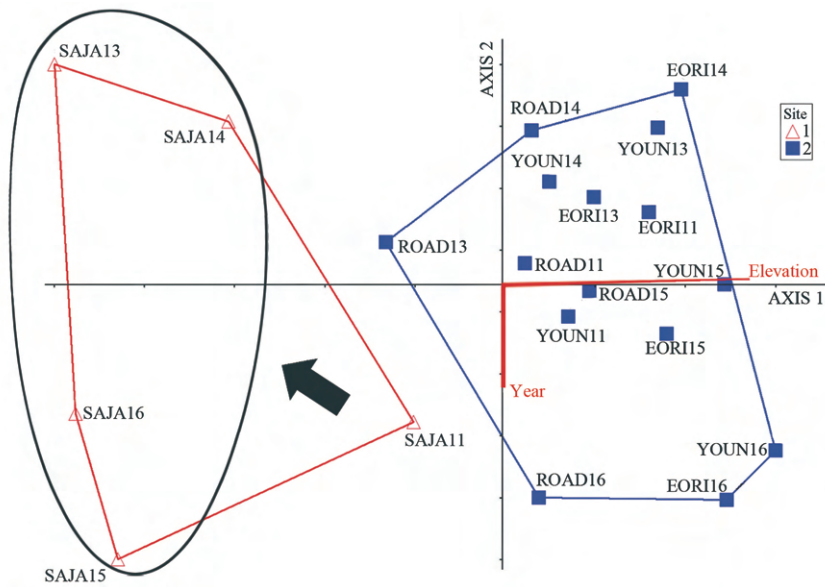


그림45. NMDS ordination plot with a matrix of 20 sites and 198 species after excluding species occurring at less than two sites and a second matrix with three variables (fire, yearly change and elevation) (final stress = 9.90662 after 103 iterations). One burned site (SAJA) and three neighboring sites (ROAD, EORI, YOUN) on Mt. Hallasan, Jeju-do, South Korea. The number after the site indicates the year.

Long-term (2005–2017) macromoth community monitoring at Mt. Jirisan National Park, South Korea

Sei-Woong Choi^{1*}, Jeong-Seop An², Nang-Hee Kim¹, Sanghun Lee², Nahyun Ahn²

¹Mokpo National University, ²National Institute of Ecology

Ecological Research (2019)

[중요 키워드]

다양성 (diversity)

장기 모니터링 (long-term monitoring)

대형나방류 (macromoths)

지리산 (Mt. Jirisan)

남한 (South Korea)

1) 논문 목적

- 2005년부터 2017년까지 지리산 국립공원에서 대형 나방 군집을 장기 모니터링하여 기초 생태 데이터를 구축
- 표준화된 채집 방법을 통해 산림 생태계의 종다양성과 개체수 변화를 정량적으로 평가
- 수집된 자료를 활용하여 기후 변화와 산림 천이 등 환경 요인이 나방 군집에 미치는 영향을 규명할 수 있는 기반을 마련

2) 중요 연구 결과

- 13년간 조사에서 총 1,089종, 40,694개체의 대형 나방이 기록되어 한국 산림 곤충 다양성의 대표적 데이터셋을 구축함
- 일부 종의 개체 수가 감소하는 경향을 보이며, 이는 기후 변화나 서식지 변화와 같은 환경적 요인에 따른 가능성이 있음
- 본 데이터는 지역 및 전 지구적 규모의 곤충 다양성 변화 연구와 환경 영향 평가에 활용 가능한 기준선 자료로 제시됨

3) 중요 시사점

- 대형나방 종은 환경 변화에 민감하여 장기적이고 표준화된 모니터링을 통해 기후 변화나 서식지 교란의 영향을 파악하는데 유용한 생태 지표종으로 활용 가능
- 특정 종 개체의 증감을 파악함으로써 향후 생물다양성 보전 및 관리 전략 수립에 과학적 근거 제공
- 아시아 온대림 곤충 군집의 장기 변화를 탐구하는 국제적 데이터 네트워크 구축에 기여

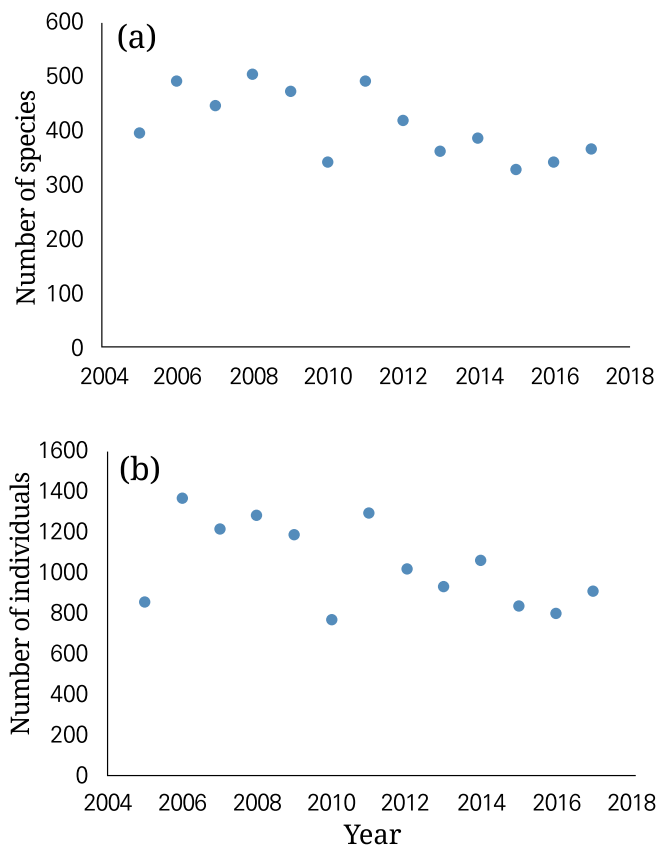


그림46. Annual changes (2005–2017) in total number of species (a) and total number of individuals (b) at all six sites in Mt. Jirisan National Park, South Korea.

2017~2018년 말레이즈 트랩을 이용한 남한 내 야생벌 (벌목: 벌아목)의 시·공간별 출현 및 분포 현황

유동수^{1,2*}, 권오창¹, 김흥기², 김정규^{3*}

¹국립생태원, ²충남대학교, ³용인대학교

한국환경생태학회지 (2019)

[중요 키워드]

야생벌 (Wild Bee)

화분매개 (Pollination)

화분매개곤충 (Pollinator)

야생벌 분포 (Wild Bees' Distribution)

1) 논문 목적

- 기후 변화, 토지 이용, 농약 사용 등의 위협으로 인해 점차 감소하고 있는 야생벌의 분포를 조사하고 분석하여 수분 생태계의 종 다양성 보전과 관리를 위한 기초 자료를 제공
- 2018년까지 전국 51개 조사 지점에서 말레이즈 트랩을 사용하여 야생벌을 시기별, 공간별로 채집하고, 출현 현황을 분석

2) 중요 연구 결과

- 전국적으로 출현하는 야생벌은 정규 분포 형태를 보이며, 특히 7월과 8월 사이에 개체수가 크게 증가하고 11월까지 출현하는 것으로 확인됨
- 야생벌의 출현 분포는 위도에 따라 유의적인 차이가 있으나, 경도에 대해서는 유의미한 차이가 확인되지 않음
- 2년간 총 168종, 2,250개체의 야생벌이 동정되었고, 은주둥이벌과(Crabronidae)가 37종으로 가장 높은 종 다양성을 보임

3) 중요 시사점

- 본 연구는 전국에 서식하는 야생벌의 시기별 및 공간별 분포에 대한 기초 자료 제공
- 향후 농업 발전을 위한 화분매개곤충 연구뿐만 아니라, 더 나아가 수분 생태계에서의 야생벌 종 다양성 보전 및 관리를 위한 기본 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대
- 본 연구 결과는 향후 야생벌 동태에 대한 추가적인 연구의 기준점이 될 수 있음

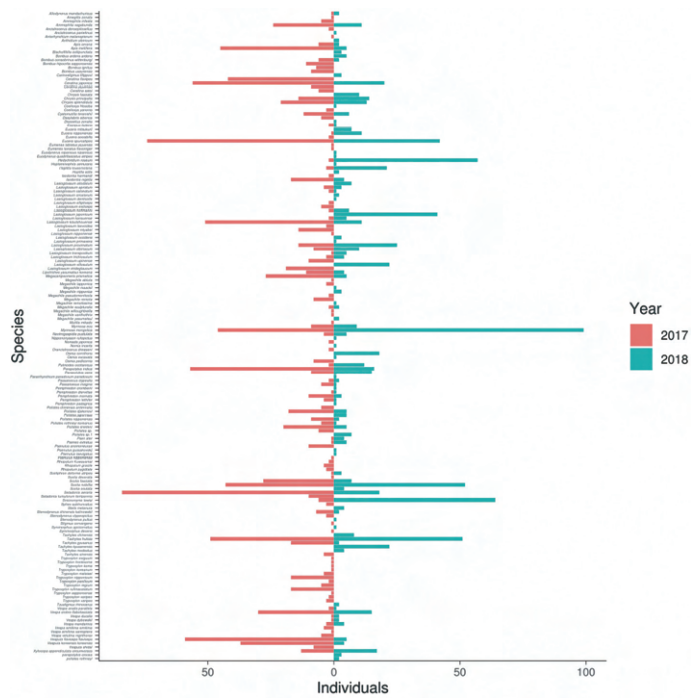


그림47. All wild bees collected using ez-Malaise trap in 2017 and 2018.

고도와 수관부 유무가 제주조릿대 군락과 소비자 군집에 미치는 영향

이 진, 이재영¹, 장범준¹, 정길상, 최세웅^{1*}

국립생태원, ¹목포대학교

Korean Journal of Environmental Biology (2019)

[중요 키워드]

생물다양성 (Biodiversity)

조릿대 (Dwarf Bamboo)

한라산 (Mt. Hallasan)

삼자영양단계 상호작용 (Tri-trophic interaction)

1) 논문 목적

- 제주 한라산에 광범위하게 확산된 제주조릿대 군락이 서식지 고도와 수관부(나무의 잎이 우거진 부분)의 유무에 따라 식물의 생육 특성과 그곳에 서식하는 절지동물(소비자) 군집에 미치는 영향 분석
- 제주조릿대-초식곤충-포식자로 이어지는 삼자영양단계 상호작용의 생태적 기능과 관계를 파악

2) 중요 연구 결과

- 제주조릿대 생육 특성: 해발고도가 증가하고 수관부가 열려 있을수록 제주조릿대의 밀도는 높아지지만, 잎의 크기와 질소 함량은 감소하는 경향을 보였으며, 반대로 탄소 질소비(C/N ratio)는 증가함
- 수관부가 닫힌 지역(HL1, HL2)에서 곤충을 포함한 절지동물의 종 풍부도와 다양성 지수가 상대적으로 높게 나타남
- 제주조릿대의 밀도가 낮고, 잎의 길이가 길고, 질소 함량이 높을수록 초식 곤충의 개체 수가 증가하는 경향을 보임
- 초식 곤충의 개체수가 증가할수록 육식성 포식자(천적)의 개체수도 함께 증가하는 양의 상관관계가 나타남

3) 중요 시사점

- 한라산 제주조릿대의 생육 특성이 고도와 수관부의 영향을 받으며, 이는 다시 그곳에 서식하는 초식 곤충과 포식자 군집에 영향을 미치는 삼자영양단계 상호작용이 밀접하게 연관되어 있음을 밝힘

- 제주조릿대가 확산되면서 식물 종 다양성을 감소시켜 곤충의 분포를 저해할 가능성 제기
- 제주조릿대 벌채 등 인위적인 관리가 곤충 군집에 미치는 영향을 파악하기 위한 추가적 연구 필요

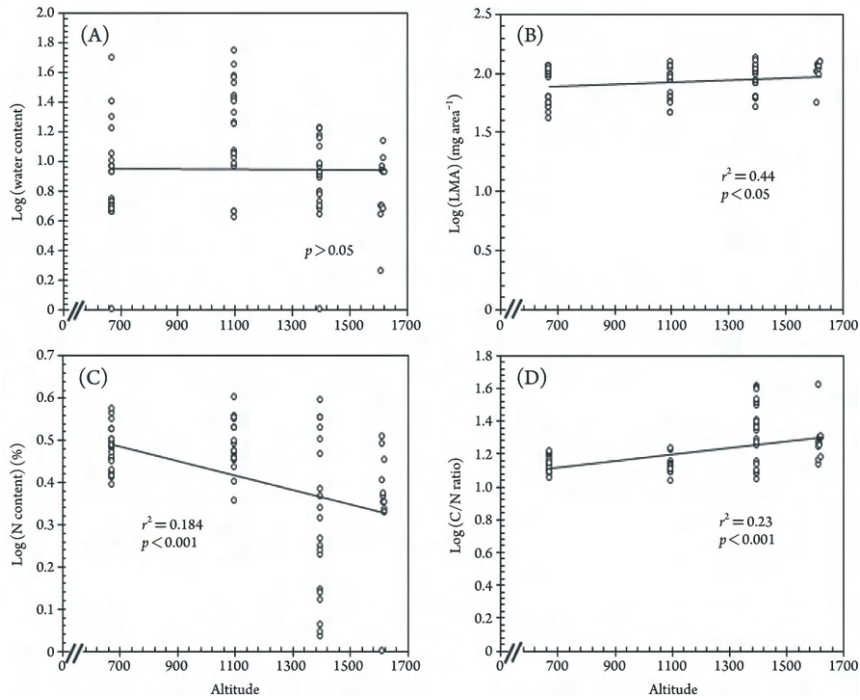


그림48. The ecological traits of dwarf bamboos at four study sites on Mt. Hallasan National Park, Jeju, Korea. (A) Water content, (B) Leaf mass area, (C) Nitrogen content, (D) Carbon/Nitrogen ratio.

Quantitative data from six years (2013-2018) of light trap sampling of macromoths (Lepidoptera) in Mt. Hallasan National Park, South Korea

Sei-Woong Choi*, Sang-Hyeon Na

Mokpo National University

Biodiversity Data Journal (2020)

[중요 키워드]

나방 (Moth)

표준화 채집 (Standardized trapping)

장기 모니터링 (Long-term monitoring)

개체군 변동 (Population dynamics)

종 풍부도 (Species richness)

야행성 곤충 (Nocturnal insects)

1) 논문 목적

- 한라산 국립공원에서 2013~2018년 동안 표준화된 대형 나방 채집 자료를 정량적 제공
- 나방 군집의 시·공간적 변화를 장기적으로 분석
- 기후 및 환경 변화가 나방 개체군과 종 다양성에 미치는 영향을 파악하기 위한 기초 자료를 마련

2) 중요 연구 결과

- 6년간의 표준화된 채집 자료는 한국 나방 군집의 변동성과 다양성을 명확히 보여줌
- 나방 개체수와 종 풍부도는 연도별, 지역별 차이가 나타나고 기후 요인과 밀접한 관련이 있음
- 표준화된 방법론은 장기적 곤충 모니터링 및 환경 변화 탐지에 효과적임

3) 중요 시사점

- 나방 군집은 기후변화와 환경 교란을 반영하는 중요한 생태 지표로 활용 가능
- 지속적이고 장기적인 곤충 모니터링은 기후변화와 같은 환경 요인이 곤충 군집에 미치는 영향을 분석하는데 중요한 기초 자료로 제공
- 본 연구는 한국 곤충상의 이해를 확장하고 국제적 비교 연구에 기여

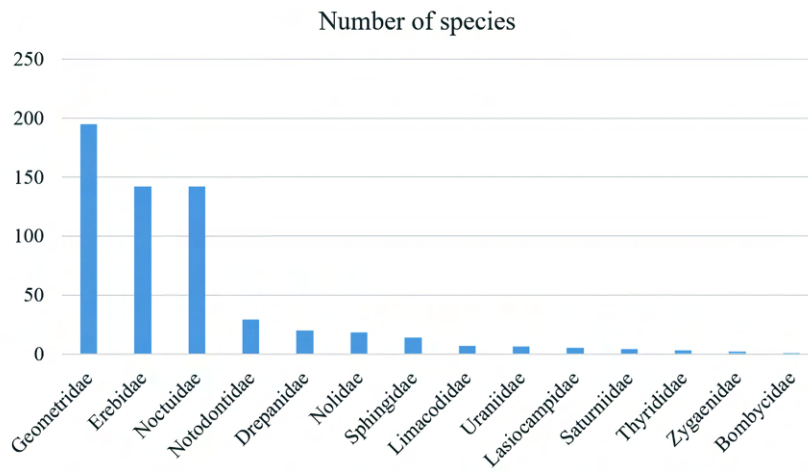


그림49. Number of moth species in each family collected from 11 sites in Mt. Hallasan National Park from 2013 to 2018.

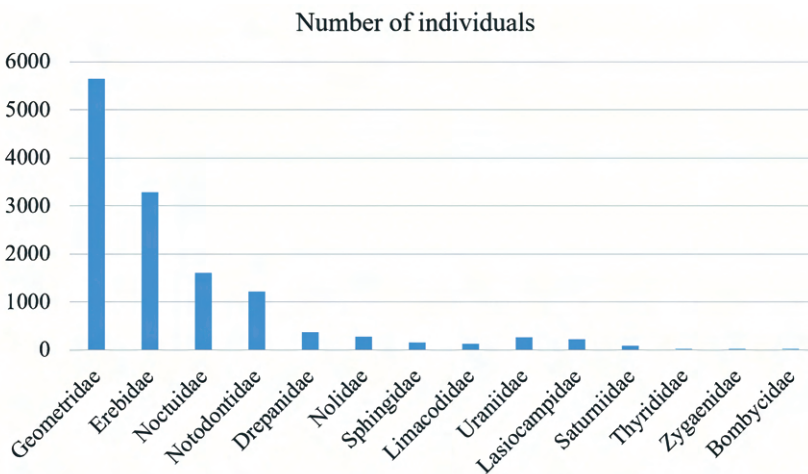


그림50. Number of moth individuals in each family collected from 11 sites in Mt. Hallasan National Park from 2013 to 2018.

지리산 나비의 고도에 따른 다양성과 서식 분포

이상훈, 안나현, 안정섭*

국립생태원

Korean Journal of Environmental Biology (2020)

[중요 키워드]

나비 (Butterfly)

다양성 (Diversity)

분포 (Distribution)

고도 (Elevation)

기후변화 (Climate Change)

1) 논문 목적

- 지리산에 서식하는 나비의 다양성을 조사하고, 고도에 따른 나비류의 다양성과 분포 파악
- 나비의 서식지 이동 현상을 파악하기 위한 지속적인 관찰의 필요성 확인

2) 중요 연구 결과

- 2015년 조사에서 총 5과 58종 769개체의 나비를 확인함
- 나비의 종 다양성은 고도에 따라 3개 구역으로 나눌 수 있으며, 특히 낮은 고도와 높은 고도에서 다양성이 높게 나타나고, 고도가 높아질수록 북방계 나비의 비율과 일 년에 한 번 발생하는 일화성 나비의 비율이 증가함
- 높은 고도에서는 서식지 범위가 좁고, 먹이식물이 한정된 단식성 나비의 비율이 높게 나타남
- 배추흰나비는 600m 이하의 낮은 고도에 서식하며, 큰흰줄표범나비와 먹그늘나비는 900m 이상, 특히 큰흰줄표범나비는 1,000m 이상 높은 고도에 서식하는 것으로 확인됨

3) 중요 시사점

- 본 연구는 지리산에서 기후변화에 따른 나비의 고도 분포와 다양성 변화를 파악하기 위한 지속적인 모니터링의 중요성을 강조
- 고도에 따라 서식하는 특정 종들을 대상으로 미래 기후변화에 대한 취약성을 평가하고, 보전 대책을 수립하는 것에 중요한 기초 자료 제공
- 나비의 다양성은 기온, 강수량뿐만 아니라 서식지 차이에 의해서도 결정되며, 이에 대한 추가 연구가 필요

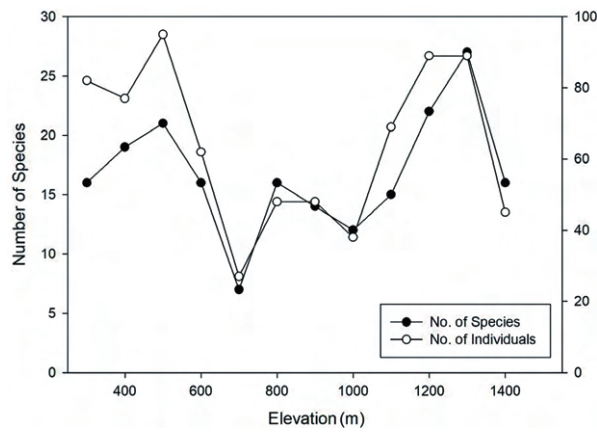


그림51. Altitudinal variations in the number of species (●, closed circle) and individuals (○, open circle) on Mt. Jirisan.

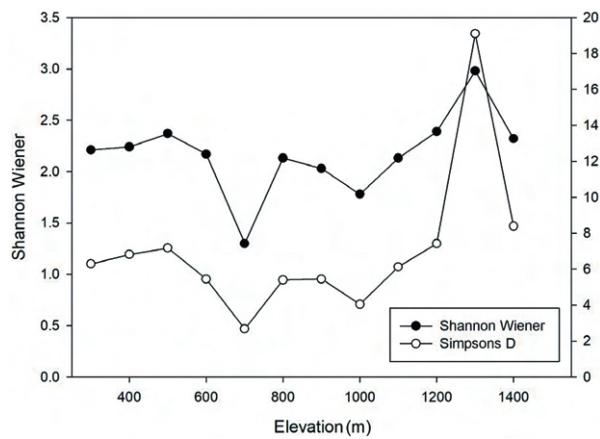


그림52. Altitudinal variation in Shannon Wiener (●, closed circle) and Simpsons D (○, open circle) on Mt. Jirisan.

청산도 나비 군집의 계절적 변화 및 다양성 연구

안나현, 이상훈*, 안정섭

국립생태원

한국도서연구 (2020)

[중요 키워드]

군집 구조 (Community structure)

생물다양성 (Biodiversity)

계절적 변화 (Phenological changes)

환경 요인 (Environmental factors)

1) 논문 목적

- 청산도 나비 군집의 계절적 변화와 다양성을 확인하여, 향후 기후변화 영향을 파악하기 위한 기초 자료 수집
- 청산도에 서식하는 나비에 대한 연구를 통하여 기후변화나 서식지 변화로 인한 종의 변화 과정 확인
- 문헌 조사를 통해 기존에 청산도에서 채집 기록이 있는 나비 종 목록을 확인하고, 현장 조사 결과와 비교하여 서식하는 나비 상을 정리

2) 중요 연구 결과

- 2020년 4월부터 10월까지 청산도에서 진행된 현장 조사 결과, 총 5과 24종 476 개체의 나비가 확인됨
- 네발나비과(Nymphalidae)가 7종으로 가장 많은 종을 차지하고, 흰나비과(Pieridae)는 208개체로 가장 많은 개체수가 채집되며, 배추흰나비(*Pieris rapae*)가 125개체로 전체의 26.3%를 차지하여 가장 우점함
- 환경부 지정 국가 기후변화 생물지표종인 남방노랑나비(*Eurema mandarina*)와 물결부전나비(*Lampides boeticus*)가 관찰되고, 국외반출 승인대상 생물자원인 제일줄나비(*Limenitis helmanni*)와 농업생명자원인 호랑나비(*Papilio xuthus*)도 확인됨
- 본 연구를 통하여 기존 문헌에 기록된 것보다 12종이 더 추가되었으며, 청산도에 서식하는 나비는 총 5과 27종으로 정리됨

3) 중요 시사점

- 한반도 남단 도서지역인 청산도 나비에 대한 기초 자료를 제공했다는 점에서 중요한 의미가 됨
- 인근 섬인 완도(고도가 높은 산지)와 청산도(경작지와 역새 군락 중심)를 비교했을 때

우점종이 다른 이유는 서식 환경의 차이임

- 본 연구로 축적된 자료는 기후변화나 환경 변화로 인한 새로운 종의 유입이나 기존 서식종의 변동을 장기적으로 추적하는데 활용 가능

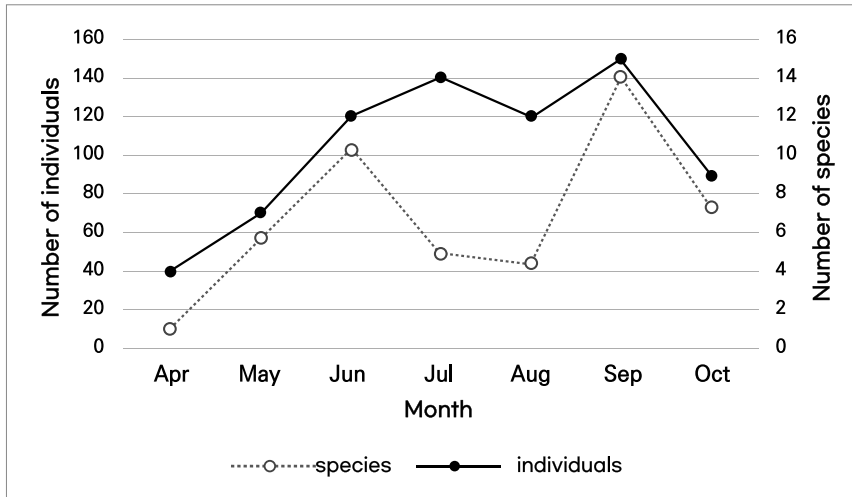


그림53. 2020년 청산도에서 채집된 나비의 월별 종수와 개체수 변화

표 1. 각 월별 채집된 종수, 개체수 및 우점종

월	종수	개체수	우점종
4월	4	10	배추흰나비, 남방부전나비
5월	7	57	배추흰나비, 노랑나비
6월	12	103	배추흰나비, 노랑나비
7월	14	49	남방부전나비, 배추흰나비
8월	12	44	남방부전나비, 네발나비
9월	15	140	네발나비, 줄점팔랑나비
10월	9	73	줄점팔랑나비, 남방부전나비, 배추흰나비

전남 완도군 고금도 나비 군집의 계절변화 및 다양성 연구

이상훈, 안나현*

국립생태원

한국도서연구 (2021)

[중요 키워드]

고금도 (Gogeumdo)

섬 (Island)

나비 (Butterfly)

곤충 (Insect)

계절변화 (Seasonal change)

생물다양성 (Biodiversity)

1) 논문 목적

- 고금도 나비 군집의 계절변화와 다양성을 분석하여, 기후변화 및 환경변화의 영향을 파악하기 위한 기초자료 구축
- 나비의 월별 모니터링을 통해 생물 계절 변화 과정 확인
- 문헌 조사를 통해 기존에 고금도에서 채집 기록이 있는 나비 종 목록을 확인하고, 현장 조사 결과와 비교하여 서식하는 나비 상을 정리

2) 중요 연구 결과

- 2021년 3월부터 10월까지 조사 결과, 총 5과 38종 800개체의 나비가 확인됨
- 가장 많이 발견된 종은 남방노랑나비로 전체의 13%를 차지하고, 다음으로는 노랑나비, 남방부전나비, 줄점팔랑나비, 배추흰나비 순으로 나타남
- 종수와 개체수는 3월부터 6월까지 증가하다가 7~8월에 감소한 후 9월에 다시 최고치를 보이고, 7~8월의 감소는 평년보다 많은 강수량 때문으로 분석됨
- 고금도는 서식 환경이 좋은 편이라 인근 섬인 완도나 청산도에 비해 종수 및 개체수가 높게 나타남
- 환경부 지정·관리 생물 9종이 서식하였는데, 이는 인근 섬인 청산도(4종)나 완도(5종)보다 많은 수치로 나타남

3) 중요 시사점

- 본 연구를 통해 축적된 자료는 향후 기후변화나 환경 변화에 따른 나비 군집의 변화를 파악하고 평가하는 데 중요한 기초 자료로 활용 가능
- 종수와 개체수가 풍부한 고금도는 향후 기후 환경변화로 인한 영향을 받을 가능성이 높기 때문에 주기적인 모니터링이 필요

- 나비의 다양성 및 계절적 변화는 기온, 강수량뿐만 아니라 나비가 선호하는 식생이나 서식지 같은 환경 요인에 따라 달라질 수 있다는 점을 시사

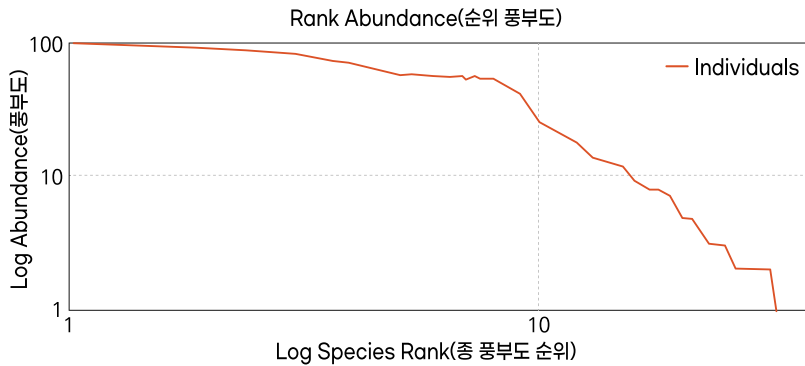


그림54. 고금도 나비의 순위-풍부도곡선

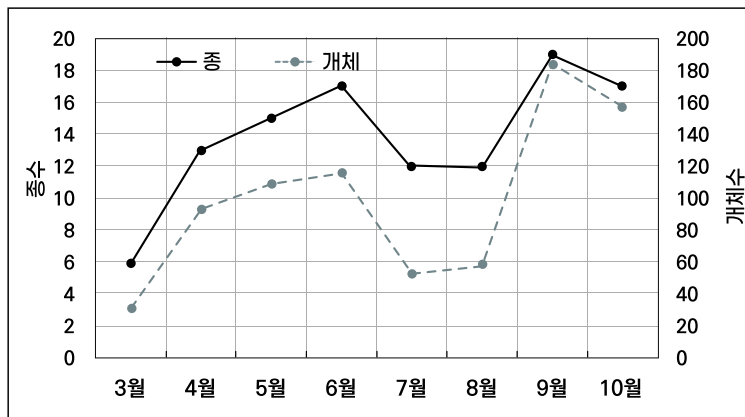


그림55. 2021년 고금도에서 조사된 월별 종수와 개체수 변화

완도 수목원 난대림에 서식하는 대형나방의 다양성 및 계절적 변화 연구

안나현¹, 이상훈^{1*}, 최세웅²

¹국립생태원, ²목포대학교

한국도서연구 (2021)

[중요 키워드]

완도 (Wando)

섬 (Island)

나방 (Moth)

곤충 (Insect)

계절적 변화 (Phenological change)

생물다양성 (Biodiversity)

1) 논문 목적

- 완도 난대림에 서식하는 대형나방 군집의 다양성과 계절적 변화를 조사하여 기초 자료 구축
- 나방의 다양성 변화 양상을 지속적이고 정량적인 방법으로 추적하여 기후변화나 서식지 환경변화에 따른 변동을 파악하기 위한 기초 자료 구축

2) 중요 연구 결과

- 2017년부터 2020년까지 총 14과 377종 4,807개체의 대형나방이 확인됨
- 가장 우점하는 과(Family)는 자나방과(Geometridae)로, 121종 2,472개체가 확인되었으며 전체의 약 82%를 차지함
- 가장 많이 발견된 종은 털뿔가지나방(*Alcis angulifera*)으로, 매년 우점하는 종으로 나타남
- 조사기간 동안 전체 종 수와 개체 수가 점차 감소하는 경향을 보였으며, 종 다양성 및 균등도 지수도 낮아지는 경향이 나타남
- 가장 많은 종 수와 개체 수는 5월과 6월인 늦봄~초여름에 확인됨
- 선행 연구 결과와 본 연구 결과를 종합하면, 완도 난대림에 서식하는 야행성 나비목은 총 14과 389종으로 정리됨

3) 중요 시사점

- 본 연구를 통하여 축적된 기초 자료는 향후 기후변화나 서식지 환경변화에 따른 완도 난대림 내 곤충 변동을 추적하고 평가하는 데 중요한 자료가 될 수 있음

- 본 연구는 대형나방만을 대상으로 수행했지만, 미소나방이나 주행성 나비목의 조사 결과를 추가한다면 완도 난대림에 서식하는 나비목 곤충은 훨씬 다양할 것으로 예상
- 나방은 먹이그물에서 중요한 역할을 하므로, 나방 개체수의 감소는 먹이그물에 영향을 미칠 수 있음

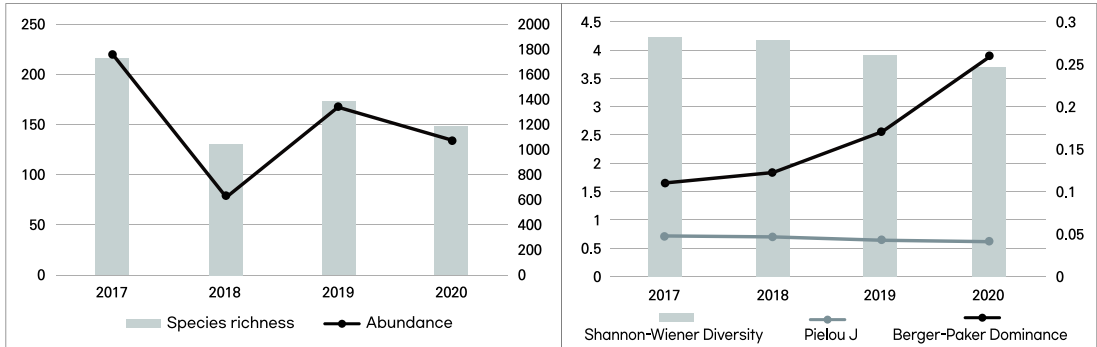


그림56. 연도별 종풍부도와 다양성 변화

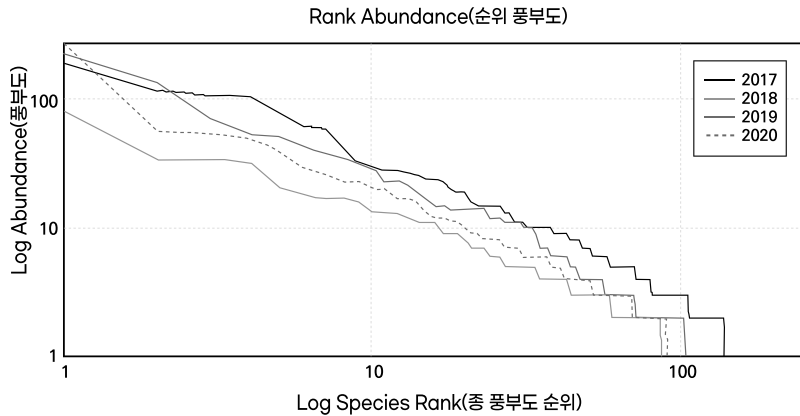


그림57. 2017-2020년 순위-풍부도 곡선

Effects of elevation and slope on the alpha and beta diversity of ground-dwelling beetles in Mt. Jirisan National Park, South Korea

Sei-Woong Choi^{1*}, Beom-Jun Jang²

¹Mokpo National University, ²National Institute of Ecology

Journal of Asia-Pacific Entomology (2022)

[중요 키워드]

생물지리적 분포 (Biogeographic distribution)

딱정벌레과 (Carabidae)

베타 다양성 (Beta diversity)

고도 (Elevation)

Soil fertility (토양 비옥도)

경사도 (Slope)

1) 논문 목적

- 해발고도와 사면 경사가 관속식물의 알파 및 베타 다양성에 미치는 영향을 분석함
- 지리산 국립공원의 다양한 환경 구배에서 식물 종 풍부도와 군집 구성을 평가함
- 고산지대 생물다양성 보전을 위한 기초 생태학적 정보를 제공하고자 함

2) 중요 연구 결과

- 해발 고도가 높아질수록 서식 환경이 제한되어 종의 수가 줄어들며 따라 알파 다양성은 감소하는 경향을 보임
- 사면 경사는 종 구성에 유의한 차이를 만들어 베타 다양성을 높임
- 환경 요인에 따른 종 조성과 다양성 패턴은 지역별로 뚜렷하게 달라짐

3) 중요 시사점

- 고산지대에서 해발고도와 경사는 식물 다양성 유지와 분포를 결정하는 핵심 요인
- 고도별 특성을 고려한 맞춤형 보전 계획이 필요
- 땅에 서식하는 딱정벌레는 토양환경과 밀접한 관련이 있어 서식지 교란에 민감하므로 장기적인 모니터링은 산림 생태계 건강성을 평가하는 지표종으로 활용 가능

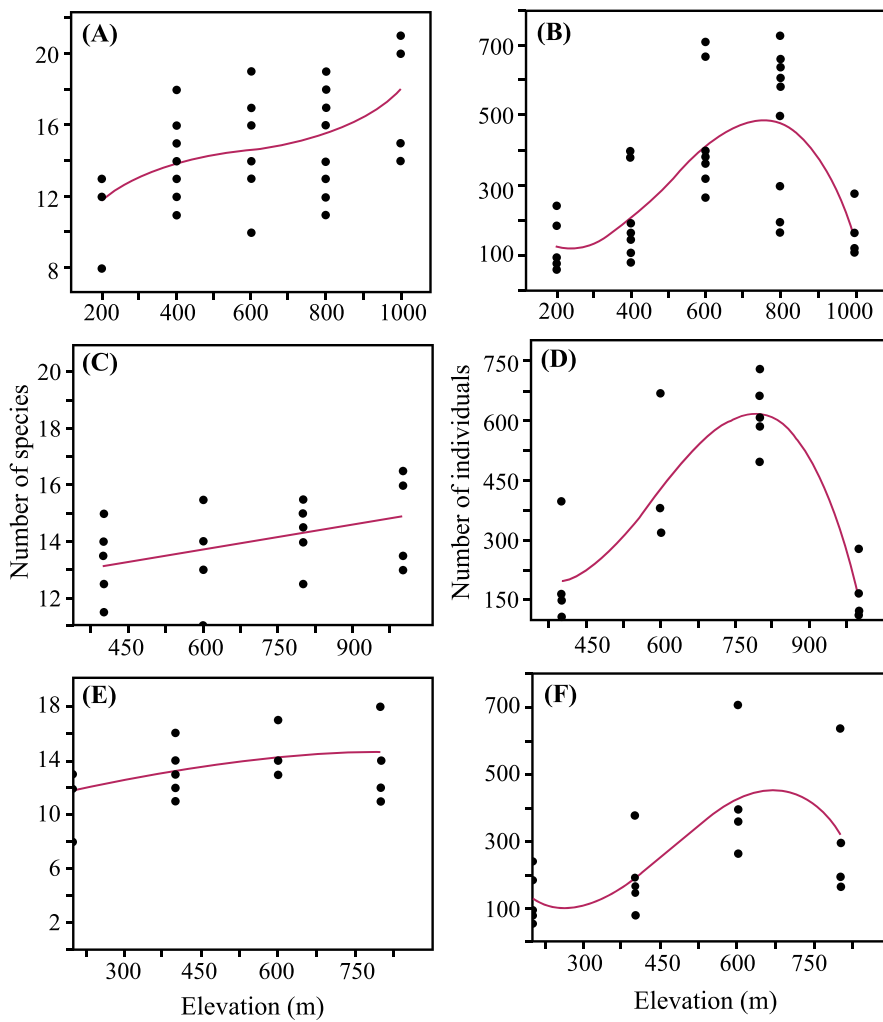


그림58. Numbers of species and individuals of the total (A, B), northern (C, D), and southern slopes (E, F) along elevational gradients of Mt. Jirisan National Park, South Korea. The red line indicates the best regression model from first, second, and third-order polynomial regressions.

Spatial and temporal changes in moth assemblages along an altitudinal gradient, Jeju-do island

Sei-Woong Choi^{1*}, Jeong-Seop An², Jae-Young Lee¹, Kyung Ah Koo³

¹Mokpo National University, ²National Institute of Ecology,

³Korea Environment Institute

Scientific Reports (2022)

[중요 키워드]

나방 군집 (Moth assemblages)

고도 경사 (Altitudinal gradient)

한라산 국립공원 (Hallasan National Park)

종풍부도 (Species richness)

종구성 (Species composition)

1) 논문 목적

- 한라산 국립공원에서 관속식물의 공간적 및 시간적 다양성 변화를 분석
- 장기적 조사 자료를 활용하여 식물 종 풍부도와 군집 구성 변화를 규명
- 이러한 분석을 통해 국립공원 생태계 관리와 보전 전략 수립을 위한 기초 정보를 제공

2) 중요 연구 결과

- 고도가 높아질수록 나방의 종수와 개체수는 감소하였으며 이는 낮은 기온과 제한적인 서식지 때문으로 분석됨
- 시간의 흐름에 따라 일부 종은 감소하고 다른 종은 증가하여 군집 구성이 변화함
- 공간적·시간적 요인 모두가 식물 다양성 패턴에 중요한 영향을 줌

3) 중요 시사점

- 기후 변화가 고산 지대의 나방 군집에 영향을 주며, 고지대에서 개체수가 증가하는 현상은 기후 변화에 따라 나방의 서식지가 위로 이동하는 현상과 관련이 있음
- 장기적 모니터링은 생물다양성 보존 및 기후변화 대응 전략 수립에 필수적
- 공간적·시간적 다양성 분석은 국립공원 내 서식지 관리와 종 보존 우선순위 설정에 중요한 근거가 됨

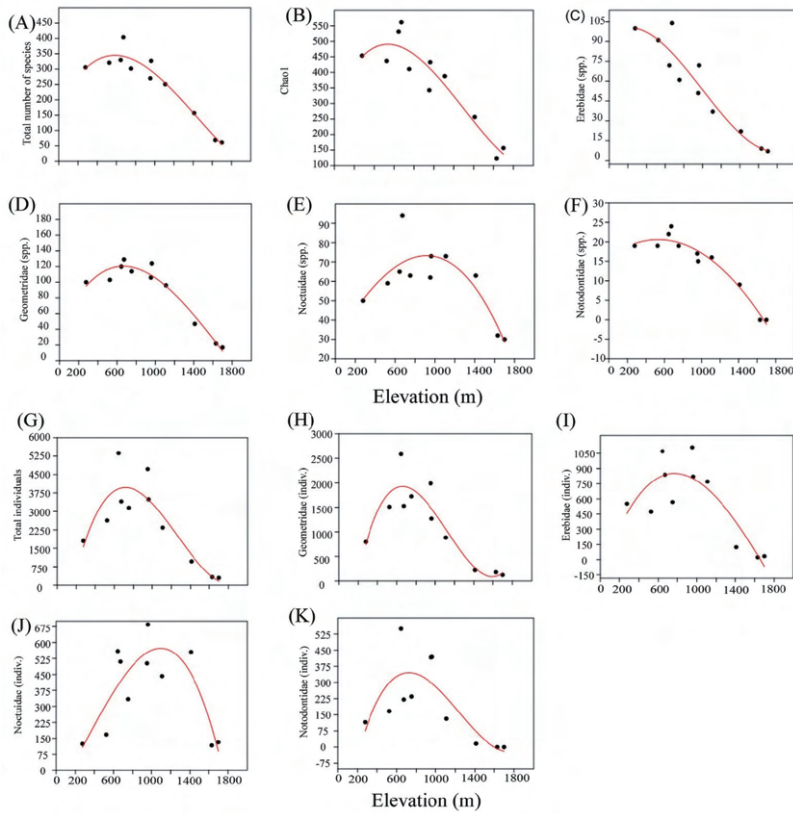


그림59. The best-fitted regression model for the species richness and abundance of moths along elevation in HNP. (A) Observed species richness, (B) Estimated species richness (Chao 1), (C) Species richness of the Erebiidae, (D) Species richness of the Geometridae, (E) Species richness of the Noctuidae, (F) Species richness of the Notodontidae, (G) Total abundance, (H) Abundance of the Geometridae, (I) Abundance of the Erebiidae, (J) Abundance of the Noctuidae, (K) Abundance of the Notodontidae.

Different diversity patterns of butterfly and moth assemblages between deciduous and evergreen broad-leaf forests

Na-Hyun Ahn¹, Sang-Hun Lee¹, Sang-Hak Han¹, Sei-Woong Choi^{2*}

¹National Institute of Ecology, ²Mokpo National University

Journal of Asia-Pacific Entomology (2024)

[중요 키워드]

나비목 곤충 (Lepidopteran insects)

난온대림 (Warm temperate forests)

산림 천이 (Forest transition)

다양성 (Diversity)

낙엽활엽수림 (Deciduous broad-leaved forests, DBL)

상록활엽수림 (Evergreen broad-leaved forests, EBL)

1) 논문 목적

- 낙엽활엽수림(Deciduous broad-leaved forests, DBL)과 상록활엽수림(Evergreen broad-leaved forests, EBL)의 온대림 간 나비와 나방의 종 다양성과 군집 구조의 차이를 비교하여, 식생 전이에 따른 곤충 군집 변화 양상을 규명
- 나비(주간성)와 나방(야간성) 두 그룹 간의 계절적 출현 양상 및 다양성 패턴을 살펴보고, 산림 구조와의 관련성을 분석
- 숲곤충과 기주식물 간 네트워크 분석을 통해, DBL과 EBL의 식생 변화가 기주식물 선택 폭 및 곤충의 서식처 적합성에 미치는 영향을 파악

2) 중요 연구 결과

- EBL에서 추정된 종수는 DBL보다 높았으며, 특히 나방의 단종(singleton) 비율이 높아 EBL의 종풍부도가 과소평가되었을 가능성이 있음
- 나비는 DBL에서 종 다양성과 개체수가 더 높고, 나방은 EBL에서 더 높은 종 수와 개체수를 보이며, 나방 군집은 두 산림 유형 간 유의미하게 다름(NMDS, MRPP 분석)
- 베타 다양성 분석 결과, 나방은 turnover(교체성), 나비는 nestedness(포함성)가 주요 구성 요소로 나타나, 나비는 산림 구조 차이에 따라 일부 종만 결여된 양상이 나타남

3) 중요 시사점

- 기후변화와 식생 전이에 따라 DBL의 감소는 해당 서식처에 특화된 곤충 종의 서식지

상실로 이어질 수 있으며, 장기적으로 나방 군집의 EBL 유사화가 예측

- DBL의 개방된 수관은 나비 다양성을 높이는 요인으로, 숲의 구조적 변화(수관 개방도, 수고, DBH 등)는 주간성 곤충의 활동성 및 다양성 유지에 중요
- 곤충-기주식물 네트워크는 특별히 전문화된 양상($H2=0$)을 보이지 않았지만, DBL은 나비의, EBL은 나방의 연결 밀도 (link density)가 높아, 산림 유형에 따른 상호작용 구조가 상이함

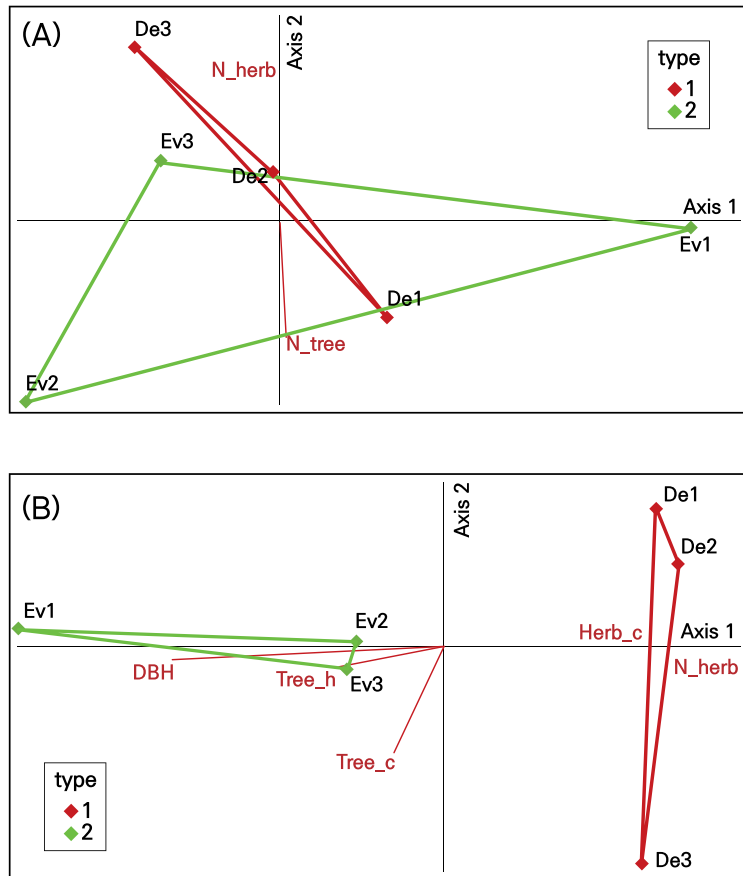


그림60. NMDS graphs of butterflies (A) and moths (B) in deciduous and evergreen broad-leaved forests in southern South Korea. Red diamonds, Deciduous broadleaved; Green diamonds, Evergreen broad-leaved.

Trends in the homogenization of macromoth assemblages (2016–2023) in a Seoul City park

Sei-Woong Choi^{1*}, Sung-Soo Kim², Jae-Young Lee¹, Jaesang Noh³

¹Mokpo National University, ²Research Institute for East Asian Environment and Biology,

³National Institute of Ecology

Scientific Reports (2025)

[중요 키워드]

도시 숲 (Urban forest)

다양성 (Diversity)

초식동물 (Herbivores)

동물군 변화 (Faunal change)

균질화 (Homogenization)

1) 논문 목적

- 2016년부터 2023년까지 서울 남산 공원의 산림 유형별 대형 나방 군집의 다양성 및 구성을 장기간 모니터링
- 도시화가 대형 나방에게 미치는 영향을 평가하기 위해 나방의 생태학적 특성 변화 조사
- 산림 유형 간 대형 나방 군집의 균질화 경향을 파악하고, 도시 공원의 고립성 등 이 패턴에 영향을 미치는 요인 분석

2) 중요 연구 결과

- 8년간의 연구 기간 동안 총 283종의 대형 나방이 기록되며, 212종이 새로 발견되고 이전 기록된 68종은 현재 사라진 것으로 나타나 종 구성에 급격한 변화를 보임
- 대형 나방 군집은 산림 유형별로 뚜렷하게 군집화되는 특성을 보이거나, 산림 유형 간 나방 군집의 평균 거리가 감소하며 군집이 점차 균질화되는 경향이 시사됨
- 전체적인 종 풍부도는 통계적으로 유의미하지 않게 감소하는 경향을 보이거나, 시계열 모델 예측 결과 개체수는 향후 몇 년간 지속적으로 증가할 것으로 예상됨

3) 중요 시사점

- 도시 공원 내 식물 우점종의 감소와 도시 환경에 적응한 식생의 재생장 등 식생 변화는 대형 나방 군집의 다양성과 균질화에 실질적인 영향을 미치는 주요 요인임을 확인
- 도시 생태계의 장기적인 생태 모니터링은 알파 다양성의 변화 예측과 같은 중요한 생태적 변화 추이를 파악하는 데 필수적

- 남산이 생태학적 섬(ecological island)처럼 기능하여 나방의 외부 이주가 제한된다는 결과는 도시 녹지 공간의 단편화와 고립이 생물다양성 변화에 중요한 영향을 미침을 시사

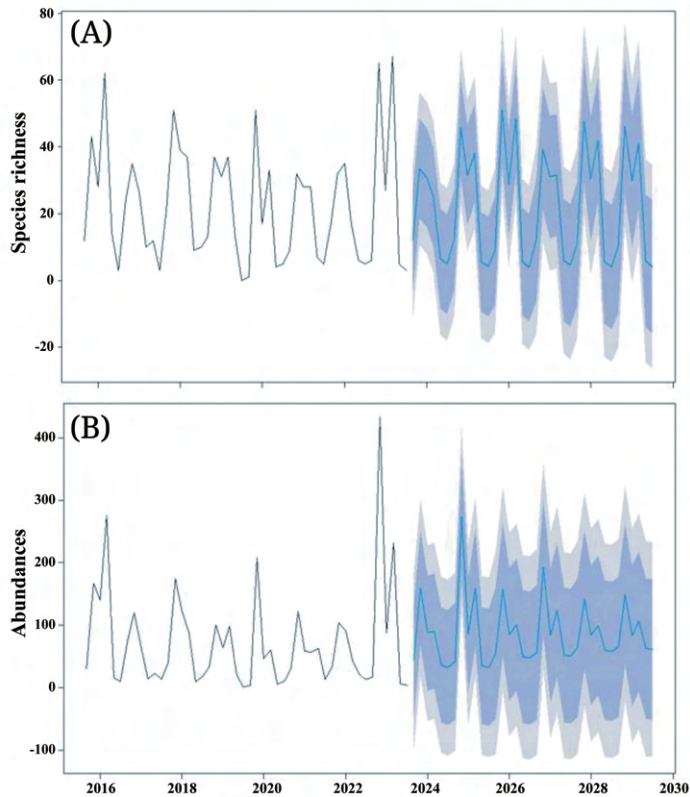


그림61. Time series models of macromoth assemblages in Namsan, Seoul, Korea, from 2016 to 2023, with forecasts following for five years. (A) Species richness (number of species); (B) abundance (number of individuals).



극한기후 대응 실험 연구

Responses to drought stress in *Prunus sargentii* and *Larix kaempferi* seedlings using morphological and physiological parameters

Narayan Bhusala¹, Minsu Lee¹, Ah Reum Han², Areum Han², Hyun Seok Kim^{1,3,*}

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology,

³National Center for Agro Meteorology

Forest Ecology and Management (2020)

[중요 키워드]

이수성/등수성 거동 (Anisohydric/isohydric behavior)

일본잎갈나무 (*Larix kaempferi*)

잎 형태 (Leaf morphology)

광합성 반응 (Photosynthetic response)

산벚나무 (*Prunus sargentii*)

안정 탄소 동위원소 (Stable carbon isotope($\delta^{13}\text{C}$))

1) 논문 목적

- 산벚나무와 일본잎갈나무 묘목의 가뭄 스트레스 반응에 대한 생리적·형태적 수준에서의 규명
- 기공 조절, 광합성, 수분 이용 효율 등 주요 생리 지표 변화를 분석
- 가뭄 적응형 재배 및 육종 전략 수립을 위한 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 가뭄 스트레스 상황에서 산벚나무(*Prunus sargentii*)는 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*)보다 수고생장과 생체량, 엽록소 함량이 뚜렷하게 감소함
- 산벚나무는 이수성(수분 소비전략)으로 상대수분함량과 잎 수분포텐셜의 감소폭이 크게 나타나고, 일본잎갈나무는 등수성(수분 보존전략)으로 상대수분함량과 잎 수분포텐셜이 안정적으로 잘 유지됨
- 가뭄 스트레스로 두 종 모두 수분 손실을 막기 위한 기공폐쇄로 순 광합성률과 기공전도도가 감소함

3) 중요 시사점

- 수종별 수분 보존 전략의 차이로 가뭄 스트레스 상황에서의 생리 활성 유지 능력에 차이가 있었고, 종 특이적 수분전략에 따른 맞춤형 재배 관리가 필요
- 내건성 관련 형질은 육종 프로그램에서 중요한 선발 기준이 될 수 있음
- 기후변화로 인한 가뭄 빈도 증가에 대응하기 위해 지속적 연구와 적용이 요구

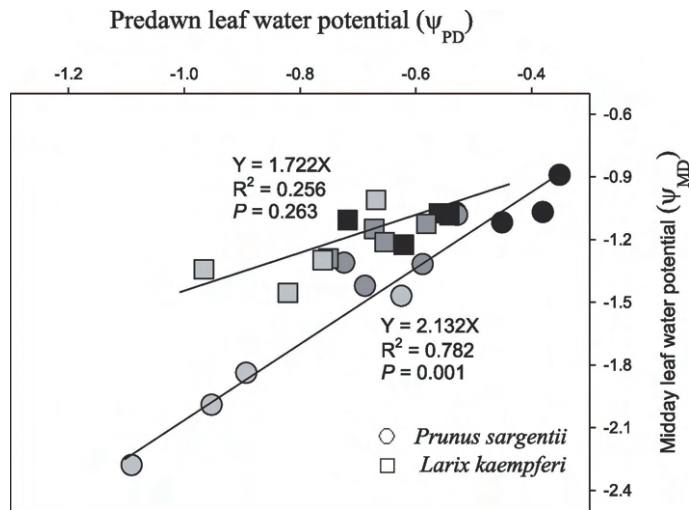


그림62. Linear regression of predawn and midday leaf water potential between *Prunus sargentii* (○) and *Larix kaempferi* (□) seedlings in different irrigation regimes to define the hydroscope of the species (isohydric or anisohydric behavior) with increasing water stress. Three different treatments of control (black), light drought (dark gray), and heavy drought (light gray) were used to show the relationship between two examined species. Sargent cherry showed more anisohydric behavior with a steeper slope (2.13) and a wide range of leaf water potential gradient, while Japanese larch had a shallower slope (1.72) and a narrow leaf water potential gradient.

Evaluation of morphological, physiological, and biochemical traits for assessing drought resistance in eleven tree species

Narayan Bhusal¹, MinsuLee¹, Hojin Lee¹, Arjun Adhikari², Ah Reum Han³, Areum Han³, Hyun Seok Kim^{1,4*}

¹Seoul National University, ²Kyungpook National University,

³National Institute of Ecology, ⁴National Center for Agro Meteorology

Science of the Total Environment (2021)

[중요 키워드]

이수성/등수성 거동 (Anisohydric/isohydric behavior)

항산화제 (Antioxidant)

가뭄 저항성 (Drought resistance)

내인성 호르몬 (Endogenous hormone)

잎 형태 (Leaf morphology)

광합성 반응 (Photosynthetic response)

1) 논문 목적

- 장기간 약한 가뭄과 심각한 가뭄 상황에서 11개 수종(침엽수 6종, 활엽수 5종)의 가뭄 저항성 평가
- 11개 수종의 형태적·생리적·생화학적 반응을 통해 건조 스트레스에 대한 적응 메커니즘을 이해
- 기후변화로 인한 산림 수목의 생존 및 분포 변화 예측을 위한 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 잣나무는 등수성(수분 보존전략)을 보이며 높은 저항성을 가지고, 소나무(*Pinus densiflora*), 일본잎갈나무(*Prunus sargentii*), 곰솔(*Pinus thunbergii*), 산벚나무(*Prunus sargentii*), 전나무(*Abies holophylla*)는 저항성이 보통이며, 상수리나무(*Quercus acutissima*), 편백(*Chamaecyparis obtusa*), 자작나무(*Betula pendula*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*), 고로쇠나무(*Acer pictum* var. *mono*)는 이수성(수분 소비전략)으로 생장감소 및 생리적 손상이 심하게 나타남
- 가뭄 저항성이 높은 종은 단위면적당 엽 질량과 광합성률이 높고, 한낮 잎 수분 포텐셜을 잘 유지하며 낮은 탄소 동위원소 값을 통해 높은 물 이용 효율을 보이는 특성을 나타냄
- 가뭄 저항성이 높은 종은 플라보노이드 및 폴리페놀 함량이 낮게 나타나며, 산화 스트레스에 대처하는 항산화 효소 활성 역시 낮게 나타나 전반적인 스트레스 수준이 낮음을 시사함

3) 중요 시사점

- 수종별 건조 스트레스 반응 차이는 기후변화에 따른 산림 구성 변화 예측에 중요한 단서를 제공
- 내건성이 높은 수종의 식재 확대는 산림 생태계의 안정성과 회복력을 강화하는 전략이 될 수 있음
- 본 연구는 미래 가뭄의 빈도와 강도가 증가하는 기후 시나리오에 대응한 수종 선택 및 산림 관리 방안 수립에 기초 자료를 제공

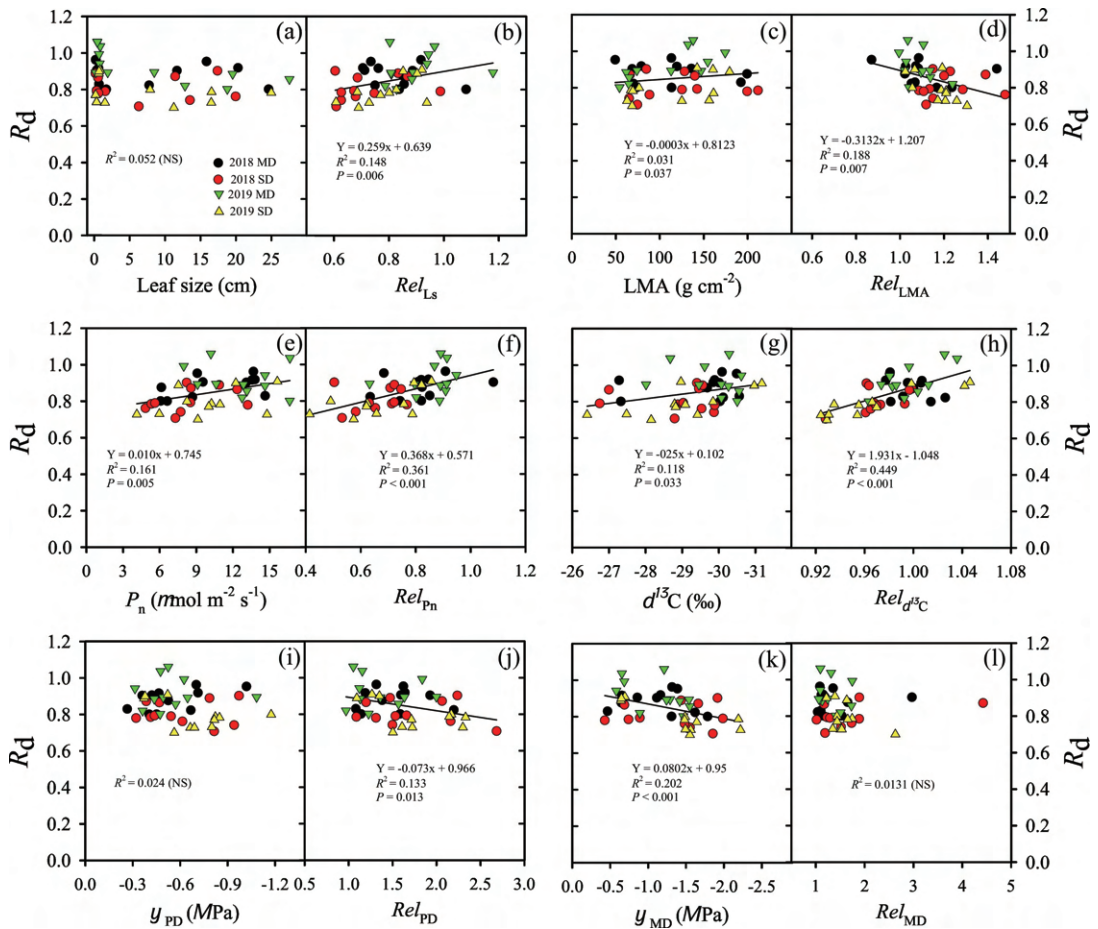


그림63. Correlation between absolute and relative values of leaf morphological or physiological traits and drought resistance index of root collar diameter (R_d). Trait Absolute values (a, c, e, g, i, k); Trait relative values (b, d, f, h, j, l). L_s , leaf size; LMA, leaf mass per area; P_n , photosynthesis; $\delta^{13}C$, carbon isotopic discrimination; ψ_{PD} , predawn leaf water potential; ψ_{MD} , midday leaf water potential. Black and red circle indicate mild (MD) and severe drought (SD) conditions, respectively, in 2018; green and yellow triangles indicate MD and SD, respectively, in 2019.

Short-term severe drought influences root volatile biosynthesis in eastern white pine (*Pinus strobus* L)

Umashankar Chandrasekaran¹, Siyeon Byeon¹, Kunhyo Kim¹,
Seo Hyun Kim¹, Chan Oh Park¹, Ah reum Han^{2*}, Young-Sang
Lee², Hyun Seok Kim^{1,3*}

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology, ³National Center for Agro
Meteorology

Frontiers in Plant Science (2022)

[중요 키워드]

가뭄 스트레스 (Drought stress)

스트로브잣나무 (*Pinus strobus*)

휘발성 유기화합물 (Volatile organic compounds, VOCs)

모노테르펜 (Monoterpene)

테르페노이드 (Terpenoids)

앱시스산 (Absciscic acid, ABA)

1) 논문 목적

- 단기간의 극심한 가뭄 스트레스가 스트로브잣나무(*Pinus strobus*) 어린 묘목의 생리·생화학적 반응(엽록소, 수분함량, 프롤린, NSC 등)에 어떤 영향을 미치는지 규명
- 뿌리에서 합성되는 휘발성 유기화합물(VOCs, 특히 테르펜류)의 조성 변화를 단기·심각한 가뭄 조건에서 조사
- ABA 축적과 VOC 합성 간의 상관관계를 분석하여, 뿌리 신호전달이 기공 조절과 가뭄 내성 메커니즘에 어떻게 기여하는지 평가

2) 중요 연구 결과

- 단기간(32일)의 극심한 가뭄은 잎 상대 수분 함량, 엽록소 함량, 잎 중량을 감소시키나 수고, 뿌리 길이, 근원경 등 주요 형태적 특성에는 큰 변화를 유발하지 않음
- 가뭄 스트레스로 인해 뿌리에서 삼투압 조절을 돕는 프롤린 함량 및 항산화 활성이 증가하여 산화 스트레스에 대한 적응력이 높아지며, 동시에 기공 폐쇄를 유도하는 스트레스 호르몬(앱시스산, ABA) 함량도 증가함
- 가뭄 처리된 묘목의 뿌리에서는 스트레스 반응과 관련된 모노테르펜 함량이 크게 증가하고 세스퀴테르펜 함량은 감소하면서 휘발성 유기화합물(VOCs) 조성이 재편됨

3) 중요 시사점

- 단기적 가뭄에서도 뿌리 차원의 탄소 대사와 VOC 합성이 빠르게 변한다는 사실은 수목의 생존 전략 이해에 중요한 통찰을 제공

- 프롤린, ABA, 특정 모노테르펜의 증가는 가뭄 내성을 예측할 수 있는 잠재적 생화학적 지표가 될 수 있음
- 뿌리 VOC 변화는 병해충 방어와 산화 스트레스 완화 및 뿌리 간 신호전달에도 영향을 미쳐 기후변화 하에서 숲의 안정성 유지에 기여

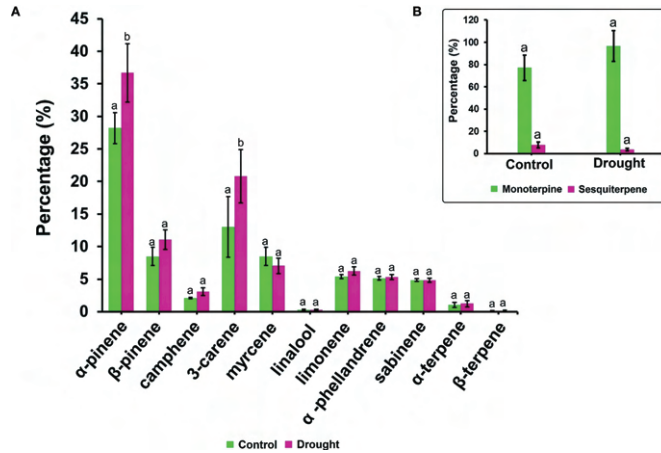


그림64. Volatile synthesis (VOC)-Monoterpenes. (A)major monoterpenes and their content in root samples (B) total accumulation of main monoterpenes and sesquiterpenes in root samples measured 32 DAT. Results indicate the influence of severe drought on the significant accumulation of two critical monoterpenes α -pinene and delta-3-carene apart from a non-significant increase for other critical monoterpenes like β -pinene, camphene and limonene. Significant accumulation of total monoterpene content is noted compared to drought treated seedling samples. Means denoted with different letters indicate significance at $p < 0.05$.

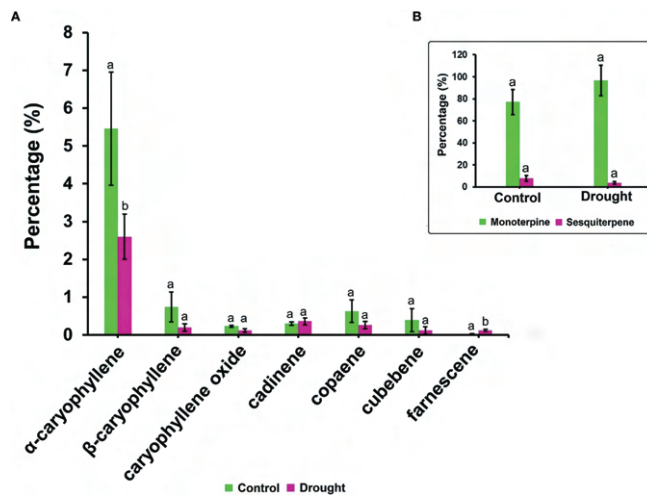


그림65. Volatile synthesis (VOC)-Sesquiterpenes. (A) list of sesquiterpenes and their content in root samples (B) total accumulation of main sesquiterpenes and sesquiterpenes in root samples measured 32 DAT. Results highlight the influence of severe drought on the decline in total sesquiterpene accumulation supported by a decrease in major sesquiterpenes like α -caryophyllene, β -caryophyllene and cadinene. Farnesene being the only sesquiterpene showing a non-significant increase in their content among drought treated seedling sample. Means denoted with different letters indicate significance at $p < 0.05$.

Evaluation of growth responses of six gymnosperm species under long-term excessive irrigation and traits determining species resistance to waterlogging

Narayan Bhusal¹, Arjun Adhikari², Minsu Lee¹, Areum Han³, Ah Reum Han^{3*}, Hyun Seok Kim^{1,4*}

¹Seoul National University, ²Kyungpook National University,

³National Institute of Ecology, ⁴National Center for Agro Meteorology

Agricultural and Forest Meteorology (2022)

[중요 키워드]

바이오매스 (Biomass)

침수 저항성 (Excessive water resistance)

잎 형태 (Leaf morphology)

플라보노이드 (Flavonoids)

기공 전도도 (Stomatal conductance)

1) 논문 목적

- 여섯 종의 침엽수 목목이 침수상황에서 어떤 성장 반응을 보이는지 평가
- 광합성과 생체량 변화 등을 측정하여 기후변화가 침엽수 생리에 미치는 영향을 규명
- 종 간 비교를 통해 기후변화 조건에 대한 적응력과 내성 차이를 파악

2) 중요 연구 결과

- 편백(*Chamaecyparis obtusa*), 전나무(*Abies holophylla*)는 생체량 증가 등 높은 저항성을 보이고, 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*)와 잣나무(*Pinus koraiensis*)는 적응과 회피전략이 혼합되거나 성장이 정체되며, 곰솔(*Pinus thunbergii*)과 소나무(*Pinus densiflora*)는 생체량 감소 등 산소 부족한 침수환경에 취약함
- 침수가 강한 편백, 전나무는 잎 크기 증가, 단위면적당 잎 질량 증가, 최대 광합성 속도 증가, 잎 수분 포텐셜 증가로 광합성 효율이 유지 또는 증가됨
- 세포 보호 능력과 가스 교환 유지 능력과 관련된 플라보노이드(항산화 물질), 단위 면적당 엽 질량, 기공전도도가 침수 저항성을 결정하는 중요 형질로 평가됨

3) 중요 시사점

- 폭우로 인한 토양 침수에 대한 수종별 생리적, 형태적 전략이 서로 다르며, 잣은 침수 피해지역에 적합한 조림 수종 선정에 위한 과학적 근거를 제시함

- 침엽수 종은 기후변화에 따라 성장 반응이 상이하게 나타나므로 종별 특성을 고려한 산림 관리 필요
- 기후변화 적응 전략 수립에는 종별 생리 반응 차이를 반영하는 장기적 연구가 필수적

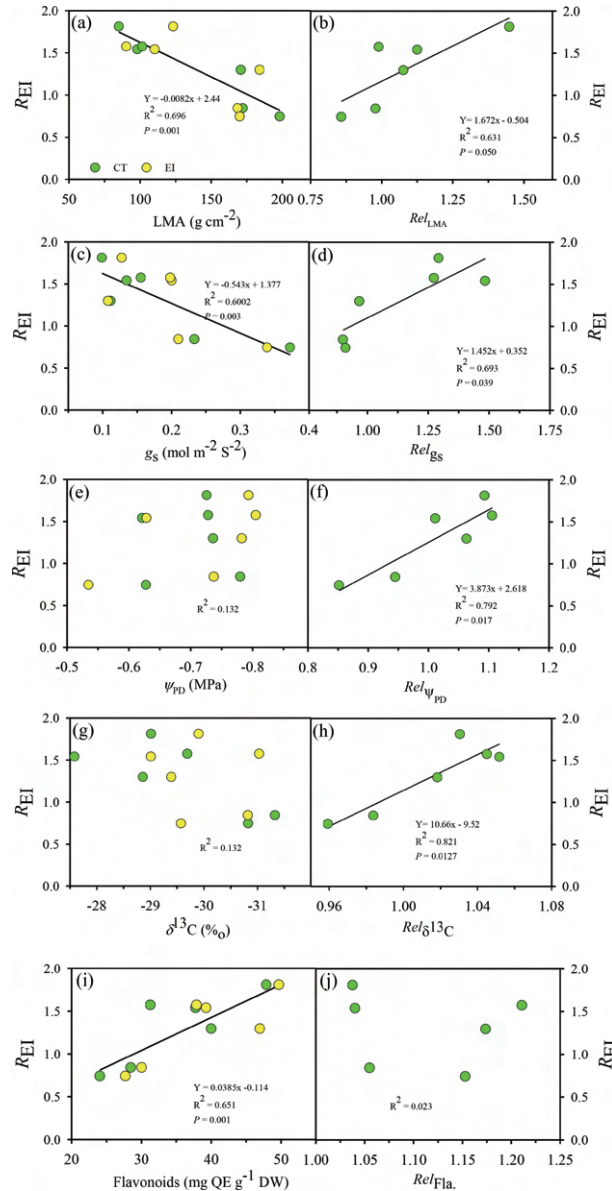


그림66. Correlation of individual leaf morphological (leaf mass per area; LMA), physiological (stomatal conductance [g_s], leaf water potential [ψ_{PD}], and carbon isotope discrimination [$\delta^{13}CL$]), and biochemical (flavonoids) traits with plant biomass of the species. Excessive irrigation resistance index (REI) is defined as the ratio of biomass under irrigation ($Biomass_{EI}$) to biomass of the control ($Biomass_c$) ($REI = Biomass_{EI}/Biomass_c$) (Bhusal et al, 2021). The analysis was performed in both the absolute and relative scales of individual traits. Trait absolute values (a, c, e, g, i); Trait relative values (b, d, f, h, j). Rel_{LMA} , relative value of LMA; Rel_{g_s} , relative value of g_s ; $Rel_{\psi_{PD}}$, relative value of ψ_{PD} ; $Rel_{\delta^{13}C}$, relative value of $\delta^{13}C$; and $Rel_{Fla.}$, relative value of flavonoids.

Drought hardening effect on improving transplant stress tolerance in *Pinus densiflora*

Siyeon Byeon¹, Seohyun Kim¹, Jeonghyun Hong¹, Tae Kyung Kim¹, Woojin Huh¹, Kunhyo Kim¹, Minsu Lee¹, Hojin Lee¹, Sukyung Kim¹, Chanoh Park¹, Narayan Bhusal¹, Ah Reum Han², Umashankar Chandrasekaran^{1*}, Hyun Seok Kim^{1,3*}

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology, ³National Center for Agro Meteorology

Environmental and Experimental Botany (2023)

[중요 키워드]

가뭄 경화 (Drought hardening)

가뭄 스트레스 (Drought stress)

식물호르몬 (Phytohormone)

경화 (Hardening)

전사 인자 (Transcription factor)

전사체 (Transcriptome)

1) 논문 목적

- 가뭄 경화(drought hardening: 사전 가뭄 노출)가 묘목의 이식 후 활착과 생존에 미치는 영향을 규명
- 묘목 단계에서의 건조 처리와 순화가 생리적·형태적 특성 변화에 어떠한 효과를 주는지 분석
- 산림 복원 및 조림 현장에서 활용 가능한 효율적 묘목 생산 및 관리 전략을 제시

2) 중요 연구 결과

- 가뭄 경화를 거친 묘목은 비순화 묘목보다 이식 후 생존율이 유의하게 높음
- 가뭄 경화는 증산(수분손실)과 관계된 지상부보다 물을 흡수하는 뿌리 발달을 촉진하여 수분 흡수 능력을 향상시키고, 이식 후 묘목이 손상된 뿌리로 인한 수분 및 양분 흡수 제한에 더 잘 견디게 함
- 가뭄 경화는 영양분 분배 패턴을 변화시켜, 지상부보다 뿌리에 영양분을 더 많이 축적하게 함으로써 뿌리 기능을 강화시킴
- 가뭄 경화 처리된 묘목은 스트레스 호르몬과 관련된 유전자 발현을 높여, 수분 스트레스 상황에서도 안정적인 생리적 반응을 유지하게함

3) 중요 시사점

- 가뭄 경화는 묘목 이식 성공률을 높이는 효과적인 방법으로 활용 가능
- 묘목 단계에서의 순화 처리는 산림 복원 사업에서 장기적인 식재 성공과 생태적 안정성 확보에 기여
- 기후변화로 인한 가뭄 빈도 증가에 대응하기 위해 가뭄 경화 기술은 필수적인 재배·관리 전략이 될 수 있음

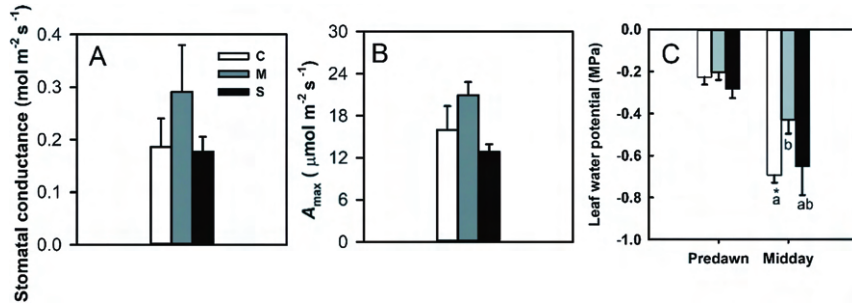


그림67. (A) Stomatal conductance, (B) maximum photosynthetic rate (A_{max}), (C) leaf predawn and midday leaf water potentials after transplanting in 2021. Letters indicate drought hardening levels before transplanting. C, M, and S indicate trees grown under control (100% natural precipitation), moderate drought (40% precipitation blocking), and severe drought (80% precipitation blocking) conditions, respectively, in 2018–2020. Different lowercase letters indicate significant differences in drought hardening effect (Tukey's test; $P < 0.05$).

Long-term drought modifies carbon allocation and abscisic acid levels in five forest tree species

Umashankar Chandrasekaran¹, Kunhyo Kim¹, Siyeon Byeon¹, Woojin Huh¹, Ah Reum Han², Young-Sang Lee², Hyun Seok Kim^{1*}

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology

Journal of Ecology and Environment (2023)

[중요 키워드]

말론디알데히드 (Malondialdehyde)

프로린 (Proline)

근경 (Root collar diameter)

당분 (Sugar)

수목 고사율 (Tree mortality)

1) 논문 목적

- 장기간의 가뭄이 주요 5종 유묘의 탄소 및 질소 동태에 미치는 영향을 규명
- 가뭄 스트레스가 광합성, 생체량 분배, 호르몬 반응 등 생리적 반응에 어떤 변화를 유발하는지 분석
- 산림 생태계에서 장기적인 수분 제한이 물질순환 및 생태 안정성에 미치는 영향을 이해하는 데 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 가뭄에 대한 수종별 내성을 비교한 결과, 구상나무(*Abies koreana*)가 생존, 생장, 엽록소 측면에서 가장 민감하며, 느티나무(*Zelkova serrata*)와 튜올립나무(*Liriodendron tulipifera*)는 보통 수준의 내성을, 스트로브잣나무(*Pinus strobus*)와 느릅나무(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)는 가장 높은 내건성을 보임
- 장기간 가뭄은 수종별 비구조성 탄수화물(NSC) 배분 패턴에 변화를 일으키는데, 특히 내건성이 약한 구상나무와 느티나무에서는 삼투압 조절 및 스트레스 방어를 위해 당(설탕) 함량의 뚜렷한 증가가 관찰됨
- 내건성이 상대적으로 낮은 구상나무, 튜올립나무, 느티나무는 스트레스에 대한 반응으로 앱시스산(ABA) 등의 스트레스 호르몬 함량이 높게 축적됨

3) 중요 시사점

- 장기적인 가뭄은 산림 수목의 탄소 배분과 ABA 반응 같은 생화학적 경로를 조절하여

스트레스 내성에 영향을 미치며, 기후변화 상황에서 가뭄 내성 수준 선정의 중요성을 확인함

- 스트로브잣나무와 느릅나무는 내건성이 높아 장기간의 가뭄에도 적응성이 높음
- 기후변화로 가뭄 빈도가 증가하는 상황에서 본 연구 결과는 산림 생태계의 탄소-질소 순환 이해와 예측에 중요한 기초 자료를 제공

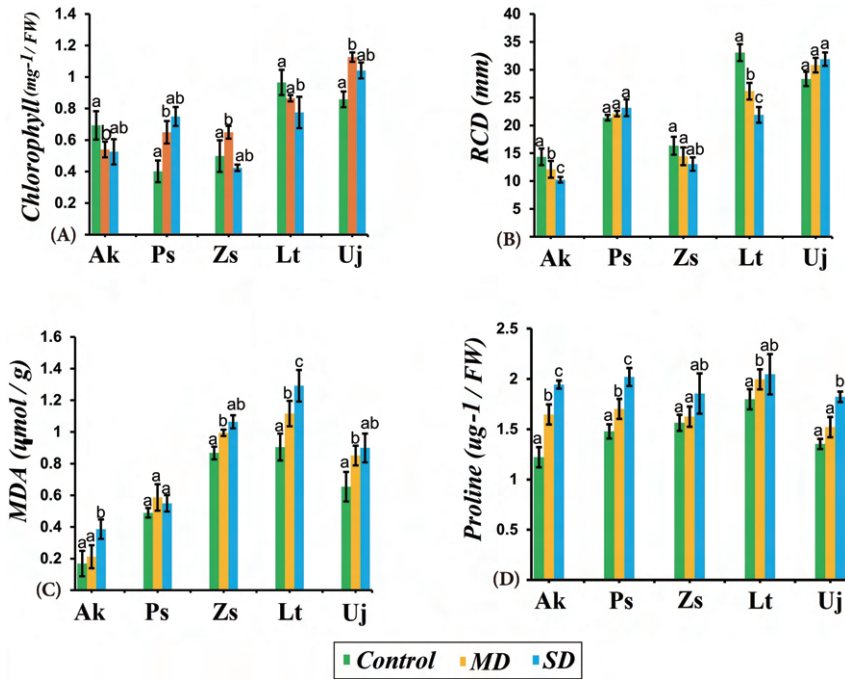


그림68. Morphological and physiological responses of five Korean tree species (A) total chlorophyll content measured from the leaves of control and treatment plants (B) stem diameter studied through the RCD is shown (C) lipid peroxidase activity in leaves expose to 100%; 60% and 20% precipitation (D) variations in the free proline levels are displayed. Different alphabets represent significance in our study. Means with different alphabets denotes statistical significance at $p < 0.05$. FW: fresh weight; RCD: root collar diameter; MDA: malondialdehyde; Ak: *Abies koreana* (Korean fir); Ps: *Pinus strobus* (eastern white pine); Zs: *Zelkova serrata* (keyaki); Lt: *Liriodendron tulipifera* (tulip); Uj: *Ulmus japonica* (Japanese elm); MD: mild drought; SD: severe drought.

Influence of severe drought on mineral nutrient status in eastern white pine (*Pinus strobus* L)

Umashankar Chandrasekaran¹, Siyeon Byeon¹, Kunhyo Kim¹,
Woojin Huh¹, Ah Reum Han², Young-Sang Lee², Hyun Seok Kim^{1,3}

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology,

³National Center for Agro Meteorology

Forest Science and Technology (2023)

[중요 키워드]

가뭄 (Drought)

엽록소 (Chlorophyll)

무기 영양소 (Mineral nutrient)

인 (Phosphorus, P)

칼륨 (Potassium, K)

질소 (Nitrogen, N)

스트로브잣나무 (*Pinus strobus*)

1) 논문 목적

- 본 연구의 목적은 극심한 가뭄이 스트로브잣나무 묘목의 무기 영양분 동태에 미치는 영향을 규명
- 가뭄 스트레스가 영양분 흡수 및 분배 과정에 어떤 변화를 유발하는지 분석
- 기후변화로 인한 극한 가뭄 증가가 산림생태계 영양순환과 수목 생존에 미치는 영향을 이해하는 데 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 극심한 가뭄은 스트로브잣나무 묘목의 주요 무기 영양분(N, P, Mg, K 등) 흡수를 현저히 저해함
- 가뭄으로 인해 수분 및 영양소 흡수와 이동이 제한되면서 잎의 필수 무기영양소 함량이 현저히 감소했고, 결과적으로 엽록소 수준 저하 및 광합성 기능 악화를 초래함
- 가뭄으로 인한 영양분 재분배는 지상부보다 뿌리에 영양소 축적을 증가시켜, 묘목의 뿌리 기능과 스트레스 내성을 강화시킴

3) 중요 시사점

- 극심한 가뭄은 산림 생태계의 영양분 순환을 변화시켜 장기적 안정성에 위협을 가할 수 있음

- 수목은 가뭄 환경에서 뿌리 중심의 영양분 분배 전략을 취하므로 향후 산림 관리와 복원 전략에서 이를 고려해야 함
- 기후변화에 따른 가뭄 빈도 증가에 대응한 산림 생태계 보전 및 지속가능한 관리 전략 수립에 기초 자료를 제공

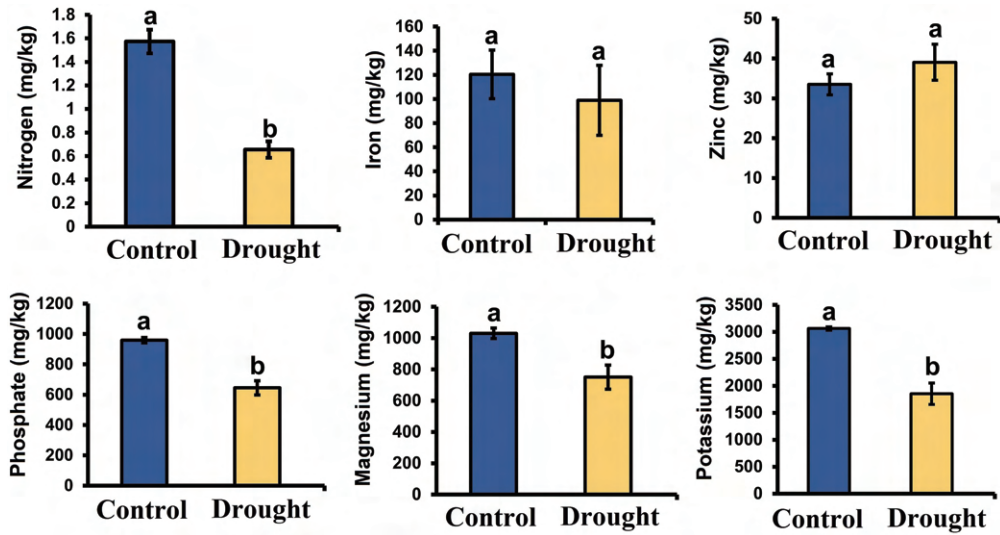


그림69. The results of the elemental analysis of nitrogen, iron, zinc, phosphorous, magnesium and potassium in leaf samples of *P.strobus* seedlings 32 days after severe drought treatment. The values are represented as mean \pm SE.

Waterlogging Hardening Effect on Transplant Stress Tolerance in *Pinus densiflora*

Siyeon Byeon^{1,2}, Seohyun Kim², Jeonghyun Hong², Tae Kyung Kim², Woojin Huh², Kunhyo Kim², Minsu Lee², Hojin Lee², Sukyung Kim², Chanoh Park², Narayan Bhusal^{2,3}, Ah Reum Han⁴, Umashankar Chandrasekaran^{2*}, Hyun Seok Kim^{2,5*}

¹National Institute of Forest Science, ²Seoul National University, ³University of California,

⁴National Institute of Ecology, ⁵National Center for Agro Meteorology

Forests (2024)

[중요 키워드]

침수 스트레스 (Waterlogging stress)

식물호르몬 (Phytohormone)

경화 (Hardening)

전사체 (Transcriptome)

이식 스트레스 (Transplant stress)

1) 논문 목적

- 침수 경화처리가 수목 묘목의 이식 후 활착과 생장에 미치는 영향을 평가
- 침수 스트레스 적응을 통한 뿌리 발달과 생리적 반응 변화를 규명
- 산림 복원과 조림 현장에서 활용 가능한 묘목 생존율 향상 전략을 제시

2) 중요 연구 결과

- 침수 경화처리는 묘목의 이식 후 상처 방어 및 세포벽 강화 등 뿌리 회복과 관련된 유전자 발현을 증가시킴
- 침수 경화처리는 활성산소로 인한 산화적 스트레스에 대응하는 분자적 적응 기작을 유도하여, 식물의 내성을 강화함
- 침수 경화처리 결과, 비구조성 탄수화물이 줄고 옥신 관련 성장 호르몬 유전자의 발현이 낮아져 묘목의 키 성장(수고 생장)이 저하됨

3) 중요 시사점

- 묘목 생산 및 조림시 침수 경화 기술을 적용할 때 생존율 향상과 초기 성장 저해 사이의 균형을 고려해야함
- 산림 복원 및 기후변화로 인한 극한 환경 대응에 활용 가능성이 큼
- 본 연구는 현장 적용 가능한 묘목 관리 및 조림 기술 개선에 중요한 기초 자료를 제공

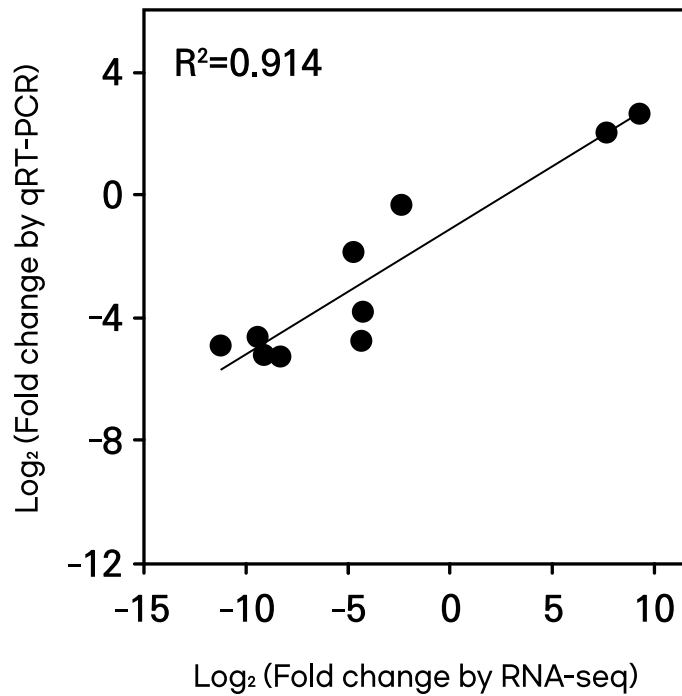


그림70. Validation of RNA-Sequencing results using quantitative real-time PCR (qRT-PCR). Correlation of \log_2 FC value analyzed by RNA-Seq (x axis) with data obtained using quantitative real-time PCR (y axis) in trees grown under waterlogging hardening versus control conditions in transplant stress.

Promotion of cold stress tolerance in transplanted *Pinus densiflora* seedlings after long-term moderate drought hardening

Siyeon Byeon^{1,2}, Seohyun Kim², Jeonghyun Hong², Tae Kyung Kim², Woojin Huh², Kunhyo Kim², Minsu Lee², Hojin Lee², Sukyung Kim², Chanoh Park², Wookyung Song², Ah Reum Han³, Changyoung Oh¹, Umashankar Chandrasekaran^{2*}, Hyun Seok Kim^{2*}

¹National Institute of Forest Science, ²Seoul National University,

³National Institute of Ecology

Forest Ecology and Management (2024)

[중요 키워드]

가뭄 (Drought)

식물호르몬 (Phytohormone)

광합성 (Photosynthesis)

가뭄저항성 (drought resistance)

RNA 염기서열 분석 (RNA-Seq)

1) 논문 목적

- 소나무 묘목의 이식 후 저온 스트레스 내성을 증진시키는 방법을 규명
- 가뭄 경화(적절한 수분 스트레스)처리와 같은 관리 기법이 묘목의 겨울철 저온에 대한 적응과 활착에 미치는 영향을 평가
- 기후변화에 따른 극한 온도 환경에서도 효과적인 산림 복원 전략을 제시

2) 중요 연구 결과

- 사전 가뭄처리 통해 삼투압을 조정하는 용해성 당을 포함한 비구조성 탄수화물의 저장량을 증가시켜 내한성을 높임
- 가뭄 경화(Drought hardening) 처리는 묘목이 뿌리 성장에 자원을 집중하게 하여 줄기-뿌리 비율을 낮추고, 결과적으로 이식 후 수분 흡수 능력을 크게 향상시킴
- 사전 가뭄 경화는 스트레스 반응 호르몬 관련 유전자의 발현을 유도하여, 뿌리 발달 및 수분·양분 활용 효율성을 성공적으로 개선함

3) 중요 시사점

- 사전 가뭄 처리는 소나무 묘목의 생리적, 분자적 특성을 변화시켜 이식 성공률을 높이는

효과적인 방법임을 보여줌

- 기후변화로 인한 극한 온도 조건에서도 산림 복원 사업에 실질적으로 기여 가능
- 본 연구는 묘목 관리 및 저온 적응 기반 조림 기술 개발에 중요한 기초 자료를 제공

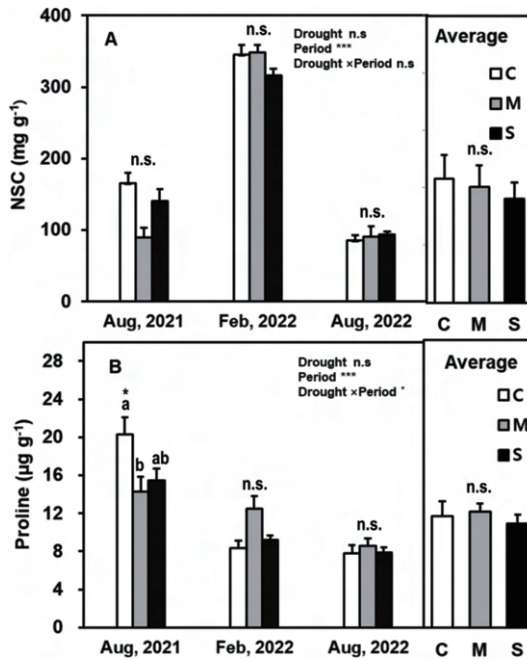


그림71. Bar plot showing (a) NSC, (b) proline in each comparison. C, M, and S indicate transplanted trees grown at 100% natural precipitation, 40% precipitation blocking, and 80% precipitation blocking between 2018 and 2020, respectively. Bar color indicates drought hardening treatment. Asterisk indicates statistical significance (n.s. $P > 0.05$, * $P < 0.05$, *** $P < 0.001$).

Energy deprivation affects nitrogen assimilation and fatty acid biosynthesis leading to leaf chlorosis under waterlogging stress in the endangered *Abies koreana*

Umashankar Chandrasekaran¹, Sanghee Park¹, Kunhyo Kim¹, Siyeon Byeon¹, Ah Reum Han^{2*}, Young-Sang Lee², Neung-Hwan Oh¹, Haegeun Chung³, Hyeyeong Choe¹, Hyun Seok Kim^{1*}

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology, ³Konkuk University

Tree Physiology (2024)

[중요 키워드]

지방산 (Fatty acids)

해당작용 (Glycolysis)

질산염 동화 (Nitrate assimilation)

광합성 (Photosynthesis)

뿌리 침수 (Root flooding)

구상나무 (*Abies koreana*)

1) 논문 목적

- 본 연구의 목적은 수분 스트레스로 인한 에너지 결핍이 식물의 질소 동화 과정에 미치는 영향을 규명
- 질소 대사와 탄소 대사 간의 상호작용을 분석하여 스트레스 조건에서의 대사 조절 메커니즘을 파악
- 에너지 결핍 환경에서 식물의 생장 및 생리적 반응을 이해할 수 있는 기초 자료를 제공

2) 중요 연구 결과

- 수분 스트레스로 구상나무(*Abies koreana*)의 엽록소 함량, 잎 생중량, 당 함량이 감소 등 광합성 저하로 인한 에너지 부족이 나타남
- 뿌리 잠김으로 인한 높아진 활성산소 농도로 지질 과산화물이 증가되는 등 세포막 파괴 등이 발생함
- 에너지 결핍은 질소 환원과 아미노산 합성관련 핵심 유전자 발현을 저해하여 식물의 질소 동화 효율을 감소시키고, 잎의 황화현상의 원인이 됨
- 에너지 및 지질 대사와 관련된 유전자 발현의 변화로 스트레스 대응을 위한 지방산의 생합성이 교란되어 지방산 구성이 변화됨

3) 중요 시사점

- 수분 스트레스는 뿌리 썩음뿐만 아니라 에너지 결핍을 유발하여 질소 동화를 포함한 식물 대사 전반에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 보여줌
- 기후변화와 같은 환경 스트레스 상황에서 식물의 생리적 적응 연구의 중요성이 커지고 있음을 시사
- 본 연구는 작물 생산성 향상 및 스트레스 내성 품종 개발에 필요한 기초적 이해를 제공

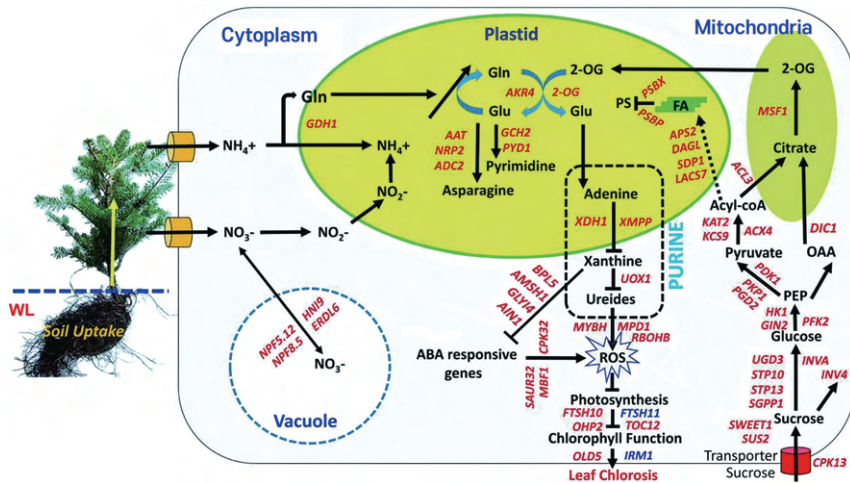


그림72. Overview of the critical genes differentially expressed under waterlogging stress. Genes highlighted in red font denote downregulation and genes highlighted in blue denote upregulation.

Flash drought as possible contributor to seedling dieback in the endangered conifer *Abies koreana*

Umashankar Chandrasekaran¹, Minsu Lee¹, Jiwon Baek¹, Yun-hee Park¹, Ah. Reum Han², Neung-Hwan Oh¹, Hyeyeong Choe¹, Hyun Seok Kim¹

¹Seoul National University, ²National Institute of Ecology

Physiologia Plantarum (2025)

[중요 키워드]

극한 가뭄 (Flash drought)

묘목 고사 (Seedling dieback)

증산 (Transpiration)

기공 전도도 (Stomatal conductance)

구상나무 (*Abies koreana*)

1) 논문 목적

- 극한 가뭄이 구상나무(*Abies koreana*) 묘목의 생리적 반응과 고사 현상에 미치는 영향을 규명
- 묘목이 극한 가뭄에 직면했을 때 나타나는 기공 전도도, 증산, 수분 이용 효율의 변화를 분석
- 기후변화로 인한 극한 기상현상이 묘목 생존율과 산림 재생에 어떤 위협을 주는지를 평가

2) 중요 연구 결과

- 극한 가뭄은 구상나무 묘목의 수분 결핍을 급격히 심화시켜 기공 폐쇄와 증산 저하를 유발하며, 이는 광합성 저해로 이어짐
- 토양수분 고갈이 빠르게 진행될수록 묘목의 생리적 적응 한계가 드러나며, 고사율이 유의하게 증가함
- 극한 가뭄은 장기 가뭄보다 단기간에 더 큰 피해를 초래할 수 있는 중요한 원인으로 확인됨

3) 중요 시사점

- 극한 가뭄은 구상나무 묘목의 생존과 재생에 심각한 위협 요인으로 작용하므로, 산림 관리 전략 수립 시 고려
- 기후변화로 인해 극한 가뭄 발생 빈도가 증가할 가능성이 높아, 조림 및 산림복원

계획에서 묘목의 가뭄 적응력 강화가 필요

- 기후 극한현상에 대응한 산림생태계 회복력 평가 및 적응적 관리 방안 마련에 중요한 기초자료 제공

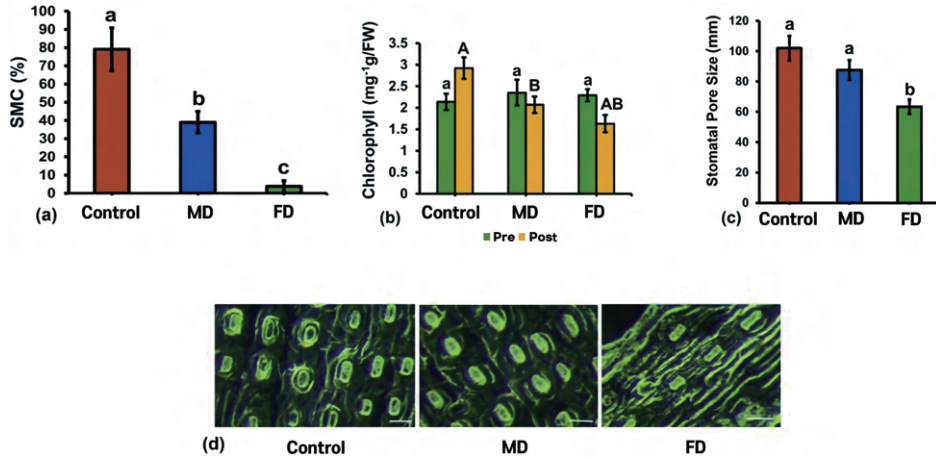


그림73. (a) Soil moisture content (SMC) measured in control, MD- and FD-treated seedlings. (b) Chlorophyll content measured in leaves (pre- and post-treatment). Samples were collected on the 20th day after drought exposure (post-treatment). (c) Stomatal pore size measured using ImageJ analysis (mm). (d) Stomatal pore openings (abaxial) in the leaves of *A.koreana* seedlings exposed to three different conditions (control, MD and FD, 20th day after drought exposure). $n=10$ (number of samples used); Tukey's (least significance) test was used to denote the statistical significance among treatments. SMC-soil moisture content; MD-mild drought; FD-flash drought.

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 대형무척추동물 분포 특성 및 강우가 군집에 미치는 영향 연구. 한국습지학회지, 26(4), 448-456 (2024). <https://doi.org/10.17663/JWR.2024.26.4.448>
- ◆ 김남희, 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, 김흥기. 2017~2018년 말레이즈 트랩을 이용한 남한 내 야생 벌(벌목: 벌아목)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>
- ◆ 안정섭, 정종철, 최세웅. 지리산국립공원의 대형나방 다양성 목록. 국립공원연구지, 7(1), 20-52(2016).
- ◆ 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 국 가장기생태연구지 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>
- ◆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, 이호혜미. 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 자동채버시스템에 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, 김남희. 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 변이. 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>
- ◆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., Franco, 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>
- ◆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, tpae055 (2024). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpae055>
- ◆ 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, Jeju 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>
 - ◆ 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 (2016–2023) 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 Jeju Island, a new saturnid 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/f15122216>
 - ◆ 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 7911 6698 7182
ISBN 979-11-6698-718-2