

Original article

생물기초조사 통합자료를 활용한 우리나라 식물종 풍부도 분석

홍승범 · 오지은 · 차재규 · 이경은*

국립생태원 기후생태연구실

Plant Species Richness in Korea Utilizing Integrated Biological Survey Data. Seungbum Hong (0000-0002-1163-7045), Jieun Oh (0000-0001-9890-9957), Jaegyung Cha (0000-0002-1661-6841) and Kyungeun Lee^{1,*} (0000-0003-1493-5360) (Division of Climate & Ecology, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea)

Abstract The limitation in deriving the species richness representing the entire country of South Korea lies in its relatively short history of species field observations and the scattered observation data, which has been collected by various organizations in different fields. In this study, a comprehensive compilation of the observation data for plants held by agencies under the Ministry of Environment was conducted, enabling the construction of a time series dataset spanning over 100 years. The data integration was carried out using minimal criteria such as species name, observed location, and time (year) followed by data verification and correction processes. Based on the integrated plant species data, the comprehensive collection of plant species in South Korea has occurred predominantly since 2000, and the number of plant species explored through these surveys appears to be converging recently. The collection of species survey data necessary for deriving national-level biodiversity information has recently begun to meet the necessary conditions. Applying the Chao 2 method, the species richness of indigenous plants estimated at 3,182.6 for the 70-year period since 1951. A minimum cumulative period of 7 years is required for this estimation. This plant species richness from this study can be a baseline to study future changes in species richness in South Korea. Moreover, the integrated data with the estimation method for species richness used in this study appears to be applicable to derive regional biodiversity indices such as for local government units as well.

Key words: Indigenous species, Plant species survey, Data integration, Species richness mode

서 론

생태계 조사 결과는 다양한 환경변화에 대한 생태계의 영향을 진단하고 분석하는 데 매우 중요한 정보이다. 특히, 최근 기후변화가 생태계에 미치는 영향에 대한 관심이

높아짐에 따라, 기후변화와 생태계 요소 간 과학적인 영향관계를 규명하고 이를 통해 미래 기후환경변화에 따른 생태계 및 생물다양성의 변화를 예측하는 것이 필요하다 (Urban *et al.*, 2016). 이러한 연구는 생태계 보전지역, 기후변화 취약 생태계 선별 및 관리 등의 실질적인 국가 생태계 보전 정책들을 개발하는데 매우 중요한 과학적 기초 정보가 되기 때문이다. 생태계에 미치는 기후변화의 영향 연구를 위해서는 조사자료 기반으로 현재 생물종 분포에 대

Manuscript received 8 November 2023, revised 11 December 2023,
revision accepted 13 December 2023

* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5362
E-mail: kelee@nie.re.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

한 정확한 현황을 진단하는 것이 우선시된다(Chang *et al.*, 2021).

실제 조사자료를 기반으로 한 국내 생태계 현황은 대부분 지역 단위로 연구되거나 일부 생물종(예, 멸종위기종, 기후변화취약종 등)을 대상으로 연구하는 경우가 많다(Kwon *et al.*, 2020). 또한 종분포 모형을 활용하여 생물종의 전국 분포를 연구한 선행연구도 있다(Kwon *et al.*, 2012; Do *et al.*, 2017; Shin *et al.*, 2018). 그러나 전국에 조사된 모든 생물종 자료를 활용하여 실제 생태계 현황을 파악한 경우는 거의 없는데, 이는 두 가지 문제 때문이다. 첫째는, 우리나라는 체계적인 전국 생물종 분포자료 수집 역사가 매우 짧은 점이다. 선진국에서는 이미 수년 전부터 흩어져 있는 다양한 과거 생물 조사 자료들을 통합하여 국가 수준의 장기적인 생물상 변화 자료를 구축해왔다(Wiser *et al.*, 2001).

우리나라 전 국토를 대상으로 체계화된 생물종 조사 사업이 본격적으로 시작된 시기는 환경부의 제3차 전국자연환경조사(National Ecosystem Survey in Korea, NESK)가 이루어지던 2006년부터라 할 수 있다(National Institute of Ecology, 2017). 전국자연환경조사는 국토 및 자원의 효율적인 이용과 자연보전을 위한 전국의 기초자료를 생성하기 위해 1986년부터 시작되었으나, 표준화된 조사 방식은 3차 사업부터 이루어졌다. 즉 현재 5차 조사가 진행 중이긴 하나, 체계적인 조사가 완료된 사업은 3차, 4차 2개뿐으로, 15년(2006~2018) 채 되지 않은 전국 생물종 자료를 이용할 수밖에 없다는 한계가 있다. 이러한 시간적인 한계를 극복하기 위해, 자료가 공개된 2차 사업(1997~2005)의 조사자료까지 포함하더라도 최소 30년 이상의 자료를 요구하는 기후변화의 영향을 분석하기에는 데이터의 가용 기간이 너무 짧다. 그러나 전국자연환경조사 외에 국지적인 조사자료와 생물 표본 자료처럼 조사자료가 아니지만 자료 통합에 필요한 적절한 정보(수집 시기, 위치 등) 추출이 되는 자료가 있다면, 우리나라의 생물종 자료 수집 기간이 짧은 한계를 보완하는 데에도 도움이 될 수 있을 것이다.

둘째는, 생태계 조사 정보들이 여러 유관기관들에 흩어져 있다는 점이다. 우리나라는 정책 추진 특성상 정부 부처 및 담당 기관에 부여된 업무 특성에 따라 고유한 관리 분야 또는 영역이 정해져 있어, 기초 생태계 조사 사업 또한 그 고유업무 특성에 따라 분리되어 독립적으로 추진되는 경향이 있다. 단적인 예로, 환경부 산하 국립생태원(National Institute of Ecology, NIE)에서 추진하는 전국자연환경조사 사업이 전국을 대상으로 추진되는 사업이긴 하지만, 일부 지역은 조사 대상에서 제외된다. 대표적

으로 우리나라의 주요 자연환경보호 지역인 국립공원지역(제주도 한라산 국립공원 미포함(Shin, 2016))하고 국립공원공단(Korean National Park Service)에서 따로 자연자원조사 사업(Korea National Park Research Institute, 2019)을 하고 있다. 국립공원은 멸종위기야생생물, 희귀생물 등이 서식하는 비율이 높은 우리나라의 핵심 생태계(ecological hotspot)일 가능성이 매우 높아 전국적인 생물종 분포 및 생물다양성 정보 도출을 위해 빠져서는 안 되는 지역들이다. 이 외에도, 멸종위기 야생생물 전국 분포조사(Ministry of Environment and National Institute of Ecology, 2022), 습지식물 분포 조사 사업(National Institute of Ecology 2022), 비무장지대(Demilitarized Zone, DMZ)의 생태계 조사(Ministry of Environment and National Institute of Ecology, 2021), 철새조사 사업(Korea National Park Research Institute, 2017; National Institute of Biological Resources, 2020; National Institute of Biological Resources, 2022) 등도 별도로 추진되고 있다. 특히, 멸종위기야생생물이나 기타 희귀생물들의 경우는 전국자연환경조사처럼 공간적으로 균등 분할된 형태의 체계화된 조사 방법으로는 수집하기 어려우며, 통계적으로 유의한 분포 분석을 위해서는 최대한 흩어져 있는 자료를 수집하여 표본수를 늘리는 것이 필요하다(de Caprariis *et al.*, 1981)

그러므로 현재 생태계의 실질적인 현황을 진단하고 미래 기후변화 하에서 생태계가 어떻게 변화될 것인가를 정확히 예측하기 위해서는 앞에서 제기된 두 가지 문제점을 해결해야한다. 이를 극복할 수 있는 방법은 각 부처 및 유관기관, 학계, 지자체, 사설 연구소 등에 흩어져 있는 정보를 수집하고 통합하는 것이다. 비록, 각 자료들의 수집 방법들이 서로 달라, 자료 간 물리적 융합에 한계가 있긴 하나, 자료 간 최소한의 공통 요소를 기준으로 적절한 통합 방법만 적용된다면, 전국 생물종 분포 및 생물 다양성 현황 정보 등 우리나라의 중요한 기초 생태정보 도출이 가능할 것으로 판단한다. 생물종 자료의 시공간적 한계가 있음에도 불구하고, 지금까지 구축된 전국자연환경조사 사업의 자료들로 종분포 모형을 활용하여 기후변화 영향연구에 활용한 사례들은 많다(Park *et al.*, 2019, 2023; Park and Won, 2021; Kim *et al.*, 2022). 이들은 모두 전국자연환경조사자료의 생물종별 공간적 분포 정보와 지역별 기후요소의 분포 정보 간의 통계적 상관성을 기반으로 잠재적 서식지 정보를 도출하였다. 더 나아가 이를 통한 종별 기후변화 요소에 대한 민감도 분석(Park *et al.*, 2015)과 잠재서식지 변화 예측까지도 수행하였다(Park *et al.*, 2019, 2023; Park *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2022). 전국자연환경조사 외의 유관기관의 자료까지 모두 통합하여 데이터의 수집기간

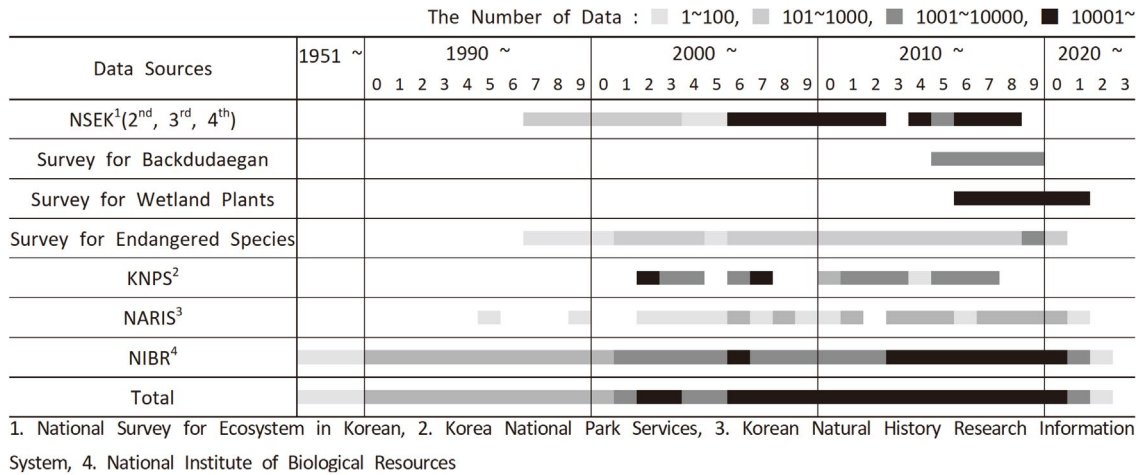


Fig. 1. The number of plant species observation data from the data sources.

과 표본을 늘릴 수 있다면, 모델을 통해 예측한 잠재서식지의 공간적 변화의 정확도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 실질적인 생물종의 서식지 이동, 적응 상황, 취약성 변화 등에 대한 정보까지 도출할 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 산재하고 있는 기초 생물종 조사자료를 수집 및 통합하여 우리나라의 전국 생물 분포 현황 도출의 한계들이 해결 가능한지 진단해 보고, 순수한 조사 자료에 기반한 우리나라 생물종 다양성 현황을 도출해 보고자 하였다. 이를 위해, 시범적으로 식물종을 대상으로 국립생태원, 국립공원공단, 국립생물자원관(National Institute of Biological Resources, NIBR) 등 환경부 산하 유관 기관들이 보유한 자료들을 최대한 수집하고, 물리적 통합하여 우리나라의 전국 식물종 다양성 정보 도출을 시도하였다.

자료 및 방법

1. 데이터 통합에 활용된 식물종 조사 자료

본 연구에서 사용한 조사자료는 전국자연환경조사(2~4차), 백두대간 정밀 조사사업, 내륙습지(기초, 정밀)조사, 멸종위기 야생생물 서식실태 조사, 국립생물자원관의 표본자료, 국립공원공단의 자연자원조사사업, 및 국가자연사 연구종합 정보시스템 자료이다(Fig. 1).

우리나라 전국을 대상으로 체계화된 방식의 생태계 조사를 진행 중인 사업은 전국자연환경조사가 대표적이다. 전국자연환경조사는 자연생태계 보전 사업 시행을 위한 기본자료를 삼을 목적으로 1986년에 시작하였다(Ministry

of Environment, 1986). 해당 사업을 통해 수집된 자료는 우리나라 국토개발계획 수립 시 자연환경 훼손을 최소화하기 위해 참고자료로 쓰이는 생태자연도 제작에 쓰이고 있으며, 생태우수지역들을 발굴하여 보호지역으로 지정하는 데에도 활용된다(National Institute of Ecology, 2017). 제1차 전국자연환경조사는 행정구역으로 공간적인 조사 단위를 설정하고 현지조사와 청문조사를 통해 추진되었는데, 사업 기간은 1986년부터 1990년도까지이며, 육상생물상 조사의 경우 대부분 청문조사 형식으로 진행되었다(Kim *et al.*, 2013). 현재 1차 사업 자료는 아직 전산화되지 않아 본 연구에서도 포함하지 않았다. 제2차 전국자연환경조사의 추진 기간은 1997년부터 2005년이며, 1차 사업의 조사방식의 한계를 개선하고자 전국을 산 중심의 대권역(11개), 소권역(206개)으로 구분하고, 소권역을 최소 단위로 조사하였다. 소권역 중 핵심 조사 지역 99개를 선별하고, 다시 4~7개로 세분화된 지역 대상으로 정밀조사를 하였다(Ministry of Environment, 1997). 제3차 사업은 2006년부터 2012년까지 수행되었으며, 2차 때와는 달리, 1:25000 지형도로 구분된 전국 824개 도엽(약 12.5 km × 12 km 면적)을 최소 조사 공간 단위로 설정하고, 각 도엽을 다시 9개의 격자로 세분(약 4.2 km × 4.2 km 면적)하여, 2차 조사와 비슷한 방식으로 핵심지역은 정밀조사(4~7개의 세분화된 지역)를, 일반조사지역은 9개 격자 구분지역 중 1개 지역만을 대상으로 대표조사가 이루어졌다. 제4차 사업은 3차 사업과 동일한 공간적 구분 방식과 동일한 조사 방식이 적용되었으며, 2014년부터 2018년까지 5년간 수행하였다. 이때부터 전국자연환경조사는 5년 단위로 추진되기 시작했고, 이전 사업과 달라진 점은 수생태계 조사가

도엽단위가 아닌 유역단위로 구분하여 수행되었다는 점이다.

해당 사업에서 수집된 자료들 중 본 연구를 위해 활용된 자료는 최근에 완료된 제4차 사업 자료를 포함하여, 제2차 및 제3차 자료이며, 국립생태원이 운영하는 에코뱅크(www.nie-ecobank.kr)를 통해 확보하였다. 현재 제5차 사업이 진행 중이며 전국 조사가 완료되지 않아 본 연구에는 포함하지 않았다.

우리나라의 핵심적인 야생생물 분포와 그들의 이동통로로써의 생태계 연결성을 상징하는 백두대간을 조사하는 사업이 있다. 백두대간이란 우리나라 한반도의 산맥을 남북으로 잇는 산림생태계 중심축을 지칭하는 말로서, 우리나라의 멸종위기 야생생물 및 희귀생물의 주요한 서식처이다. 환경부는 「자연환경보전법」시행령 제52조 제2항과 「백두대간보호에 관한 법률」제4조에 근거하여 백두대간에 대한 생태계의 현황을 진단하고 시계열적 변화해석 및 평가 등을 위해 2006년부터 정밀조사를 실시하였으며(National Institute of Ecology, 2017), 현재는 2차 조사(2015~2019년)까지 마무리되었다. 조사는 백두대간을 5개 조사 구간으로 구분하고 5년 주기로 이루어지는데, 백두대간에 포함되는 국립공원지역은 조사지역에 포함되지 않는다(Ministry of Environment and National Institute of Ecology, 2017). 그리고 1차 조사자료는 아직 전산화가 되지 않아 2차 조사자료만 본 연구에 활용하였다.

또한 생물다양성 측면에서 매우 중요한 생태계 중 하나인 습지를 조사하는 사업이 있다. 우리나라는 「습지보전법」 제정 이후 습지에 대한 기초 조사와 내륙습지 목록을 구축하고 있다. 이를 기반으로 습지와 그 생물다양성 보존을 위해 습지보호지역을 지정하고 관리하고 있으며, 보전 및 정책 등에 활용하고 있다(National Institute of Ecology, 2023a). 사업 중에는 내륙습지 기초조사, 내륙습지 정밀조사, 습지보호지역 정밀조사가 있다. 내륙습지 기초조사는 전국의 습지를 목록화 하고 일반습지의 보전과 정책 지원을 위해 자료 구축을 하는 사업이며, 내륙습지 정밀조사는 습지보호지역 지정 및 탐사르습지 등록 등 생태우수습지에 대한 체계적인 보전 및 관리 지원과 중점 관리 요소 도출을 통한 습지보호지역의 체계적인 보전 및 관리를 지원하기 위한 사업이다(National Institute of Ecology, 2023b). 본 연구에서는 2016년부터 2021년까지의 내륙습지(기초, 정밀)조사 자료를 사용하였다.

우리나라는 「야생생물 보호 및 관리에 관한 법률」에 따라 멸종위기 야생생물과 그 서식환경을 보호하고 있다. 이들을 보호하기 위해서는 서식상태, 위치 등 현황 파악이 필요하다. 현재는 국립생태원에서 동법 제6조(야생생물 등

의 서식실태 조사)에 의거하여 전국의 멸종위기 야생생물의 서식실태를 정밀하게 조사하고 있다. 해당 자료는 비공개 자료로 국립생태원의 멸종위기종복원센터의 협조를 통해 확보하였다.

생물종 분포에 대한 과거 자료 수집을 위해 국립생물자원관이 보유하고 있는 생물종 표본 자료를 국립생물자원관의 협조를 통해 확보하여 본 연구에 포함하였다. 국립생물자원관의 표본 자료는 2007년 자원관이 개관하면서 전국자연환경조사 등을 통해 확보된 환경부 표본과 생물학계 원로교수 등의 기증표본을 정리한 표본과 2008년부터 2017년까지 “국가 생물종 확증표본 시스템 구축” 사업을 통해 수집한 표본자료, 그 밖에 조사사업 등으로부터 수집한 자료로 1900년대 초까지 거슬러 올라간다(National Institute of Biological Resources, 2008, 2009, 2013).

우리나라의 주요 보호지역인 국립공원지역의 생태계 현황 조사는 국립공원공단의 자연자원조사사업을 통해 이루어진다. 해당 사업은 「자연공원법」 제36조 및 동법 시행령 제27조에 근거하여 진행되는데, 1차는 1991~1999년, 2차는 2000~2009년, 3차는 2010~2018년에 수행되었다(Korea National Park Research Institute, 2019). 1차 사업은 19개 공원, 2차 사업은 20개 공원(경주국립공원 포함), 3차 사업은 21개 공원(무등산 및 태백산국립공원 포함, 한라산 제외)에서 실시되었다. 본 연구에서는 2차 및 3차 사업을 통해 수집된 자료를 국립공원공단으로부터 협조 받아 활용하였다. 단, 한라산국립공원(3차 자연자원조사사업부터 제외)은 제주도 세계유산본부의 관리 구역으로 본 연구에서는 해당기관의 조사 자료는 포함하지 않았다.

추가적으로 지역별 자연사박물관, 각 대학 자연사박물관, 지자체 및 국립 과학관 등 38개의 기관에서 보유 중인 생물종 표본 및 관찰 정보를 제공받아 통합된 형태로 정보를 제공하고 있는 국가자연사 연구종합 정보시스템(Korean Natural History Research Information System: NARIS) 자료도 본 연구에 포함하였는데, 이는 국제박물관협회(International Council of Museums: ICOM) 및 세계생물다양성정보기구(Global Biodiversity Information Facility)기준에 따른 표준자연사 데이터 베이스 시스템이다. 해당 자료는 시스템을 운영중인 국립과학관의 협조를 통해 확보하였다.

앞에 열거된 생태계 조사 사업들 및 관련 기관들을 통해 확보된 자료는 Fig. 1과 같으며, 전국자연환경조사 자료를 포함하여 총 7개 사업 또는 기관들의 자료가 수집되었다. 데이터는 1951년부터 2022년까지 있으며 이 중 2000년대 후반부터 2020년대 초까지의 데이터가 가장 많았다.

Table 1. Example of correcting errors in species and location data

	Error cases	Error examples	Edit	Result
Plant species	Recorded as the Korean name (common name)	가죽나무	Correction to the Korean name	가중나무
	Recorded as the Korean name (synonym)	참고추냉이		미나리냉이
	Miss match between Korean name and Scientific name error	<i>Disporum ovale</i> Ohwi (금강애기나리)	Correct name	<i>Streptopus ovalis</i> (Ohwi) F. T. Wang & Y. C. Tang (금강죽대아재비)
	Typing mistake	<i>Amethystea caerulea</i>	Edit scientific names	<i>Amethystea caerulea</i>
Geographical location info.	Input error in degree	28°30'21"N	Correction based on administrative address	38°30'21"N
	Input error in minute	35°202'3"N	Format correction based on administrative address	35°20'23"N
	Input error in second	36°30'821"N	Uneditable	Replace administrative address

2. 자료 통합 및 보정

다양한 조사 목적과 방식으로 수집되었던 자료들을 통합하기 위해서는 통합의 기준이 되는 공통 항목을 정할 필요가 있다. 자료마다 다양한 생태환경 정보들이 포함되어 있지만, 대부분 표준화된 정보는 아니기 때문에, 최소한의 공통 정보만으로 통합을 시도하였다. 본 연구의 자료 통합 목적이 전국 식물종 다양성 현황 분석임을 감안하여 종명, 자료 수집 위치, 및 연도만을 통합 기준으로 삼았다. 수집된 자료마다 현재는 이명이 된 종명도 존재하고, 학명이나 국명에 오타가 있는 경우도 있었다. 이를 통합하기 위해 본 연구에서는 국립생물자원관의 “국가생물종목록(2021)”을 종명 기준으로 하였다. 이 기준에 의하면 우리나라 공식 관속식물종 수는 총 4,606종이다. 여기에는 재배식물, 외래식물 등도 포함되어 있는데, 우리나라의 고유 토착야생식물만을 분석하기 위해 국립생태원에서 공개한 외래종 및 재배종 목록(National Institute of Ecology, 2021)을 준용하여 해당종은 분석에서 제외하였다. 종별 조사 위치 정보는 경위도 좌표를 기본으로 하였으며, 오래된 자료(특히, 국립생물자원관의 표본자료)의 경우 행정주소 정보만 있는 사례가 많아, 이 경우 해당 행정구역(읍, 면, 동 수준)의 중심 경·위도 좌표를 추출하여 위치 정보로 대체하였다. 조사 시기에 대한 기준은 국립생물자원관의 표본자료 수집 시기가 실제 식물종 채집 시기와 일치하는지에 대한 불확실성으로 인해 연 단위만으로 기준을 삼았다. 한편, 종별 조사 위치의 개체수 정보는 자료마다 조사 방식이 달라 통합 항목에서 배제하였다.

종명의 통일은 국가생물종목록(2021)과 자료의 국명 또는 학명을 비교하여 진행하였으며, 그 두 정보 모두 목록에 존재하지 않는 경우는 통합에서 제외하였다. 일반명, 이명, 원기재명은 정명으로 보정하였으며, 오타로 판단되는 국명이나 학명은 보정하여 통합하였다(Table 1).

위치 정보는 위도와 경도 정보를 기준으로 표준화하였다. 하지만, 아주 오래된 표본정보 같은 경우, 위·경도 정보가 누락되기도 하였으며, 오기에 따른 위치정보 오류 사례도 아주 많았다. 함께 제공된 주소정보를 활용하여 보정 작업을 진행하였다(Table 1). 즉, 제공된 위·경도 정보를 최우선으로 하되, 함께 제공된 주소 정보와의 비교를 통해 위·경도 정보의 정합성을 판단하고, 적합하지 않다고 판단될 경우, 주소지 기반의 위·경도 정보(행정구역 내 중심좌표)를 부여하였다. 주소지 기반의 위·경도 정보는 전체 주소 정보를 활용하였으나, 부정확한 경우는 자료통합에서 제외하였다. 위의 방식으로 보정된 자료들을 자료간의 중복된 경우를 제외하고 최종 통합DB로 구축하였다.

3. 종 풍부도 예측

본 연구를 통해 구축된 식물종 통합자료는 종별 개체수 정보를 포함하고 있지 않기 때문에 Shannon Index와 같은 생물다양성지수 도출은 불가능하다. 국립생물자원관의 표본정보의 경우 개체수 정보는 제공되지 않고 있으며, 단순히 동일 종에 대한 동일지역, 동일시기의 자료수를 개체수 정보로 보기는 어렵다. 종 풍부도(Species richness)는 모든 지역의 생물종을 조사할 수 없기 때문에 대표적인 표본조

사 지역을 선정하여 풍부도를 구한다. 하지만 이렇게 구한 종 풍부도는 실제 풍부도값보다 낮으며, 이를 보정하기 위해 다양한 방법들이 고안되었다(Vavrek, 2011). 종 풍부도를 구할 때 사용되는 데이터는 두가지로 구분되는데 첫번째는 어떤 집단에서 출현한 각 종을 단순히 존재하는 것으로 표시하는 출현율 데이터와 두번째는 어떤 집단에서 어떤 종이 얼마나 있는지 수도(개체수 등)를 측정할 데이터이다(Magurran and McGill, 2011). 본 연구에서는 종의 출현정보만으로 산출 가능한 Chao2 종 풍부도 지수를 활용하였다.

본 연구에서 구축한 통합자료는 우리나라 전국을 대상으로 한 조사 자료라 가정하고, 반복되는 횟수를 시간에 대한 함수(1년, 3년, 5년 등의 설정된 시간의 길이에 따른 누적 자료)로 설정한 뒤, 그에 따른 수집자료 수와 출현 종 수와의 관계 분석을 통해 풍부도를 계산하는 방식을 시도하였다. 이는 우리나라의 이론적 식물종 풍부도뿐만 아니라 이를 위해 필요한 최소 누적 기간을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 수집 자료수와 출현 종수 간 적합 관계 모형을 도출하기 위해, 여러 누적 기간(1년, 2년, 5년, 10년, 20년 등)별 총 수집 자료수 및 출현 종 수를 계수하고, Chao 2 식(Gotelli *et al.*, 2011)을 이용하여 각 시기별 식물종 풍부도를 예측하였다. 특정 시기(t)의 Chao 2를 이용한 종 풍부도($S_{Chao2 \cdot t}$) 산정 방식은 Equation 1과 같다. $S_{obs \cdot t}$ 는 t 시기에 관찰된 종의 수, m_t 는 t 시기에 수집된 총 자료수(전체 샘플 크기)이며, q_1 는 한 번만 출현한 종수, q_2 는 두 번 출현한 종수이다. 이는 한 군집에서 표본을 조사할 때 희귀종(rare species)이 계속 나온다면 아직 발견되지 않은 희귀종이 더 있을 수 있고, 모든 종이 두 번 이상 나온다면 더 이상 발견되지 않을 가능성이 높다는 것을 가정한 식이다(Vavrek, 2011).

$$S_{Chao2 \cdot t} = S_{obs \cdot t} + \left(\frac{m_t - 1}{m_t}\right) \frac{q_1 \cdot t (q_1 \cdot t - 1)}{2(q_2 \cdot t + 1)} \quad (1)$$

각 누적기간별 계수된 출현 종수와 Chao2 모델로 도출한 종 풍부도 값과의 상관계수 및 평균 제곱근 오차(Root mean square error)를 통해 통계적 유의성을 판단하였으며, 모델 결과값들 간의 유효차를 활용한 교차검증 후 최적의 자료 누적기간과 종 풍부도 모델을 도출하였다.

결과 및 고찰

1. 전국 식물종 조사자료 통합 결과

자료 보정 및 중복자료 제거 후 최종 구축된 통합자

Table 2. The number of data in pre-processed and post-processed (final integration) datasets

Project names	NIE ¹				Survey of Backdudaegan	Survey of inland wetland	Specimen	KNPS ³	NARIS ⁴		Integrated
	2 nd	3 rd	4 th	Survey of natural resources					Species observation	Specimen	
Survey periods	1997~2005	2006~2013	2014~2018	2015~2019	2016~2021	1885~2021	2002~2021	2014~2020	1995~2021	1997~2020	1885~2021
N. data collection	2,261	204,341	194,322	18,097	206,755	354,953	193,451	3,610	26,096	8,479	1,212,365
N. location error	20	1,244	-	-	1,466	107,934	11,974	721	2,720	1	126,080
N. species name error	195	7,492	5,244	392	98	41,733	11,758	497	2,218	182	75,809
Corrected N. location info.	20	1,244	-	-	962	103,000	11,964	505	2,170	0	119,865
Corrected N. species name	179	6,248	4,745	359	72	32,599	6,180	145	973	182	51,682
N. data acquisition	2,245	203,097	193,823	18,064	206,225	340,885	181,863	3,042	24,301	8,478	1,184,317
Final acquisition after the data Integration (Excluding Redundant Data)											
1,106,316											

1. National Institute of Ecology, 2. National Institute of Biological Resources, 3. Korea National Park Services, 4. Korean Natural History Research Information System, 5. National Survey for Ecosystem in Korea

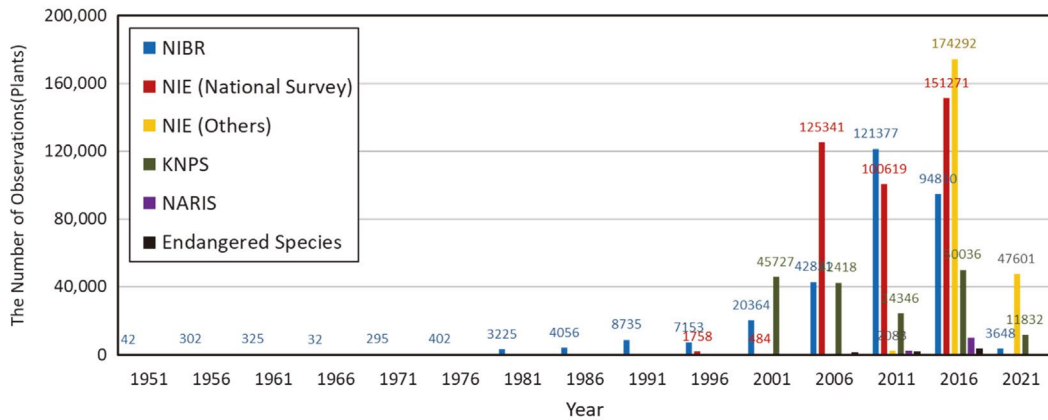


Fig. 2. The count for each dataset spans approximately 70 years (with each bar representing a 5-year total). The provided numbers signify the precise count of plant observations. NIBR: National Institute of Biological Resources, NIE: National Institute of Ecology, KNPS: Korea National Park Services, NARIS: Korean Natural History Research Information System.

료 수는 총 약 1.2백만 개이다 (Table 2). 보정 작업을 거친 대부분의 자료들이 원자료 수 대비 90% 이상의 수율 (Acquisition/Data availability)을 보이고 있지만, 국립생물자원관 및 국가자연사 연구종합 정보시스템의 표본자료들의 경우는 상대적으로 수율이 낮다. 이는 자료수집 시기가 오래된 것일수록 생물종 동정에 대한 불확실성이 크고, 조사정보를 수기로 작성함으로 인한 기입오류 사례가 많이 발생했기 때문으로 보인다.

통합자료는 국립생물자원관 표본자료로 인해 100년 이상(1885년~)의 기간이 확보되었으나, 본격적으로 전국 식물종 분포 조사가 이루어진 시점은 2000년대 이후인 것으로 나타났다 (Fig. 2). 2000년대 이전 자료는 대부분 국립생물자원관에서 소장하고 있는 표본자료로 1920년대 후반 (약 450여 개) 한차례, 그리고 1950년대 이후 자료수가 서서히 증가하기 시작하여, 2000년대 이후부터 자료수가 급격하게 증가하였다. 1950년대 이전 일제강점기 시기에는 우리나라 산림을 벌채하여 수탈해가기 위한 목적으로 대부분 임목의 수확표나 형수(形數) 중심의 연구가 진행되었으며 대부분 일본 및 서양학자들이 우리나라 생물상에 대해 조사하고 자료를 수집하였다 (Kim, 2004). 해방 이후 수집한 자료와 표본 등을 본국으로 가져갔으며, 우리나라는 6.25전쟁으로 산림이 초토화되었다. 하지만 이후 외국에서 유학하던 우리나라 학자들이 입국하면서 서서히 연구활동이 증가하였다 (Kim, 2004). 또한 황폐화된 자연을 회복시키기 위해 정부주도로 1960년대에는 숲 보호, 1970년대에는 치산녹화, 2001년에는 지속가능한 산림경영 산림정책을 도입하여 산림을 보호하고 복원하면서 안정화되기 시작했다 (Lee, 2015). 이후 국립공원의 자연자원조사가 시작되고, 2006년부터 국립생물자원관이 우리나라 생물자원에

대한 주권 회복 및 확보를 목적으로 전세계로 반출된 생물 표본을 확보하면서 (Bae *et al.*, 2021) 자료수가 대폭 늘어나기 시작한 것으로 보인다. 또한, 2006년부터 국립생태원의 자료가 대폭 증가하기 시작하는데 이는 전국자연환경조사 3차 시기와 맞물린다. 또한, 2016년도부터 시작된 전국 습지식물 분포 조사로 또 한차례 자료수의 대폭 증가가 이루어졌다.

조사된 정보에 따라 매해 기록된 식물종 수 또한 조사 자료수의 증가와 함께 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 3(a)). 외래종과 재배종을 제외한 토착종만을 대상으로 보았을 때, 새롭게 기록되는 식물종 수는 1920년대 후반에 한차례 약 300여 종의 종 정보가 수집된 이후, 1980년대 이전까지는 크게 증가하지 않다가, 1980년대 이후부터 새로운 식물종 기록 수가 다시 증가하기 시작한다. 이러한 증가는 2010년대부터 다시 서서히 줄어들며, 최근 들어서는 전체 기록되는 식물종 총 수가 수렴하는 경향을 보인다. 물론, 2019년부터 5년간 진행되는 제5차 전국자연환경조사 자료가 포함되지 않았지만, 새롭게 기록되는 종 수가 줄어드는 것을 보아 더 이상의 신규 기록 종은 거의 나타나지 않을 것으로 판단된다. 즉, 외래종과 재배종을 제외하고, 토착종으로서 우리나라에 관찰되는 식물종 최대수는 2020년 기준 3,316종이며, 이는 향후 제5차 전국자연환경조사 자료가 포함되면 소폭 증가할 수 있다. 한편, 통합자료에 포함된 우리나라의 외래종과 재배종의 자료수 (Fig. 3(b))를 보면, 재배종의 경우 1970년대 이후부터 전체 자료수 대비 비슷한 비율로 수집되었던 것으로 나타났지만, 외래종은 그 비율이 시간에 따라 점점 증가하는 것으로 보인다. 이는 국립생태원에서 수행하는 외래생물 실태조사 사업의 자료를 포함하지 않았다는 것을 감안하면, 야외 조

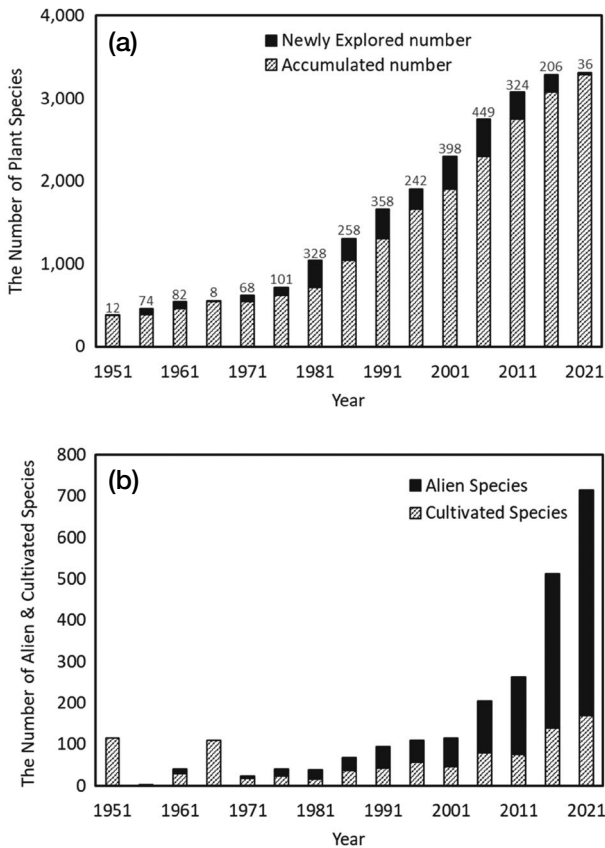


Fig. 3. (a) The cumulative count of indigenous plant species (the indicated numbers represent newly explored ones) and (b) the count of alien and cultivated plant species explored every five years since 1951.

사 당시 외래종의 발견 횟수가 점점 증가하는 것으로 볼 수 있으며, 결국 국내 유입되는 외래종의 지속적인 확산을 의심케 한다.

우리나라 국가생물종목록의 식물종 총 4,606종 중 통합자료에 기록되지 않은 식물종은 총 600종이며, 과거에는 조사 기록이 있었으나, 최근 10년(2010년 이후) 동안 관찰되지 않은 식물종은 총 129종이다. 이 중 멸종위기 야생식물로 지정된 종은 “암매(*Diapensia lapponica* var. *obovate*)” 1종으로, 나머지 종은 원래 국내에 자생하는 종이 아니거나, 이미 멸종했을 가능성이 의심되는 종 들일 수 있다. 특히, 등포잎가래(*Potamogeton octandrus* var. *miduhikimo*), 좁은잎말(*Potamogeton alpinus*), 긴잎산 조팝나무(*Spiraea pseudocrenata*), 부전취슨이(*Geranium platyanthum*), 산조아재비(*Phleum alpinum*), 흰잎영경귀(*Cirsium vlassovianum*), 좁은잎꽃이(*Gentiana squarrosa* var. *microphylla*) 등은 2010년 이전에는 관찰 기록수가 10회 이상이었으나 최근 10년 동안에는 관찰되지 않은 것으

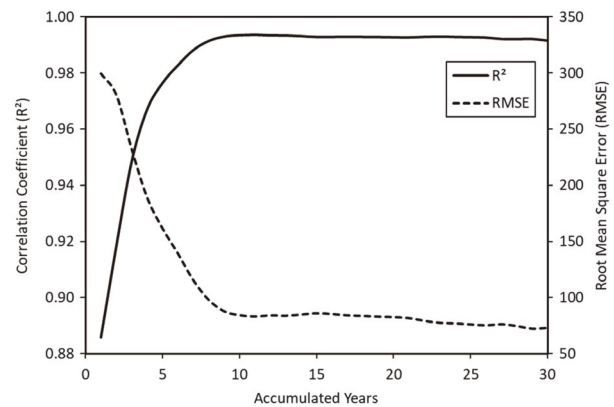


Fig. 4. R-squares (left axis) and root mean square errors (right axis) for various richness models by accumulated time periods.

로 분석되어 멸종 여부에 대한 추가 확인조사가 필요하다. 총 4,606종 중, 외래종 및 재배종 703종을 제외하고, 한번도 조사된 적 없는 종(600종)과 최근 10년간 관찰된 적 없는 129종을 빼면, 우리나라 토착종으로서 관찰 가능한 종은 3,174종이 된다. 제3차 전국자연환경조사에서 조사된 토착종 수는 2,318종, 제4차 조사에서는 2,279종, 두 사업의 자료를 합쳤을 때 조사된 식물종 수 총합이 2,575종임을 감안하면, 관찰이 쉽지 않은 멸종위기 야생식물 88종을 제외해도, 국내 관찰되는 전체 토착종 중에 약 80% 정도에 불과하다. 이는 전국자연환경조사 사업만으로는 우리나라의 전체 식물종 분포 현황을 파악하기에는 부족하다는 것을 의미한다.

2. 우리나라 전국의 식물종 다양성(풍부도) 분석

풍부도 산정은 앞에서 언급한 토착종(3,174종)들만 대상으로 과거 70년간(1951~2020)의 조사자료를 추출하여 진행하였으며, 시간 누적에 따른 반복 수를 늘리기 위해 이동 누계(running total)방식을 사용하였다. 여러 단위 기간들의 누적 자료수와 종 풍부도는 전형적인 로그함수관계를 보여주는데, 누적 년수를 증가시키며 각각의 선형회귀 분석을 해 보았을 때, 누적 기간이 길어질수록 회귀식과 실제 값과의 결정계수(Pearson's correlation coefficient)는 높아지고 평균제곱근오차(Root Mean Square Error)는 줄어드는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 또한, 누적 기간 10년 이후부터는 상관도와 오류값이 수렴되며 종 풍부도 모델의 정확도가 더 이상 변하지 않는다.

최적의 모델을 찾기 위해, 여러 누적기간을 활용한 종 풍부도 모형들간 통계적 유의성을 분석하였다(Fig. 5). 1년~6년까지의 누적자료 조사자료 누계를 활용한 종 수와의

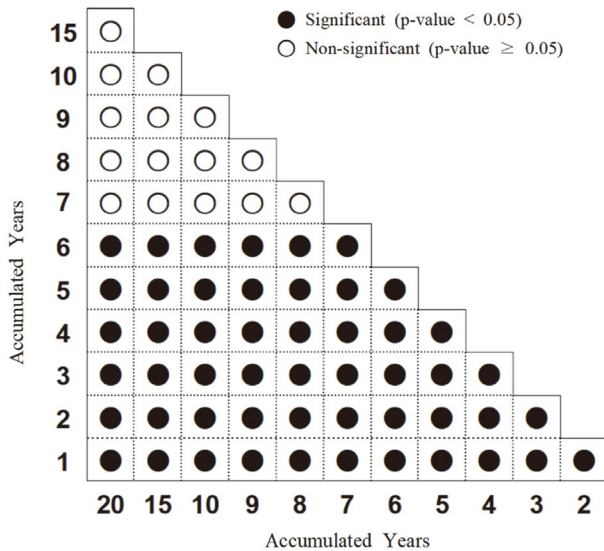


Fig. 5. Analyses of significance among species richness models based on various data accumulations across different time periods.

관계식들 간은 통계적으로 유의한 차이 ($p\text{-value} < 0.05$)를 보이다가, 7년 이상부터는 더 이상 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 조사자료 누계가 7년 이상부터는 누적 종수가 거의 늘어나지 않음을 의미한다. 이를 통해 우리나라의 종 풍부도는 최소 7년 이상의 누적 조사 기간이 필요하다는 가정을 할 수 있다. 전국자연환경조사 사업에서 전국 조사의 마무리를 위해 최소 5년이라는 기간이 소요된다는 점을 감안하면, 충분히 타당한 기간이라고 볼 수 있다. 누적 기간을 7년으로 설정하고 얻어진 종 풍부도 모형의 회귀식은 Equation 2와 같으며, x 는 관측된 자료의 7년 누계, y 는 식물종 수이다(Fig. 6).

$$y = 406.536 \ln x - 2174.38 \quad (2)$$

앞에서 도출된 최적의 종 풍부도 모형을 활용하여 우리나라의 종 풍부도 현황 도출을 위해 회귀식 상의 식물종 수가 수렴되는 지점을 도출하였다. 식물종 수의 수렴되는 조건을 최근 10년(2011년 이후) 동안의 7년 누계 자료수에 대한 평균치 528,155개를 현 수준에서의 현장조사를 통한 최대 가능 수집자료 수로 가정하였으며, 이에 기반한 이론적인 우리나라의 식물종 풍부도는 3,182.6이다.

결론 및 제언

본 연구는 우리나라 전체를 대표할 수 있는 생물종 다양

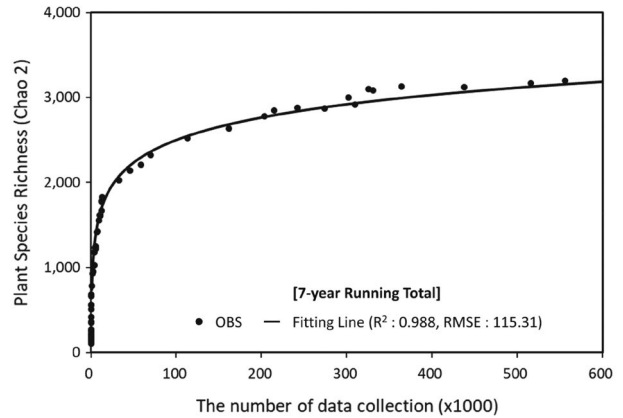


Fig. 6. The fitness of the best richness model (7-year running total) to integrated observation data.

성 정보 도출에 있어서 다음 두 가지 한계점 해결을 위해 수행하였다. 첫 번째는 기초 조사자료 수집 기간이 비교적 짧아 정량화된 생물종 다양성 정보를 도출하기에 충분한 자료수집이 이루어지지 않았다고 하는 점이다. 두 번째는 공간별, 생태계 유형별, 특정 분류군별 등 다양한 영역에서 독립적으로 수집된 생태계 조사자료들이 담당 기관별로 흩어져서 관리되고 있어 전국의 생물종 분포 상황을 한눈에 파악하기 어렵다는 점이다. 이러한 문제점들은 우리나라의 전체 및 지역별 생물다양성 현황을 파악하기 어렵게 만들고 있으며, 더 나아가 최근 국제적인 해결 과제로 강조되고 있는 생태계 및 생물다양성 보전을 위해 구체적인 정책적 대응방안 도출에 있어서도 매우 현실적인 걸림돌이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 위의 문제점들을 해결하고, 오직 현장 조사 기반의 생태정보만을 활용한 우리나라 전국의 생물종 다양성 현황을 도출하고자 하였다. 이에 시범적으로 식물종을 대상으로 시도하였으며, 통합된 형태의 기초 조사자료를 구축하는데 성공하였다. 이러한 자료의 수집을 통해 100년 이상의 누적자료 확보와 함께 그간의 우리나라 생물종 기초조사 자료의 수집의 역사와 현황을 한눈에 파악할 수 있었다.

식물종 통합자료의 분석을 통해 우리나라의 식물종 조사자료의 본격적인 수집은 2000년 이후 약 20년의 짧은 기간임을 확인하였다. 조사를 통해 발견되는 식물종 수가 최근에서야 수렴되고 있는 것으로 나타났는데, 이는 우리나라 전국 식물종 대상의 생물종 다양성 도출을 위한 충분 조건에 가까워지고 있음을 시사하는 것이다. 우리나라 국가생물종목록에 해당하는 식물종 수는 총 4,606종이긴 하나, 한번도 공식적으로 조사된 적이 없는 종과 경작되어

지는 재배종 및 해외에서 유입된 외래종 수를 제외하면, 총 3,174종 정도가 우리나라 고유의 토착 식물종임을 알 수 있었다. 반면 외래식물종 수는 최근까지 꾸준히 늘고 있음을 확인하였는데, 이는 미래 잠재적 생태계 위해요소 예방을 위해 국내 신규 외래종 도입에 대한 관리강화의 필요성을 시사한다.

우리나라 토착 식물종을 대상으로 한 식물종 풍부도는 Chao 2 방식을 응용하여, 1951년부터 조사된 70년간의 자료와 최근 10년 동안 발견된 식물종만을 대상으로 예측하였다. 이를 통해 현재 우리나라의 토착 식물종 풍부도는 3,182.6이며, 이를 위해 필요한 최소 조사 누적 기간은 7년이다. 하지만, 현재까지(2020년)의 7년 누계로 계산된 식물종 풍부도는 3,224.4로써 이론적 수치에는 매우 근접하였으나, 우리나라의 식물종 풍부도에 대한 시계열 변화를 조망하는 것은 여전히 불가능하다. 하지만 우리나라에서 현장 조사를 통해 발견되는 식물종 수가 최근에서야 수렴되고 있다는 점은 본 연구에서 도출한 식물종 풍부도 값의 불확실성이 여전히 존재하고 있다는 것을 암시한다. 이는 아직 통합되지 않은 국립산림과학원, 국립수목원, 해양생물자원관 등 타 부처의 유관기관들이 보유한 자료와 각 지자체 및 여러 환경단체들에 흩어져 있는 자료들의 추가 통합을 통해 개선될 수 있다. 본 연구에서의 환경부 산하 기관들만으로 통합 구축된 자료로는 과거 식물종 풍부도의 시계열 변화 분석에 한계가 있음이 밝혀진 만큼, 여러 기관에서 과거에 수집한 기초조사 자료의 통합과 과거 학술 문헌 자료의 복원 등으로 기초자료가 추가 확보된다면 기후변화 영향에 대응한 국가 생물다양성의 보전과 같이 장기적인 우리나라 생물다양성의 변화에 대해 데이터 기반의 과학적 조명이 가능하게 될 것이다.

본 연구를 통해 구축된 식물종 기초조사 통합자료는 우리나라 생태분야 연구의 발전을 위해 다양한 방식으로 활용이 기대된다. 우선, 생물종 기초조사사업의 개선 방향 도출이 가능하다. 각 자료별 위치정보가 포함되어 있는 만큼, 지역별 자료수집 및 생물종 풍부도 현황을 공간 정보화 한다면, 기초조사가 부족한 지역, 생물다양성이 높아 집중 조사가 필요한 지역 등 지역별 생물종 기초조사에 대한 실태를 파악할 수 있으며, 이는 향후 우리나라의 생태계 조사 사업 개선을 위한 근거 정보로 활용이 가능할 것이다. 이는 결국, 지역별 생태계 보전을 위한 정책개발과도 연계될 것이다. 둘째는, 다양한 주제의 생태분야 연구가 가능하다. 본 연구를 통해 통합된 기초조사 자료에서 비교적 장기간의 조사가 이루어진 생물종들을 선별하여 기후변화 및 기타 환경변화에 따른 우리나라 생태계변화 경향에 대한 조명이 가능할 것으로 보이며, 본 연구에서 다른 식물

종 외에, 곤충, 어류 및 조류 등 자료 통합을 위한 대상 생물종 분류군을 확대한다면, 먹이, 공생, 경쟁 등 생태계 내에서 벌어지는 다양한 종간 관계의 과학적 규명도 가능하게 될 것으로 기대한다.

적 요

우리나라를 대표하는 생물종 풍부도를 도출하는 데에는 상대적으로 짧은 생물종 현장 조사 역사와 여러 기관에서 분야별로 수집한 조사 자료가 산재되어 있다는 한계가 있다. 본 연구에서는 환경부 산하기관들이 보유하고 있는 관속식물 조사 데이터를 취합하여 100년 이상의 시계열 데이터셋을 구축하였다. 자료 통합은 종명, 위치, 시간(연도) 등 최소한의 기준을 적용해 데이터 검증 및 보정 과정을 거쳤다. 통합한 식물종 자료에 따르면 국내 식물종에 대한 체계적인 수집은 2000년 이후에 주로 이루어졌으며, 이러한 조사를 통해 발견된 식물종의 수는 최근 수렴하는 경향을 보이고 있었다. 이는 우리나라에서 국가 차원의 생물종 다양성을 도출할 수 있는 조건이 충분히 갖추어지고 있음을 시사한다. Chao 2 방법을 이용하여 예측한 1951년부터 70년간의 토착식물의 종 풍부도는 3,182.6으로 추정되었다. 이 추정치를 얻기 위해서는 최소 7년의 누적 기간이 필요하다. 본 연구의 식물종 풍부도는 향후 우리나라의 종 풍부도 변화를 연구하는데 기준이 될 수 있다. 또한 사용한 종 풍부도 추정 방법과 통합자료는 지자체 수준 등의 지역 생물다양성을 도출하는 데에도 적용할 수 있을 것으로 생각한다.

저자정보 홍승범(국립생태원 선임연구원), 오지은(국립생태원 전문위원), 차재규(국립생태원 선임연구원), 이경은(국립생태원 선임연구원)

저자기여도 초고작성 및 과제관리, 초고작성: 홍승범, 데이터수집 및 정리: 오지은, 데이터 처리 및 보정: 차재규, 분석 및 최종원고 검토: 이경은, 원고초안 검토 및 수정: 모든 저자

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음

연구비 본 연구는 2023년 국립생태원 「생태계의 기후변화 리스크에 대응한 적응역량 강화 연구('23)」(NIE-고유연구-2023-35) 및 「도시생태축 연결성 강화 방안 연구(3차년도)」(NIE-고유연구-2023-37)를 위한 연구비 일부 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

사 사

본 연구는 여러기관의 자료를 협조 받아 수행하였습니다. 국립생물자원관, 국립공원연구원, NARIS 그리고 국립생태원의 멸종위기종복원센터, 습지센터, 자연환경조사팀, 보호지역팀 등에서 소장하고 있는 자료 제공에 협조해 주셔서 감사드립니다.

REFERENCES

- Bae, Y.J., K. Cho, G.-S. Min, B.-J. Kim, J.-O. Hyun, J.H. Lee, H.B. Lee, J.-H. Yoon, J.M. Hwang and J.H. Yum. 2021. Review of the Korean indigenous species investigation project (2006~2020) by the National Institute of Biological Resources under the Ministry of Environment, Republic of Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **39**(1): 119-135.
- Chang, C.S., S.Y. Kwon and H. Kim. 2021. Status and quality analysis on the biodiversity data of East Asian vascular plants mobilized through the Global Biodiversity Information Facility (GBIF). *Journal of Korean Society of Forest Science* **110**(2): 179-188.
- de Caprariis, P., R. Lindemann and R. Haimes. 1981. A relationship between sample size and accuracy of species richness predictions. *Mathematical Geology* **13**: 351-355. <https://doi.org/10.1007/BF01031520>
- Do, M.S., J.W. Lee, H.J. Jang, D.I. Kim, J. Park and J.C. Yoo. 2017. Spatial distribution patterns and prediction of hotspot area for endangered herpetofauna species in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **31**(4): 381-396.
- Gotelli, N.J. and R.K. Colwell. 2011. Estimating species richness. Biological diversity: frontiers in measurement and assessment. *In: Biological Diversity Frontiers in Measurement and Assessment* (Magurran A.E. and B.J. McGill, eds.). Oxford University Press, NY (USA).
- Kim, C.H., J.H. Kang and M. Kim. 2013. Status and development of national ecosystem survey in Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment* **22**(6): 725-738.
- Kim, J.-H. 2004. One hundred years of ecology in Korea. Seoul National University Press, Seoul.
- Kim, W.M., C. Kim, J. Cho, J. Hur and Song, W. 2022. Prediction of *Acer pictum* subsp. *mono* distribution using bioclimatic predictor based on SSP scenario detailed data. *Ecology and Resilient Infrastructure* **9**(3): 163-173.
- Korea National Park Research Institute. 2017. Introduction to bird migration survey. Korea National Park Research Institute, Wonju.
- Korea National Park Research Institute (NPRI). 2019. History of natural resources survey of the Institute of Korea National Park Service for 30 years: Story Book. Korea National Park Research Institute, Wonju.
- Kwon, H.S., C.W. Seo and Park. C.H. 2012. Development of species distribution models and evaluation of species richness in Jirisan region. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* **20**(3): 11-18.
- Kwon, H.S., Y.K. Lee, S.H. Yoo, D.W. Kim and J.S. Kim. 2020. Distribution patterns of biodiversity hotspot using bird data from the 3rd National Ecosystem Survey in South Korea. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* **23**(3): 81-89.
- Lee, K. 2015. Classification of forested vegetation and successional development in the Central-Eastern Korean Peninsula. Kangwon National University. PhD. Thesis. Chuncheon.
- Magurran, A.E. and B.J. McGill. 2011. Biological diversity: Frontiers in measurement and assessment. Oxford University Press, New York.
- Ministry of Environment. 1986. The 1st National Ecosystem Survey in Korea. Ministry of Environment, Seoul.
- Ministry of Environment. 1997. Guidelines for the 2nd National Ecosystem Survey in Korea. Ministry of Environment, Gwacheon.
- Ministry of Environment and National Institute of Ecology. 2017. Guidelines for ecological survey in Backdudaegan Protected Area. National Institute of Ecology, Seocheon.
- Ministry of Environment and National Institute of Ecology. 2021. Report of the ecological survey on the Korean Demilitarized Zone and its surrounding areas. National Institute of Ecology, Seocheon.
- Ministry of Environment and National Institute of Ecology. 2022. National survey on the distribution of endangered species. National Institute of Ecology, Seocheon.
- National Institute of Biological Resources. 2008. The documentation of voucher specimens of indigenous species of Korea I, National Institute of Biological Resources, Incheon.
- National Institute of Biological Resources. 2009. The documentation of voucher specimens of indigenous species of Korea II, National Institute of Biological Resources, Incheon.
- National Institute of Biological Resources. 2013. The compilation of inventory of national biological resources, National Institute of Biological Resources, Incheon.
- National Institute of Biological Resources. 2020. Winter waterbird monitoring (2020). National Institute of Biological Resources, Incheon.
- National Institute of Biological Resources. 2022. (2021~2022) Winter waterbird census of Korea. National Institute of Biological Resources, Incheon.
- National Institute of Ecology (NIE). 2017. National Ecosystem Survey in Korea for 30years: 1986~2015. National Institute of Ecology, Seocheon.

- National Institute of Ecology. 2021. Guidelines for nationwide survey of alien species habitats in Korea. National Institute of Ecology, Seocheon.
- National Institute of Ecology. 2022. Status of inland wetlands in Korea 2000~2020, National Institute of Ecology, Seocheon.
- National Institute of Ecology. 2023a. Basic survey on inland wetlands ('22). National Institute of Ecology, Seocheon.
- National Institute of Ecology. 2023b. Intensive survey on national inland wetlands ('22). National Institute of Ecology, Seocheon.
- Park, C.Y. and M.Y. Won. 2021. Impact of climate change on urban bird species richness and the importance of urban green spaces. *Journal of Climate Change Research* **12**(5-1): 371-381.
- Park, H.C., J.H. Lee, G.G. Lee and G.J. Um. 2015. Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assessment of Korean Fir and Khinghan Fir. *Journal of Environmental Impact Assessment* **24**(3): 260-277.
- Park, S.U., K.A. Koo and W.S. Kong. 2019. Climate-related range shifts of climate-sensitive biological indicator species in the Korean Peninsula: A role of dispersal capacity. *Journal of Climate Change Research* **10**(3): 185-198.
- Park, S.U., K.A. Koo, J.H. Tho and C. Jung. 2023. Projection of potential habitat change and fragmentation of the endangered species *Aconitum coreanum* under Climate Change. *Journal of Climate Change Research* **14**(1): 57-81.
- Shin, J.Y. 2016. Significance and achievement of natural resources survey of the Institute of Korea National Park Service-focused on the results of geomorphological and geological field of 2015 Chiak National Park survey. *The Geographical Journal of Korea* **50**(4): 401-409.
- Shin, M.S., C. Seo, M. Lee, J.Y. Kim, J.Y. Jeon, P. Adhikari and S.B. Hong. 2018. Prediction of potential species richness of plants adaptable to climate change in the Korean Peninsula. *Journal of Environmental Impact Assessment* **27**(6): 562-581.
- Urban, M.C., G. Bocedi, A.P. Hendry, J.B. Mihoub, G. Pe'er, A. Singer, J.R. Bridle, L.G. Crozier, L. De Meester, W. Godsoe, A. Gonzalez, J.J. Hellmann, R.D. Holt, A. Huth, K. Johst, C.B. Krug, P.W. Leadley, S.C.F. Palmer, J.H. Pantel, A. Schmitz, P.A. Zollner and J.M.J. Travis. 2016. Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science* **353**(6304) <https://doi.org/10.1126/science.aad8466>.
- Vavrek, M.J. 2011. fossil: Palaeoecological and palaeogeographical analysis tools. *Palaeontologia Electronica* **14**(1) 1T.
- Wiser, S.K., P.J. Bellingham and L.E. Burrows. 2001. Managing biodiversity information: development of New Zealand's National Vegetation Survey databank. *New Zealand Journal of Ecology* **25**(2): 1-17.