

기후변화에 따른 남색이마잠자리 잠재적 서식지 및 미래 분포예측

권순직* · 전영철** · 권혁영*** · 황인철* · 이창수**** · 김태근*****

*(주)애일

** (주)생태자원연구소

***에코벅스

****국립생태원 습지연구팀

*****국립공원공단, 국립공원연구원

Predicting the Potential Habitat and Future Distribution of *Brachydiplax chalybea flavovittata* Ris, 1911 (Odonata: Libellulidae)

Soon Jik Kwon* · Yung Chul Jun** · Hyeok Yeong Kwon*** · In Chul Hwang* ·
Chang Su Lee**** · Tae Geun Kim*****

*Corporation Aeil, Bucheon 14676, Korea

**Institute of Ecological Resources Research, Seoul 02783, Korea

***Eco-bugs, Andong 36740, Korea

****Wetlands Research Team, National Institute of Ecology, Changnyeong 50303, Korea

*****Korea National Park Service, National Park Research Institute, Wonju 26441, Korea

(Received : 16 September 2023, Revised : 2 November 2023, Accepted : 2 November 2023)

요약

기후변화 생물지표인 남색이마잠자리(*B. chalybea flavovittata*)는 우리나라에는 2010년 제주도에서 최초로 관찰되어 기록된 이후 최근 영산강 일대에서 월동이 확인되었다. 본 연구는 MaxEnt 모델을 이용하여 남색이마잠자리의 잠재적 분포를 예측하고, 기후변화에 따른 서식지 확산을 예측하고자 하였다. 본 종의 분포 자료는 세계생물다양성정보 기구인 GBIF의 검색 결과를 수집하였으며, 2019년 5월부터 2023년 5월까지 확보된 현장조사 결과를 포함하였다. 또한, 생물기후변수는 WorldClim 데이터베이스에서 제공받아 사용하였다. 잠재적 종 분포예측과 미래 분포예측은 MaxEnt 모델을 사용하였다. 유충은 위도상 제주특별자치도 제주시(33.318096°)부터 경기도 여주시(37.366734°)까지, 경도상 전라남도 진도군(126.054925°)부터 경상남도 양산시(129.016472°)까지 관찰되었다. 본 종의 서식지는 랍사르 습지유형 분류체계에 따라 M(permanent rivers, streams, creeks) 유형의 습지가 12개소(50.0%)로 가장 많았으며, Tp(permanent freshwater marshes, pools) 유형이 11개소(45.8%), F(estuarine waters) 유형이 1개소(4.2%)로 분류되었다. 현재 분포지역에 기초하여 MaxEnt 모델을 이용한 잠재적 분포 예측 결과, 기존 서식지 외에 울산광역시, 대구광역시 일대가 서식확률이 높았다. 또한, 미래 시나리오를 적용하였을 때, 2050년대와 2090년대 분포 가능지역이 넓어져 가까운 미래에 남부 서남해안, 남부 내륙 대구광역시 일대, 동해안 일대로 서식범위가 확장될 것으로 예측되었다. 남색이마잠자리는 가까운 미래에 서식범위를 확장할 가능성이 높게 예측되었는데, 본 연구 결과는 향후 모니터링을 지속하면서 서식지를 공유하는 토착 자생생물자원의 보전 및 관리를 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 남색이마잠자리, 분포예측, MaxEnt 모델, 기후변화, 지표종

*To whom correspondence should be addressed.

Korea National Park Services, National Park Research Institute

E-mail : web1mhz@naver.com

- Soon Jik Kwon Corporation Aeil / Research Director, Ph.D (tripsidae@naver.com)
- Yung Chul Jun Institute of Ecological Resources Research / Research Director, Ph.D (eco072@empal.com)
- Hyeok Yeong Kwon Eco-bugs / President, Ph.D (blueblue509@hanmail.net)
- In Chul Hwang Corporation Aeil / Research Scientist, Ph. D (inchurs@naver.com)
- Chang Su Lee Wetlands Research Team, National Institute of Ecology / Associate Researcher (cslee2@nie.re.kr)
- Tae Geun Kim Korea National Park Service, National Park Research Institute / Team Manager, Ph.D (web1mhz@naver.com)

Abstract

Brachydiplax chalybea flavovittata, a climate-sensitive biological indicator species, was first observed and recorded at Jeju Island in Korea in 2010. Overwintering was recently confirmed in the Yeongsan River area. This study was aimed to predict the potential distribution patterns for the larvae of *B. chalybea flavovittata* and to understand its ecological characteristics as well as changes of population under global climate change circumstances. Data was collected both from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF) and by field surveys from May 2019 to May 2023. We used for the distribution model among downloaded 19 variables from the WorldClim database. MaxEnt model was adopted for the prediction of potential and future distribution for *B. chalybea flavovittata*. Larval distribution ranged within a region delimited by northern latitude from Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province (33.318096°) to Yeosu-si, Gyeonggi-do (37.366734°) and eastern longitude from Jindo-gun, Jeollanam-do (126.054925°) to Yangsan-si, Gyeongsangnam-do (129.016472°). M type (permanent rivers, streams and creeks) wetlands were the most common habitat based on the Ramsar's wetland classification system, followed by Tp type (permanent freshwater marshes and pools) (45.8%) and F type (estuarine waters) (4.2%). MaxEnt model presented that potential distribution with high inhabiting probability included Ulsan and Daegu Metropolitan City in addition to the currently discovered habitats. Applying to the future scenarios by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), it was predicted that the possible distribution area would expand in the 2050s and 2090s, covering the southern and western coastal regions, the southern Daegu metropolitan area and the eastern coastal regions in the near future. This study suggests that *B. chalybea flavovittata* can be used as an effective indicator species for climate changes with a monitoring of their distribution ranges. Our findings will also help to provide basic information on the conservation and management of co-existing native species.

Key words : *Brachydiplax chalybea flavovittata*, Potential Distribution, MaxEnt model, climate change, indicator species

1. 서 론

세계적으로 자연적 습지는 천연자원 중에 하나로 다양한 경제적 이점과 건전한 생태계를 구축한다(Farheen et al., 2022). 우리나라의 경우 서해안과 남해안은 많은 하구습지가 존재하는데, 하구습지의 경우에도 바다와 하천을 연결하는 생태통로로서 생물종 다양성이 풍부하여 생태 가치가 높다(Lee and Youn, 2022). 우리나라에서는 습지 정책이 습지의 면적, 분포 및 생물다양성 등 현황을 파악 위주로 진행되고 있고, 습지의 기능적인 측면을 고려한 생태축 연결과 관련된 부분은 미흡한 실정이다(Kang et al., 2022). 습지의 효율적인 관리를 위하여 람사르에서는 습지를 유형별로 구분하여 목록화하였다(RAMSAR, 2016). 잠자리류는 다양한 습지 유형에 서식하는 종으로 습지 생태계에 중요한 구성원이다.

잠자리목은 현재 전세계적으로 6,379종이 알려져 있으며(Paulson et al., 2023), 이중 우리나라에는 133종이 기록되어 있다(National list of species of Korea, 2022). 우리나라의 잠자리류 중에는 멸종위기야생생물인 대모잠자리(*Libellula angelina* Selys, 1993)와 같이 환경변화에 취약하여 개체군이 감소하는 종이 있고, 반면에 기후변화 영향으로 서남아시아와 중국, 유럽 등의 지역에서 서식하는 종이 국내에 새롭게 유입되어 관찰되기도 한다(Jung, 2007). 비래종으로 알려진 뽕잠자리(*Pantala flavescens* Fabricius, 1798)는 인도에서 인도양을 건너 동아프리카로 이동한 후 이듬해 다음 세대가 다시 인도로 회귀한다. 뽕잠자리의 비행은 풍향과 풍속의 영향을 받는데, 바람의

패턴이 기후변화에 의하여 변할 때 이동에 영향을 받는다(Hedlund et al., 2021). 그러나 이 종은 우리나라와 같은 온대기후 지역으로 이주하였을 때, 산란을 통해 유충이 성장할 수는 있으나, 월동을 거쳐 생활사가 유지되지 않아 정착이 어려운 것으로 알려져 있다(Jung, 2007).

기후변화 지표생물인 남색이마잠자리(*Brachydiplax chalybea flavovittata* Ris, 1911)는 잠자리목(Order Odonata) 잠자리과(Family Libellulidae) 남색이마잠자리속(Genus *Brachydiplax*)에 속하는 종으로서 주로 인도와 인도네시아, 태국을 포함한 고온다습한 아열대 지역에 서식하며, 산란 후 8~12일이 지나면 부화하며, 유충기는 약 3개월로 매우 짧은 것으로 알려져 있다(Jung, 2012; Choi et al., 2020). 동남아시아에서 국내로 유입된 종으로 추정되는 남색이마잠자리는 2010년 제주도에서 수컷을 채집하여 최초 보고하였고, 당시에는 월동 여부가 확인되지 않았다(Jung, 2012). 그러나 본 종은 2019년 5월부터 10월까지 전라남도 나주시와 광주광역시의 영산강 일대 습지에서 다수의 성충과 유충이 관찰되었다. 이는 국내 환경에 적응하여 안정적인 개체군이 형성되었을 것으로 판단된다. 유충은 식물 파편이나 모래보다 작은 하상 퇴적층을 선호하며 물참새피(*Paspalum distichum*)와 줄(*Zizania latifolia*)의 식생군락이 우점하는 미소서식지에 서식한다(Choi et al., 2020).

잠자리류는 환경변화에 민감한 지표종이 많고, 먹이사슬의 중간 포식자로서 소형 동물을 섭식하면서 어류와 조류에게는 중요한 먹이자원이 되는 중요한 생태계 구성원이다(Maltchik et al., 2010; Hedlund et al., 2021). 특히,

된잠자리(*P. flavescens*)와 같은 대륙 간 장거리를 이동하는 잠자리류는 막대한 양의 생물량(biomass)과 영양분(nutrients)을 전세계적으로 재분배에 기여한다(Hedlund et al., 2021). 일반적으로 잠자리류는 고도와 산림, 수생 식물 구성, 하상재료, 전기전도도, 질소 농도 등의 수질 요소에 의하여 분포와 다양성이 결정된다(Maltchik et al., 2010; Lee et al., 2018). 또한, 서식지 이질성은 담수 생태계에서 무척추동물의 밀도와 다양성 유지에 중요하고, 외래종의 도입과 정착에 중요한 역할을 한다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제6차 평가보고서(The 6th Assessment Report: AR6)(2022)에 따르면 최근의 기후변화의 영향으로 자연적인 변동성을 넘어 극한 현상의 빈도와 강도가 증가하는 추세이다. 자연 생태계에 직·간접적인 영향으로 생태계 변화를 초래하고 있고, 그 범위와 규모는 점차 증가하는 추세이다. 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways) 시나리오 오는 기후변화로 인한 영향을 예측하는 미래 추정방식으로 적용하였으나, 최근에는 사회경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 완화와 노력에 따라 공통사회경제경로(SSPs, Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오를 제시하고 있다. 즉, SSP1(친환경 성장 발전, Sustainability)과 SSP5(화석연료 의존 발전, Fossil-fueled development)는 빠르고 광범위하게 대기질 개선 정책을 실행하는 경로이고, SSP3(기후변화 취약성장, Regional rivalry)과 SSP4(양극화 성장, Inequality)는 상대적으로 느린 대기질 개선을 가정한 시나리오이다. SSP2(중도성장 경로, Middle of the road)는 대기질 개선이 상당 부분 실행되지만, SSP1과 SSP5보다는 상대적으로 낮은 경우를 가정한다.

생물의 종분포에 대한 연구는 시간과 공간에 따른 제약으로 한계가 많았으나, 최근에는 다양한 방식의 모델이 개발되어 활용되고 있다. 데이터 가용성은 자료 가공과 효율성 증대로 종의 환경 요구 사항 및 지리적 분포에 대한 예측 모델링의 급속한 증가를 촉진하였다. 일부 종은 상세한 출현/비출현 발생 데이터를 사용할 수 있어 다양한 표준 통계 기법을 사용할 수 있으나, 비출현 데이터(absence data)는 대부분 종에 적용하기 어렵다. MaxEnt(Maximum Entropy) 모델은 출현 자료만(presence-only data)으로 종 지리적 분포를 모델링하기 위해 최대 엔트로피 방법을 이용하여 단순하고 정확한 수학적 공식을 사용하는 범용 기

계 학습 방법이며, 종 분포 모델링에 매우 적합한 장점이 있다. 생태적 지위(생물군집 내에서의 생물종이 지닌 생태적 역할) 중심 모델(niche-based model)은 조사된 환경 차원에서 종의 생태적 지위의 근사치를 나타내며 일반적으로 지리적 공간에 투영하여 해당 종의 분포를 예측하는 지리적 영역을 산출한다(Elith et al., 2011, Phillips et al., 2006). 이러한 이유로 MaxEnt 모델은 국내·외 다양한 생물종에 적용하고 있다. 국내에서 MaxEnt 모델을 이용한 분포 예측 연구는 곤충 분야에서 기후변화에 따른 소철코리부전나비(*Luthrodes pandava*)의 잠재적 분포예측(Shin et al., 2022)과 기후변화에 따른 은줄팔랑나비(*Leptolina unicolor*)와 억새(*Miscanthus sinensis*)의 잠재적 분포(Adhikari et al., 2022), 기후변화에 의한 병해충인 오이충채벌레(*Thrips palmi*)의 확산에 따른 위험지도(Hong et al., 2019), 주홍날개꽃매미(*Lycorma delicatula*)의 잠재적 분포예측(Namgung et al., 2020) 등이 있으며, 식물 분야에서는 소나무(*Pinus densiflora*) 잠재분포 예측 및 환경변수와 관계 분석(Cho et al., 2020), 접경지역의 금강초롱꽃 자생가능지 예측(Sung et al., 2018) 등이 있다. 그러나 기후변화에 민감한 담수생태계에 서식하는 수서곤충을 대상으로 MaxEnt 모델을 이용하여 미래 분포를 예측한 연구 사례는 매우 드물다.

본 연구는 기후변화로 온도가 증가하는 상황에서 우리나라 전역으로 서식범위를 확장할 가능성이 높은 남색이마잠자리의 잠재적 분포를 예측하고, 기후변화에 따른 서식지 및 분포변화를 파악하여 개체군 이동과 생태정보를 제시하고자 하였다. 본 연구의 목적은 남색이마잠자리에 대한 현재와 미래의 서식범위 변화에 대한 정보를 제공하고, 기후변화 예측을 위한 간접적인 지표로서의 활용 가치를 확인하기 위함이며, 향후 서식지를 공유하는 자생생물자원의 보전 및 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 남색이마잠자리의 자료 수집 및 현장조사

2.1.1. 남색이마잠자리의 형태적 특징

남색이마잠자리 유충의 형태는 전반적으로 편평한 긴 장타원형이고, 머리길이 2.5~2.6 mm, 머리폭 5.1~5.6 mm,



Fig. 1. Selected photos of (a) larva and (b) adult of *B. chalybea flavovittata* observed in field survey

몸길이 16.0~19.1 mm 정도이다. 몸은 담갈색이나 담황색을 띠고, 배면에는 다갈색 및 흑갈색의 얼룩무늬가 있다. 겹눈은 머리 옆 가장자리에 있는데 매우 크다. 아랫입술의 중편강모는 15개이고, 측편강모는 11~12개이다. 배 등면에는 가슴부터 배 끝까지 중앙에 밝은색의 줄무늬가 있다(Ishida, 1996)(Figure 1).

2.1.2. 남색이마잠자리의 분포자료 수집

남색이마잠자리는 '국가 기후변화 생물지표 100종'에 포함된 종으로 인도, 동남아시아, 남중국, 일본, 한국 등에 서식하는 남방계열 종이다(National Institute of Biological Resources, 2022). 남색이마잠자리는 우리나라에 *Brachydiplax* 속 1종만이 기록되어 있으나, 세계생물다양성정보기구인 GBIF 웹사이트(검색일, 2023. 07. 31)에는 *Brachydiplax*

chalybea flavovittata Ris, 1911와 *Brachydiplax chalybea* (Brauer, 1868)로 등재되어 있었으며 검색을 통하여 3,150개의 *B. chalybea*와 318개의 *B. chalybea flavovittata*에 대한 분포자료를 수집하였다(Figure 2 (a)). 향후 두 종에 대한 분류학적 검토가 요구된다. 또한, 분포자료는 2019년 5월부터 2023년 5월까지 남색이마잠자리 유충의 서식지와 습지 유형을 파악하기 위하여 직접 관찰한 결과를 포함하였다(Table 1, Figure 2 (b)). 이때 서식지는 람사르 습지유형 분류체계에 따라 분류하였다(Ramsar, 2016).

2.1.3. 서식지 조사

GBIF 등 기존에 성충이나 유충이 관찰된 지역을 중심으로 생태적 특징을 고려하여 서식이 가능할 것으로 예측된 지역을 중심으로 조사를 수행하였다. 현장조사는 수변

Table 1. Occurrence records of *B. chalybea flavovittata*

Observation Date	Longitude	Latitude	Area	Type*
2019. 05. 09	126.744676	35.051183	Haksan-ri, Noan-myeon, Naju-si, Jeollanam-do	M
2019. 05. 22	126.892806	35.249194	Yongjeon-dong, Buk-gu, Gwangju	M
2019. 06. 03	126.791917	35.085500	Bondeok-dong, Gwangsan-gu, Gwangju	M
2019. 06. 06	126.877944	35.240750	Yongjeon-dong, Buk-gu, Gwangju	M
2019. 09. 18	126.738278	35.041889	Wongok-ri, Geumcheon-myeon, Naju-si, Jeollanam-do	M
2019. 09. 27	126.612444	34.879667	Wollong-ri, Sijong-myeon, Yeongam-gun, Jeollanam-do	M
2019. 10. 26	126.628083	34.976667	Juksan-ri, Dasi-myeon, Naju-si, Jeollanam-do	Tp
2019. 10. 30	126.759611	35.068222	Seungchon-dong, Nam-gu, Gwangju	F
2021. 04. 07	126.769509	36.023254	Seongdeok-ri, Seongsan-myeon, Gunsan-si, Jeollabuk-do	Tp
2021. 04. 08	126.925110	36.133090	Nanpo-ri, Yongan-myeon, Iksan-si, Jeollabuk-do	Tp
2021. 05. 10	129.016472	35.296028	Gasam-ri, Dong-myeon, Yangsan-si, Gyeongsangnam-do	Tp
2021. 05. 27	126.909461	36.260657	Gunsu-ri, Buyeo-eup, Buyeo-gun, Chungcheongnam-do	M
2021. 08. 21	126.221495	33.337153	Josu-ri, Hangyeong-myeon, Jeju-si, Jeju-do	Tp
2021. 09. 27	126.346934	33.454435	Haga-ri, Aewol-eup, Jeju-si, Jeju-do	Tp
2021. 11. 01	128.426333	35.361833	Guhye-ri, Daesan-myeon, Haman-gun, Gyeongsangnam-do	Tp
2021. 11. 01	128.397973	35.349695	Hagi-ri, Daesan-myeon, Haman-gun, Gyeongsangnam-do	M
2021. 11. 01	128.403444	35.352047	Hagi-ri, Daesan-myeon, Haman-gun, Gyeongsangnam-do	Tp
2021. 11. 01	128.447667	35.842833	Gwakchon-ri, Dasan-myeon, Goryeong-gun, Gyeongsangbuk-do	Tp
2022. 04. 20	128.946320	35.128297	Daejeo-dong, Gangseo-gu, Busan	M
2022. 06. 01	126.054925	34.243954	Gwanmaedo-ri, Jodo-myeon, Jindo-gun, Jeollanam-do	Tp
2022. 08. 02	127.544608	37.366734	Sangbaek-ri, Heungcheon-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do	M
2023. 03. 27	127.686026	35.146979	Pyeongsa-ri, Agyang-myeon, Hadong-gun, Gyeongsangnam-do	M
2023. 03. 27	126.185298	33.318096	Yongsu-ri, Hangyeong-myeon, Jeju-si, Jeju-do	Tp
2023. 03. 29	127.094472	35.824412	Wansan-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do	M

*Ramsar Wetland Class

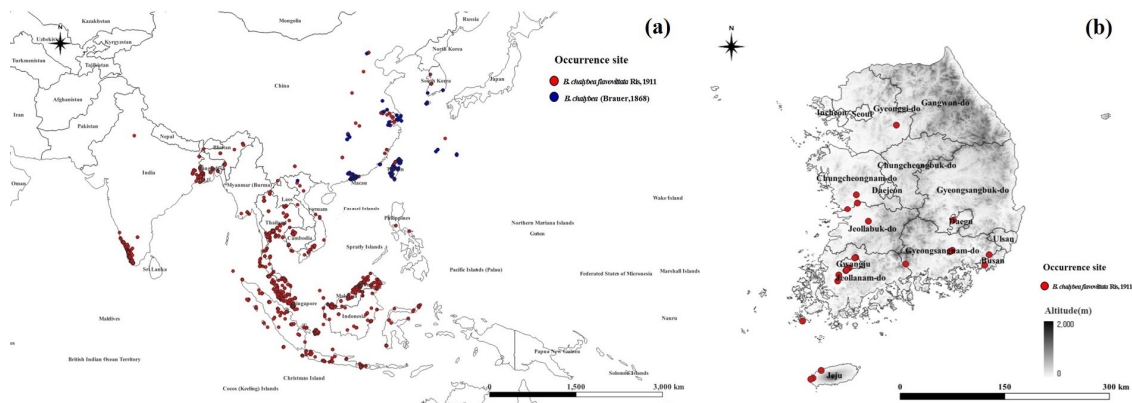


Fig. 2. Geographical distribution of *B. chalybea flavovittata* in (a) Asia and (b) Korea.

Table 2. List of bioclimatic variables

Code	Bioclimatic variable	Units
BIO1	Annual Mean Temperature	° C
BIO2	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))	° C
BIO3	Isothermality(BIO2/BIO7)(*100)	%
BIO4	Temperature Seasonality (standard deviation *100)	%
BIO5	Max Temperature of Warmest Month	° C
BIO6	Min Temperature of Coldest Month	° C
BIO7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	° C
BIO8	Mean Temperature of Wettest Quarter	° C
BIO9	Mean Temperature of Driest Quarter	° C
BIO10	Mean Temperature of Warmest Quarter	° C
BIO11	Mean Temperature of Coldest Quarter	° C
BIO12	Annual Precipitation	mm
BIO13	Precipitation of Wettest Month	mm
BIO14	Precipitation of Driest Month	mm
BIO15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	%
BIO16	Precipitation of Wettest Quarter	mm
BIO17	Precipitation of Driest Quarter	mm
BIO18	Precipitation of Warmest Quarter	mm
BIO19	Precipitation of Coldest Quarter	mm

부를 중심으로 다양한 식물군락에서 D-frame net(width size 30cm, mesh size 1×1mm)과 Scoop net(mesh size 1×1mm)을 이용하여 정성채집을 수행하였다. 채집된 시료는 현장에서 Ethyl alcohol 95%에 고정하였고, 실험실에서 골라내기(sorting) 작업 후 70% Ethyl alcohol에 고정 보관하였다.

2.2 생물기후 변수

분포 모델에 사용한 환경변수는 기온과 강수량을 기초로 하여, 보다 생물학적 의미를 갖도록 변환된 19개 생물기후변수를 WorldClim 데이터베이스(<http://www.worldclim.org>)에서 내려받았다(Table 2). 이 자료는 CMIP6 Model HadGEM3-GC31-LL을 이용하였고, 1km²의 공간해상도로 기온과 강수량 데이터를 바탕으로 파생된 19개 생물기후변수를 이용하였다(Hijmans et al., 2005). 환경변수는 현재(average for 1970~2000)의 데이터를 토대로 잠재적인 현재분포를 예측하였다. 미래예측의 경우 IPCC AR6에 새롭게 도입된 개념인 사회경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 완화와 노력에 따라 제시된 5개의 미래 시나리오(SSPs) 중에 양극단의 SSP1(친환경 성장 발전)과 SSP5(화석연료 의존 발전) 경로를 기준으로 예측하였다. 이후 기후변화에 따른 남색이마잠자리 분포변화를 비교하기 위해 가까운 미래(average for 2041~2060, 2050년)와 먼 미래(average for 2081~2100, 2090년) 자료를 구축하였다.

2.3 MaxEnt 모델을 이용한 현재 및 미래의 분포 예측

MaxEnt 모델은 야생동물 출현지점의 위치데이터를 바탕으로 환경변수와 생물종의 분포 간의 관계를 모델링하는데 최대 엔트로피 접근법(Maximum entropy approach)을 이

용한다. 이 모델은 생물종 위치데이터로부터 환경변수 간 복잡한 관계를 학습하여 생물종 분포를 모델링하며, 비선형적인 상호작용을 고려하여 예측을 수행하므로 환경변수의 다양한 영향을 반영하여 생물종의 분포를 예측할 수 있다(Phillips et al., 2006). 이 모델은 상대적으로 적은 훈련 데이터로도 생물종 분포를 효과적으로 예측할 수 있기 때문에 멸종위기종과 같이 희귀한 생물종의 분포를 예측하는데 유용하다(Hernandez et al., 2006). 또한, 부트스트래핑(Bootstrapping)과 같은 통계적 기법을 통해 모델 예측의 불확실성을 추정할 수 있다(Phillips et al., 2017). MaxEnt 모델은 환경 모델링, 생태학 연구, 보전 생물학 등 다양한 분야에서 활용되며, 복잡한 환경변화에 대응하는데 유용한 도구로서 인정받고 있다. 본 연구는 남색이마잠자리 분포를 예측하는 모델을 개발하기 위해서 MaxEnt 프로그램의 기본값을 사용하였고, 모델의 예측 정확도를 평가하기 위해서는 남색이마잠자리 위치데이터를 학습데이터와 검증데이터로 각각 75%와 25%로 분류하는데, 부트스트래핑 방법을 이용하여 10회 반복해서 모델을 수행하였다. MaxEnt 모델을 수행한 결과로 나오는 초기 예측값인 raw value는 연구 대상종인 남색이마잠자리가 출현한 지점 x에서 발견될 가능성을 지수 함수의 값으로 나타낸다. 이 값은 확률 형태가 아니라 직관적으로 해석하기 어렵기 때문에 0과 1사이의 출현 확률값을 갖도록 cloglog(complementary log-log)로 변환된 결과를 이용하여 남색이마잠자리의 잠재적 분포지역을 평가하였다(Phillips et al., 2006; Phillips et al., 2017). MaxEnt 모델의 예측 정확도는 ROC(Receiver Operation Characteristic)의 AUC(Area Under Curve)을 통해 평가하였다. 잠재적 분포 가능성은 0~1의 확률로 제공하는데, 1에 가까울수록 분포 또는 높은 출현 가능성을 의미한다. AUC 점수는 0.50 ~ 0.60(실패), 0.60 ~ 0.70

(낮음), 0.70 ~ 0.80(보통), 0.80 ~ 0.90(우수), 0.90 ~ 1.00(매우 우수)의 다섯 가지 범주로 나눌 수 있다(Hanley and McNeil, 1982; Phillips et al., 2006).

남색이마잠자리의 잠재적 분포에 영향을 주는 변수들의 평가는 모델의 결과에서 제공하는 기여도(Percent Contribution)와 중요도(Permutation Importance)를 이용하였다. 기여도는 각 환경변수가 모델의 예측에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 의미하는 지표이다. 모델의 학습과정에서 각 변수의 상대적 가중치를 나타내는 Gain 값을 따지며 최적의 모델 결과를 도출할 수 있도록 각각의 환경변수마다 상대적인 기여도가 결정되며, 모든 환경변수의 기여도를 합산하면 100%가 된다. 중요도는 해당 환경변수에서 남색이마잠자리의 원래 위치데이터를 이용한 경우와 무작위로 변경한 위치데이터를 이용한 경우로 구분하여 수행한 모델의 예측 정확도의 변화를 이용한다. 정확도가 낮아지거나 높아질수록 그 환경변수의 중요도는 높고 모델의 예측 정확도의 변화가 없다면 환경변수의 중요도가 낮다는 것을 의미한다(Phillips et al., 2006). 기후변화에 따른 남색이마잠자리 분포지역의 변화를 예측하기 위해서 사용된 미래 기후변화 시나리오 자료는 SSP1(친환경 성장 발전)과 SSP5(화석연료 의존 발전) 양극단의 2050년대(평균 2041~2060년)와 2090년대(평균 2081~2100년) 기후변화 시나리오 자료를 이용하였다. 남색이마잠자리의 분포지역을 예측한 지도는 QGIS 3.22.4소프트웨어를 이용하여 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 남색이마잠자리의 분포

남색이마잠자리(*B. chalybea flavovittata* Ris, 1911)는 인도, 인도네시아, 베트남, 대만, 중국, 일본, 한국 등에 서식하는 것으로 기록되어 있는데, 우리나라에는 위도상 제주특별자치도 제주시(33.318096°)부터 경기도 여주시(37.366734°)까지, 경도상 전라남도 진도군(126.054925°)부터 경상남도 양산시(129.016472°)까지 관찰되었다(Figure 2). 특히, 근래의 남색이마잠자리에 대한 분포조사를 통하여 3~5월에 다수의 습지에서 유충을 관찰함으로써 국내 정착 후에 월동하는 것으로 판단된다. 비래종은 우리나라와 같은 온대지역에 유입되었을 때 일부 종이 정착하여 유충으로 겨울을 나기도 하지만, 일반적으로는 생활사가 이어지지 않는다(Inoue, 2004). 그러나 남색이마잠자리는 과거에는 된장잠자리와 같이 단순한 나그네 종으로 구분하였지만, 현재 국내에 정착하여 서식지를 점차 확대하고 있다.

Choi et al. (2020)은 앵무새갯(*Myriophyllum aquaticum*), 물참새피(*Paspalum distichum*), 줄(*Zizania latifolia*) 군락이 분포하는 서식지에서 남색이마잠자리의 개체밀도가 높았고, 식물 파편(plant debris)이나 모래(sand)보다 니질

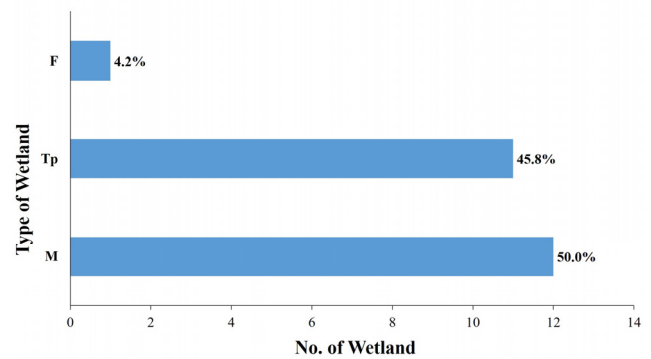


Fig. 3. Habitat types (%) of *B. chalybea flavovittata* based on Ramsar's wetland classification system (M: permanent rivers, streams and creeks, Tp: permanent freshwater marshes and pools, F: estuarine waters)

(Silt) 퇴적물에서 더욱 확산한다고 기재하였다. 본 연구에서도 이와 유사한 출현 양상을 보였으며 주로 부들속(Genus *Typha*)과 줄속(Genus *Zizania*), 참새피속(Genus *Paspalum*) 등이 속한 군락에 서식하였다. 그러나 일부 서식지는 연꽃과(Family Nelumbonaceae)의 식물이 밀생하여 수생식물과 관련된 분포에 대해서는 추가적인 연구가 요구된다. 또한, 남색이마잠자리는 성충시기에 동일한 서식지에서 고추잠자리, 밀잠자리, 노란허리잠자리, 왕잠자리 등 다른 잠자리류와 세력권 유지를 위한 경쟁이 빈번하게 관찰되었다. 소형 무척추동물이나 치어, 올챙이 등을 섭식하는 포식자인 잠자리류의 생태적 특성을 고려하였을 때, 남색이마잠자리는 종이 다른 잠자리목 유충을 탐색하여 먹이로 섭취할 가능성이 있다(Choi et al., 2020). 이러한 이유로 본 종과 동서하는 토착 생물 종과의 종간경쟁 등을 통해 변화하는 서식지의 천이과정에 대한 연구도 지속할 필요가 있다.

남색이마잠자리 유충은 평지와 구릉지의 정수식물이 풍부한 연못이나 습원과 같은 습지에 서식하며 정수식물의 뿌리와 식물성 잔사물이 풍부한 곳을 선호한다(Ishida, 1996; Jung, 2012). 본 연구에서 확인된 24개소의 남색이마잠자리 서식지를 람사르 습지유형 분류체계에 따라 분류하였을 때, M(permanent rivers, streams, creeks)유형의 습지가 12개소(50.0%)로 가장 많았고, Tp(permanent freshwater marshes, pools)유형이 11개소(45.8%), F(estuarine waters)유형이 1개소(4.2%)로 분류되었다(Figure 3). 이 중에서 M유형 습지는 금강, 낙동강, 영산강, 한강 등 대하천 제외지에 인공적으로 조성된 생태공원에서 산책로와 데크가 설치된 환경이었고, Tp유형 습지는 농업용수로 이용하면서 인간활동에 의해 간접적인 영향을 받고 있었다. 현재까지 관찰된 습지유형은 제한적이었으나, 본 종의 국내 서식지가 점차 확대되고 있음을 고려하였을 때 앞으로 지속적인 조사를 통한 분포 자료가 축적된다면 더욱 다양한 습지유형에서의 서식 및 생태적인 특성에 대한 정보를 분석할 수 있을 것으로 기대한다.

3.2 남색이마잠자리의 잠재적 서식지 예측

본 종은 2010년 제주도에서 최초로 관찰된 이후 내륙으로 서식범위를 확대하여 점차 정착단계에 있는 종으로서 판단되지만, 유충 서식지에 대한 서식지 자료는 제한적이다. MaxEnt 모델에 생물기후변수를 사용하여 현재까지 관찰된 남색이마잠자리 유충의 서식지를 토대로 잠재적 서식지를 예측하였을 때, 전체면적 중에 잠재적 분포 가능성이 0.75 이상인 지역은 1.4%(1,327.83 km²), 0.50~0.75 이상인 지역은 4.3%(4,239.1 km²)로 나타났다. MaxEnt 모델의 예측 정확도는 ROC의 AUC 값이 0.972로 매우 우수하였다. 환경변수 중 기여도는 BIO10(가장 더운 분기 평균기온)이 45.7%, BIO08(가장 습한 분기 평균기온)이 22.4%, BIO01(연평균 기온)이 10.5%로 모형 적합도에 대한 기여도 10% 이상으로 높았고, 중요도는 BIO10이 63.5%, BIO08이 19.5%로 상대적으로 높은 변수로 나타났다(Table 3).

현재 관찰된 서식지 외에 경상남도, 전라북도, 충청북도 등 더 넓은 지역에서 나타날 것으로 예측되었다. 또한, 제주도와 광주광역시, 전라남도는 가장 넓은 면적에서 서식할 가능성이 높은 것으로 확인되었다. 기존 서식지 외에 울산광역시와 대구광역시 일대의 잠재적인 서식 가능성이 높았고, 안성천(평택시)과 곡교천(아산시), 삼교천(예산군), 한강(서울특별시, 인천광역시) 일대도 서식할 것으로 예측되었다(Figure 4). 남색이마잠자리는 최초 관찰된 이후 10년이 지난 시점에서 전라북도와 충청남도까지 분포범위가 넓어졌는데, 이는 기온 상승에 의한 기후변화가 주요 원인으로 판단된다. 경기도 여주시 일대 서식지는 2022년 8

Table 3. Bioclimate variables and their relative percent contribution and permutation importance in the MaxEnt model

Code	Percent contribution (%)	Permutation importance (%)
BIO10	45.7	63.5
BIO08	22.4	19.5
BIO01	10.5	0.5
BIO05	4.2	0.0
BIO04	3.4	1.0
BIO06	2.5	0.0
BIO12	2.2	3.7
BIO14	2.2	5.7
BIO02	1.7	2.7
BIO16	1.6	1.4
BIO11	1.3	0.0
BIO09	1.0	0.0
BIO13	0.8	1.2
BIO03	0.2	0.3
BIO18	0.1	0.4
BIO15	0.1	0.0
BIO07	0.0	0.0
BIO19	0.0	0.0
BIO17	0.0	0.0

Current(1970~2000)

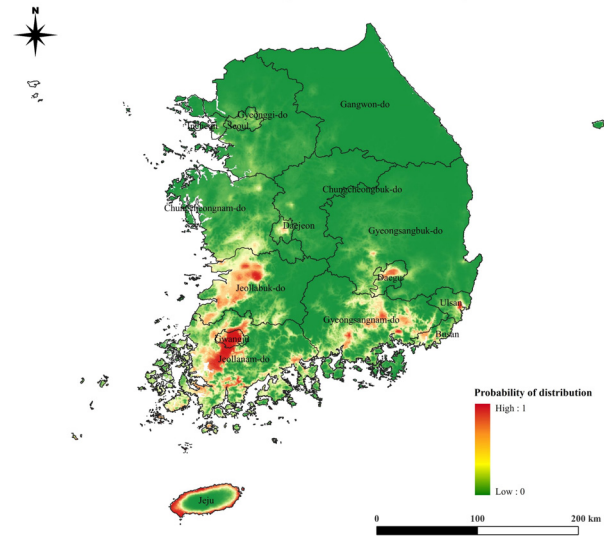


Fig. 4. A map showing the probability of distribution for *B. chalybea flavovittata* by MaxEnt model

월 2일 유충 1개체가 출현한 이후 더 이상 확인되지 않았다. 따라서, 이러한 지역의 경우 월동에 대한 추가적인 확인이 필요하고, MaxEnt 모델을 통하여 분포 가능성이 높은 지역에 대한 검증과 생태학적 지위가 유사한 종과의 종간경쟁이나 생태계에 미치는 영향 등 추가적인 연구가 필요하다.

3.3 기후변화에 따른 남색이마잠자리의 서식지 예측

현재의 잠재적 분포예측과 비교하여 SSP1-2.6는 2050년대에 강원도와 지리산 등 백두대간의 해발고도가 높은 산지를 제외하고 넓게 확장하였으며, 분포 서식가능성이 0.75 이상인 지역은 2050년대 13.3%(13,093.7 km²)에서 2090년대 30.2%(29,667.4 km²)로 증가하였다. 마찬가지로 SSP5-8.5는 2050년대에 34.0%(33,407.1 km²)에서 2090년대에는 25.8%(25,304.0 km²)로 잠재적 서식가능성이 높은 지역으로 나타났다. SSP1 경로의 경우 서식가능지역이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 SSP5 경로의 경우 2050년대에는 서식가능성이 증가하다가 2090년대에는 다소 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로 두 가지 경로 모두에서 잠재적 서식가능면적이 확장되는 것으로 나타나는 것으로 예측되었다(Figure 5, Table 4).

Table 4. Changes in the potential distribution area (km²) of *B. chalybea flavovittata* in Korea

Suitability Class		current	SSP1-2.6		SSP5-8.5	
			2050s	2090s	2050s	2090s
Low	<0.25	86,332.5	16,732.7	10,031.7	3,869.6	7,610.1
Medium	0.25~0.50	6,292.0	19,122.4	15,295.2	9,444.2	35,218.3
High	0.50~0.75	4,239.1	49,242.6	43,197.1	51,470.4	30,059.0
Very High	>0.75	1,327.8	13,093.7	29,667.4	33,407.1	25,304.0

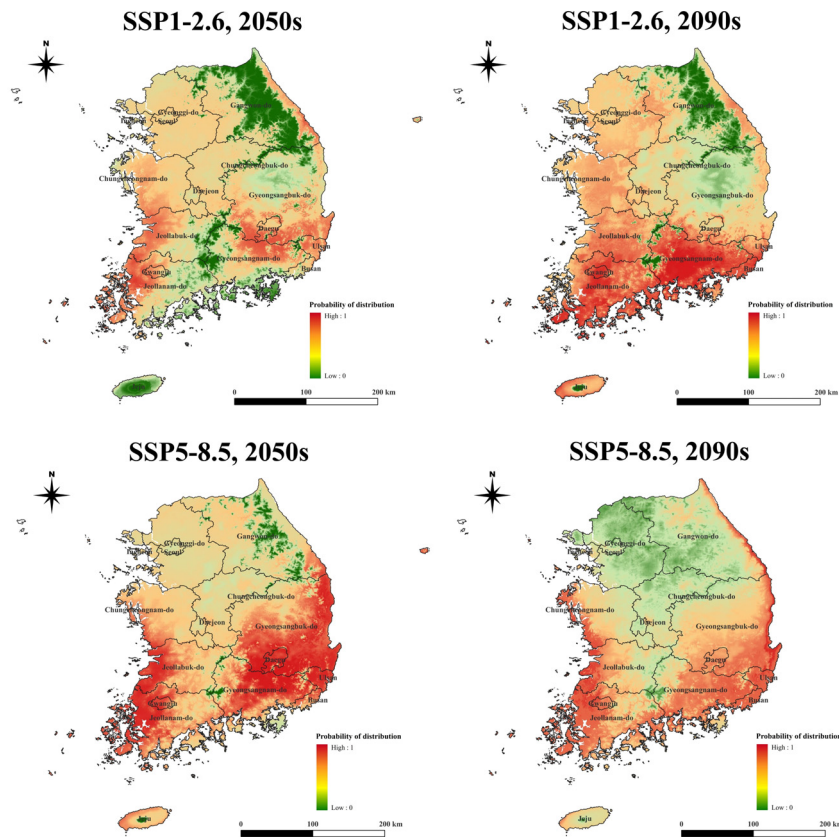


Fig. 5. The predicted potential distribution maps of *B. chalybea flavovittata* in Korea in 2050s and 2090s under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

IPCC AR6 WG II 보고서(2022)에 의하면 기후변화로 인하여 전 세계적으로 평가 대상인 생물종 중 약 절반가량이 극지방으로 이동하거나, 육지에서는 고도가 더 높은 곳으로 이동하는 것으로 제시하였다. 이러한 이유로 생물다양성 측면에서 기후변화로 인한 부정적 영향은 주로 중위도 및 저위도 지역에서 나타나지만, 일부 고위도 지역에서는 긍정적인 영향이 발생하는 것으로 예측한다. 일본의 사례에서 남색이마잠자리는 최초 기타다이토섬(北大東島)에만 분포하였으나, 가고시마현(鹿児島県), 오키나와본섬(沖縄本島), 이시가키섬(石垣島) 등으로 서식범위가 확대하는 것으로 예측되었다(Ishida, 1996). 본 연구를 통하여 남색이마잠자리는 기온이 현재의 수준으로 증가할 경우에 가까운 미래에 서식범위가 확장할 가능성이 높게 예측되었다. 이러한 이유로 향후 지속적인 모니터링을 통하여 서식지를 공유하는 토착 자생생물자원의 보전 및 관리를 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

우리나라의 기후변화 생물지표인 남색이마잠자리(*B. chalybea flavovittata* Ris, 1911)는 2010년 제주도에서 최초로 기록된 이후, 영산강 일대에서 월동이 확인되었다. 본 연구를 통하여 유충은 위도상 제주특별자치도 제주시

(33.318096°)부터 경기도 여주시(37.366734°)까지, 경도상 전라남도 진도군(126.054925°)부터 경상남도 양산시(129.016472°)까지 관찰되었다. 본 종은 기존에 알려진 서식지 외에 경상남도, 전라북도, 충청북도 등으로 범위가 확장되었다. 서식지는 랍사르 습지유형 분류체계에 따라 M(Permanent rivers / streams / creeks)유형의 습지가 12개소(50.0%)로 가장 많았고, Tp(Permanent freshwater marshes / pools)유형이 11개소(45.8%), F(Estuarine waters) 유형이 1개소(4.2%)이었는데, 향후 본 종의 서식범위 확장에 따른 다양한 습지유형에 대한 추가적인 서식지 조사와 분석이 요구된다. 현재 분포지역을 토대로 MaxEnt 모델을 이용하여 잠재적 분포를 예측한 결과, 기존 서식지 외에 울산광역시와 대구광역시 일대가 서식가능성이 높았으며 안성천(평택시)과 곡교천(아산시), 삽교천(예산군), 한강(서울특별시, 인천광역시) 일대에서도 서식 가능성을 확인하였다. 한편, 미래 시나리오를 이용한 2050년대와 2090년대의 분포 가능지역이 넓어지는 것으로 예측되었다. 결과적으로 남색이마잠자리는 가까운 미래에 서식범위의 확장 가능성이 높게 예측되었다. 본 연구 결과는 향후 지속적인 모니터링을 통하여 서식지를 공유하는 토착 자생생물자원의 보전 및 관리를 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 국립생태원 습지센터에서 수행한 “내륙습지 기초조사(NIE-법정연구-2023-18)”에 의해 이루어진 자료를 포함한 것으로 이에 감사드립니다.

References

- Adhikari, P., Kim, H. W., Shin, M. S., Hong, S. H., and Cho, Y. H. (2022). Potential distribution of the silver striped skipper(*Leptolina unicolor*) and maiden silvergrass(*Miscanthus sinensis*) under climate change in South Korea. *Entomological Research*, 52(11): pp. 483–492. [https://doi.org/10.1111/1748-5967.12622].
- Bean, W. T., Stafford, R., and Brashares, J. S. (2012). The effects of small sample size and sample bias on threshold selection and accuracy assessment of species distribution models. *Ecography*, 35(3): pp. 193–288. [https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.06545.x].
- Cho, N. H., Kim, E. S., Lee, B. R., Lim, J. H., Kang, S. K. (2020). Predicting the potential distribution of *Pinus densiflora* and analyzing the relationship with environmental variable using MaxEnt model. *J. of Agricultural and Forest Meteorology*, 22(2): pp. 47–56. [https://10.5532/KJAFM.2020.22.2.47].
- Choi, J. Y., Kim, S. K., Kim, J. C., and Kwon, S. J. (2020). Habitat preferences and trophic position of *Brachydiplax chalybea flavovittata* Ris, 1911 (Insecta: Odonata) larvae in Youngsan River wetlands of South Korea. *Insects*, 11(5): pp. 273. [https://doi:10.3390/insects11050273].
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., and Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1): pp. 43–57. [https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x].
- Farheen, K. S., Reyes, N. J. D. G., Jeon, M. S., Kim, L. H. (2022). The Status of Ramsar wetlands in India: A review of ecosystem benefits, threats, and management strategies. *J. of Wetlands Research*, 24(2): pp. 123–141. [https://doi.org/10.17663/JWR.2022.24.2.123].
- Hanley, J. A., and McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1): pp. 29–36. [https://10.1148/radiology.143.1.7063747].
- Hedlund, J. S. U., Lv, H., Lehmann, P., Hu, G., Anderson, R. C., and Chapman, J. W. (2021). Unraveling the world's longest non-stop migration: The Indian ocean crossing of the globe skimmer dragonfly. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9: 698128. [https://doi.org/10.3389/fevo.2021.698128].
- Hernandez, P. A., Graham, C. H., Master, L. L., and Albert, D. L. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29(5): pp. 773–785. [https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x].
- Hijmans, R., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones P. G., and Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International J. of Climatology*, 25(15): pp. 1965–1978.
- Hong, J. S., Lee, G. S., Park, J. J., Mo, H. H., and Cho, K. J. (2019). Risk map for the range expansion of *Thrips palmi* in Korea under climate change: Combining species distribution models with land-use change. *Korean Society of Applied Entomology*, 22(3): pp. 666–674. [https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.04.013].
- Inoue, K. (2004). Critical species of Odonata in Japan. IUCN Regional Report. *International J. of Odonatology*, 7(2): pp. 311–324. [https://doi.org/10.1080/13887890.2004.9748219].
- IPCC. (2022). Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Ishida, K. (1996). *Monograph of Odonata larvae in Japan*. Hokkaido University Press., Sapporo, Japan. pp. 447. ISBN 4-8329-9631-2
- Jung, K. S. (2007). *Odonata of Korea*. Ilgongyuksa. Seoul, Korea. pp. 512. ISBN 978-89-958060-3-6.
- Jung, K. S. (2012). *The dragonflies and damselflies of Korea*. Nature and ecology. Seoul, Korea. pp. 400. ISBN 9788997429028.
- Kang, Y. J., Wang, W. J., Lee, H. N., Lee J. H., Lee, S. M., Kim, H. S. (2023). A selection methodology of the appropriate candidate sites of riverine wetlands for ecological connection. *J. of Wetlands Research*,

- 25(2): pp. 111–120.
[https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.2.111].
- Lee, D. Y., Lee, D. S., Bae, M. J., Hwang, S. J., Noh, S. Y., Moon, J. S., and Park, Y. S. (2018). Distribution patterns of Odonate assemblages in relation to environmental variables in streams of South Korea. *Insects*, 9(4): pp. 152.
[https://doi.org/10.3390/insects9040152].
- Lee, S. H., Youn, S. Z. (2022). Mechanism of wetland formation according to interaction of river bed fluctuation and plant success in the Hangang river estuary. *J. of Wetlands Research*, 24(4): pp. 320–330.
[https://doi.org/10.17663/JWR.2022.24.4.320].
- Maltchik, L., Stenert, C., Kotzian, C. B., and Pires, M. M. (2010). Responses of odonate communities to environmental factors in southern Brazil wetlands. *J. of the Kansas Entomological Society*, 83(3): pp. 208–220.
- Namgung, H. B., Kim, M. J., Baek, S. H., Lee, J. H., and Kim, H. J. (2020). Predicting potential current distribution of *Lycorma delicatula*(Hemiptera: Fulgoridae) using MaxEnt model in South Korea. *J. of Asia-Pacific Entomology*, 23(2): pp. 291–297.
[https://doi.org/10.1016/j.aspen.2020.01.009].
- National Institute of Biological Resources. (2022). Biodiversity of the Korean Peninsula.
[https://species.nibr.go.kr].
- National list of species of Korea (2022). National Institute of Biological Resources (Version 2023–03–27). [https://kbr.go.kr].
- Paulson, D., Schorr, M., Abbott, J., Bota-Sierra, C., Deliry, C., Dijkstra, K.-D., and Lozano, F. (2023). The World Odonata List. In O. Bánki, Y. Roskov, M. Döring, G. Ower, D. R. Hernández Robles, C. A. Plata Corredor, T. Stjernegaard Jeppesen, A. Örn, L. Vandepitte, D. Hobern, P. Schalk, R. E. DeWalt, K. Ma, J. Miller, T. Orrell, R. Aalbu, J. Abbott, R. Adlard, E. M. Adriaenssens, et al., Catalogue of Life Checklist (Version 2023–10–04).
[https://doi.org/10.48580/df7lv-75rv].
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., and Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4): pp. 231–259.
[https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026].
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., and Blair, M. E. (2017) Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7): pp. 887–893
- Ramsar (2016). Ramsar handbooks 5th edition. pp. 107.
[https://www.ramsar.org].
- Shin, M. S., Kim, T. G., and Cho, Y. H. (2022). Prediction of climate change effects on the potential distribution of cycad blue butterfly (*Luthrodes pandava*) in South Korea. *Entomological Research*, 52(12): pp. 522–531.
- Sung, C. Y., Shin, H. T., Choi, S. H., and Song, H. S. (2018). Predicting potential habitat for *Hanabusaya Asiatica* in the North and South Korean border region using MaxEnt. *Korean J. Environ. Ecol.*, 32(5): pp. 469–477.
[https://doi.org/10.13047/KJEE.2018.32.5.469]