

기후변화 시나리오에 따른 농업생태계 사돈물땡땡이(*Hydrochara affinis*)와 애물땡땡이(*Sternolophus rufipes*)의 미래 생물계절 변화 분석

전상민* · 김명현** · 어진우* · 최순군* · 정구복*** · 이병모****†

*국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구사, **농촌진흥청 연구개발과 농업연구사, ***국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구관

Future phenological changes of *Hydrochara affinis* and *Sternolophus rufipes* in agro-ecosystem under climate change scenarios

Jun, Sang-Min* · Kim, Myung-Hyun** · Eo, Jinu* · Choi, Soon-Kun* · Jung, Goo-Bok*** and Lee, Byung-Mo****†

*Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

**Researcher, R&D Planning Division, Rural Development Administration, Jeonju, Korea

***Senior Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

ABSTRACT

The objective of this study was to predict future phenological changes of *Hydrochara affinis* and *Sternolophus rufipes* in agro-ecosystem under climate change scenarios. Environmental shifts driven by climate change are affecting the phenology of species inhabiting agricultural ecosystems. A quantitative analysis of phenological change is necessary because these phenological changes can impact agricultural productivity. In this study, we monitored the adult flight phenology of *Hydrochara affinis* and *Sternolophus rufipes*, which were selected as climate change indicator species of agricultural ecosystem in South Korea, and simulated future phenological changes using SSP scenarios. The results indicate that the first flight of *Hydrochara affinis* and *Sternolophus rufipes* are expected to occur earlier in the future compared to past by 4-49 days and 4-50 days, respectively, under the SSP5-8.5 scenario. Phenological shifts were found to be more pronounced in SSP5-8.5 compared to SSP2-4.5. The analysis showed that, compared to the results of the RCP 8.5 scenario from previous studies, the flight timing of *Hydrochara affinis* and *Sternolophus rufipes* has been further advanced under the SSP5-8.5 scenario. Long-term monitoring is essential to analyze the impacts of climate change on agricultural ecosystems. The prediction methods and results of phenological changes in agricultural ecosystems presented in this study are expected to contribute to the development of climate adaptation strategies in agriculture.

Key words: Climate Change, *Hydrochara affinis*, *Sternolophus rufipes*, Phenology, SSP Scenario

1. 서론

생물계절은 식물 개화시기, 곤충 출현시기 및 조류의 이동시기와 같이 동물 또는 식물이 계절에 따라 주기적으로 나타내는 변화를 의미한다(Lieth, 1974). 기후변화로 인해 환경조건이 변함에 따라 생태계에 서식하는 생물들의 생물계절이 변하는 것으로 보고되고 있다(Badeck et al.,

2004; Choi et al., 2016; Fitter and Fitter, 2002; Jun et al., 2023; Lee et al., 2009). 농업생태계에 서식하는 생물들의 생물계절 변화는 농업의 생산성에 직접적으로 영향을 미친다. 식물의 생물계절은 농작물의 생육시기와 연관되어 있으며, 곤충의 생물계절은 병해충 발생시기 등에 영향을 미친다. 따라서 기후변화에 따른 농업생태계 변화는 농업 생산성 확보를 위해 주의깊게 살펴볼 필요가 있다.

†Corresponding author : leebm@korea.kr (55365, 166 Nongsangmyeong-ro, Jeonju, Jeollabuk-do, Korea. Tel. +82-63-238-2525)

ORCID 전상민 0000-0002-1424-903X
김명현 0000-0002-5590-6622
어진우 0000-0003-3577-9942

최순군 0000-0003-3494-5371
정구복 0000-0002-7680-4131
이병모 0009-0000-0638-4365

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 제6차 평가보고서(AR6)를 통해 전세계에서 온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 상향하지 않으면 지표의 평균온도가 2100년까지 2.8도 상승할 것으로 전망하였다(IPCC, 2023). 기온의 상승은 농업생태계 서식 생물의 생물계절에 직접적으로 영향을 미치며, 기후변화에 대한 대책을 수립하기 위해서는 생물계절에 대한 기후 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 유효적산온도(growing degree days, GDD)는 일평균기온에서 기저온도(생육한계온도)를 뺀 값을 합한 것으로 생물계절 연구에 널리 활용되고 있으며, 최근에는 기후변화에 따른 생물계절 변화 연구에 다양하게 적용되고 있다(Bonhomme, 2000; Hodgson et al., 2011; Jun et al., 2023; Kim and Lee, 2019; Kim et al., 2021; Nufio et al., 2010).

농촌진흥청 국립농업과학원에서는 기후민감성, 농업생태계 상징성, 종조사 용이성, 종분류 용이성, 대중성 등을 고려하여 농업생태계 기후변화 지표종 30종을 선정하였다(Kim et al., 2021). 지표생물은 식물, 수서무척추동물, 나비류, 거미류, 벌류, 육상딱정벌레류 등 6개 그룹으로 구분하여 선정하였으며, 이중 수서무척추동물로 사돈물뽕뿔(잔물뽕뿔, *Hydrochara affinis*), 애물뽕뿔(*Sternolophus rufipes*) 등 7종이 선정되었다. 물뽕뿔과(*Hydrophilidae*)는 논 생태계를 대표하는 수서 딱정벌레로, 완전변태 곤충으로서 수변부 땅속에서 우화한다(Choi et al., 2016; Yoon et al., 2020). 성충은 잡식성으로 알려져 있으며, 유충은 육식성으로 모기유충, 물달팽이 등을 먹는다. 특히 사돈물뽕뿔의 유충은 모기유충의 방제 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다(Baek et al., 2014; Choi et al., 2016). 사돈물뽕뿔(잔물뽕뿔)은 물뽕뿔과로 체장이 15 ~ 18 mm 정도로 물뽕뿔과 중에서 크기가 상대적으로 크며 딱지날개는 광택이 있다. 우리나라에서는 논에서 쉽게 관찰되며 야간의 빛에 의해 쉽게 유인되는 특성이 있다. 애물뽕뿔은 사돈물뽕뿔과 유사하지만 체장이 10 ~ 12 mm로 크기가 조금 작다. 우리나라에서는 중남부지역 논에서 쉽게 관찰되며 사돈물뽕뿔과 마찬가지로 야간의 빛에 의해 쉽게 유인되는 특성이 있다. 사돈물뽕뿔과 애물뽕뿔은 농업생태계 연구에 지속적으로 활용되어 왔으며, 기후변화에 민감한 특징을 가지고 있어 최근 농업생태계 기후변화 영향 연구에도 주요 대상으로 활용되고 있다(Choi et al., 2016; Eo et al., 2023; Yoon et al., 2020).

사돈물뽕뿔과 애물뽕뿔의 생물계절 관련 연구는 일부 수행된 바 있다. Yoon et al. (2020)은 기후변화 연구

에 활용하기 위해 사육 실험을 통해 잔물뽕뿔의 온도별 발육속도를 분석하여 온도에 따른 생리적 특성을 분석하고, 벼 재배 시기(5월 ~ 9월의 평균기온 데이터를 바탕으로 생물계절을 추정하였다. Eo et al. (2023)은 논 수서무척추동물 군집의 지역적 특성과 계절적 변동을 분석하고자 전국 5개 지역을 4년간(6월 및 8월) 조사하였으며, 환경조건 변화에 따른 사돈물뽕뿔의 개체수 변화에 대하여 고찰하였다. Choi et al. (2016)은 사돈물뽕뿔과 애물뽕뿔의 2014년 개체수 모니터링 자료를 바탕으로 유효적산온도와 생물계절의 통계적 연관성을 분석하고, RCP 8.5 시나리오 기반의 미래 생물계절 변화를 예측하였다.

선행연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 미래 기상 자료를 적용하여 사돈물뽕뿔 및 애물뽕뿔의 미래 생물계절 변화를 연구한 바 있으나(Choi et al., 2016), 통계적 분석을 위해 사용한 모니터링 자료의 기간이 짧고 RCP 8.5 시나리오에 한정된 연구결과를 제시하였다. 따라서, 장기간의 모니터링 자료를 이용하여 유효적산온도와 생물계절 간의 상관관계를 분석하고, 최신 기후변화 시나리오(SSP)와 온실가스 농도 경로를 적용하여 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 농업생태계 기후변화 지표종인 사돈물뽕뿔과 애물뽕뿔의 생물계절 모니터링을 실시하고, 기후변화 시나리오(SSP)를 적용하여 미래 생물계절 변화를 예측하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 생물계절 모니터링

2.1.1. 생물계절 자료 구축

모니터링을 통해 사돈물뽕뿔과 애물뽕뿔의 생물계절 자료를 구축하였다. 조사지역은 위도, 평균기온 등을 고려하여 철원, 당진, 부안, 해남 등 4지점을 선정하였다. 각 지점에는 생물계절 무인관측시스템(Choi et al., 2016)을 각각 1개씩 설치하여 디지털카메라를 이용해 사돈물뽕뿔과 애물뽕뿔을 일정한 시간 간격으로 촬영하였다. 무인관측시스템은 각 지역의 농업지역에 설치하였으며, 시스템 주변은 대부분 논으로 이루어져 있다. 무인관측시스템의 촬영부 인근에 유인등을 설치하여 유인되는 사돈물뽕뿔 및 애물뽕뿔을 매일 20시 ~ 23시에 30분 간격으로 촬영하였으며, 촬영된 영상은 실시간으로 실험실로 전송하여 개체 수를 조사하였다. 모니터링은 2014년에서

2020년까지 수행되었으며, 출현자료가 부족한 연도와 지역의 데이터는 분석에서 제외하였다. Fig. 1은 모니터링 지점의 위치를, Fig. 2는 모니터링 시스템의 구성을 나타내고 있다.

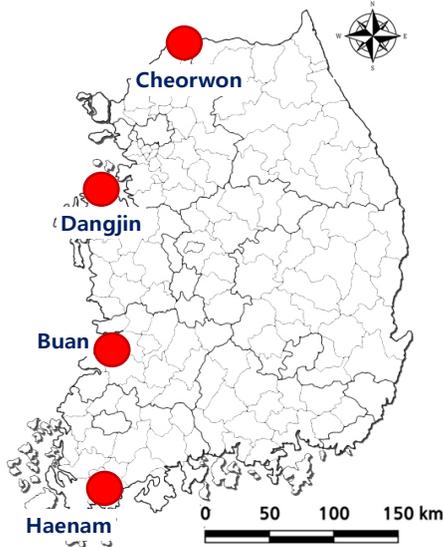


Fig. 1. The locations of four monitoring sites: Cheorwon, Dangjin, Buan, Haenam

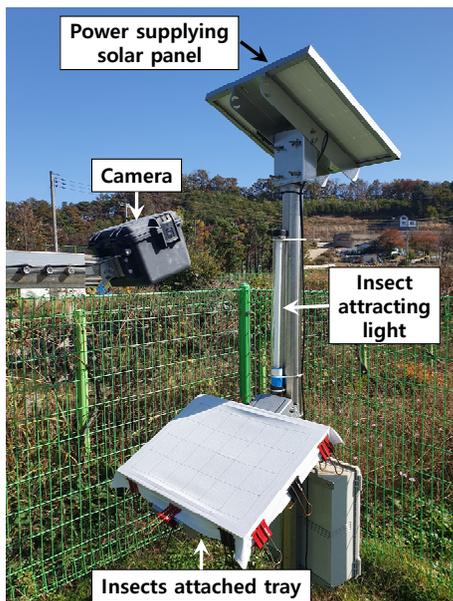


Fig. 2. Complete view of phenology monitoring system for insects in agricultural ecosystem

2.2. 미래 생물계절 변화 분석

2.2.1. 미래 기상자료 구축

미래 기상자료로 CIMP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) SSP 시나리오 자료를 사용하였다 (<https://esgf-mode.llnl.gov/search/cimp6/>). 기후변화 시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) 중 기후변화 연구에 주로 활용되는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5를 선택하여 6개 기후변수 자료가 2100년까지 모두 존재하는 11개의 Global circulation model (GCM)을 선정하여 자료를 수집하였다(GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, UKESM1-0-LL, ACCESS-CM2, CanESM5, INM-CM4-8, INM-CM5-0). GCM 자료는 전지구 모델링의 결과물로 각 지역에 적용하기 위해서는 편의보정을 수행해야 한다. 본 연구에서는 3 km 격자의 편의보정된 미래 기간별(근미래: 2011 ~ 2040, 중간미래: 2041 ~ 2070, 먼미래: 2071 ~ 2100) 자료를 활용하여 미래 생물계절 변화를 예측하였다(Jun et al., 2023; Oh et al., 2021).

2.2.2. 모니터링 자료 분석 및 미래 생물계절 예측

유효적산온도와 사돈물땀뿔 및 애물땀뿔 생물계절의 통계적 연관성을 분석하고 미래 기상자료를 적용하여 생물계절 변화를 예측하였다. 생물계절 특성은 지점별 최초(총 출현 개체수의 10% 출현), 최대(50%), 마지막(90%) 출현일을 계산하여 분석하였다. 분석은 R 패키지 “nlstimedist”를 사용하여 수행하였다(Jun et al., 2023; Steer et al., 2019). nlstimedist 패키지는 Franco (2018)의 분포함수를 생물계절 자료에 적용하여 비선형회귀를 통해 시간 경과에 따른 생물계절 자료를 적합시킬 수 있다. nlstimedist에서 누적분포함수(Cumulative distribution function, CDF)와 확률밀도함수(Probability density function, PDF)는 식 (1) 및 (2)와 같이 정의된다.

$$CDF: y = 1 - \left(1 - \frac{r}{1 + e^{-c(x-t)}}\right)^x \quad (1)$$

$$PDF: \frac{dy}{dx} = \left(1 - \frac{r}{1 + e^{-c(x-t)}}\right)^x \quad (2)$$

$$\left(\frac{x r c e^{-c(x-t)}}{(1 + e^{-c(x-t)})^2} \left(1 - \frac{r}{1 + e^{-c(x-t)}}\right) - \ln\left(\frac{r}{1 + e^{-c(x-t)}}\right) \right)$$

여기에서 x 는 날짜 또는 유효적산온도, r , c , t 는 비선형회귀식의 매개변수이다. r 는 프로세스가 발생하는 최대 비율(단위 없음)로 CDF가 증가하는 속도를 결정하며, c 는 r 이 최대값에 수렴하는 속도(단위: time^{-1})로 c 가 증가할수록 생물계절 과정의 시간적 펼쳐짐을 감소시킨다. t 는 생물계절 기간을 평가하는 전체적인 시간 지연(단위: time)을 나타내며, 생물학적 과정이 특정 조건에 노출된 후 즉시 발생하지 않고 일정 시간이 지나서 발생하는 것을 모의한다(Franco, 2018; Steer et al., 2019; Wu et al., 2015).

기후변화에 따른 사돈물땡땡이와 애물땡땡이의 미래 생물계절 변화 예측을 위해 모니터링 자료를 종합하여 생물계절을 통계적으로 가장 잘 모의하는 모델을 구축하였다. 기저온도(T_{base})를 $0 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 구간에서 1°C 간격으로 변화시키면서 결정계수가 가장 높을 때의 기저온도를 사돈물땡땡이 및 애물땡땡이의 기저온도로 가정하고, 확률분포함수의 매개변수를 추정하였다(Choi et al., 2016; Jun et al., 2023). 기저온도는 생물이 성장할 수 있는 최소한의 온도로, 생물학적 또는 생리학적 활동이 시작되는 기준 온도를 의미한다. 기저온도는 생물마다 다르며, 이를 기반으로 생육 단계별로 필요한 온도, 즉 적산온도를 계산하여 생물의 성장시기를 예측할 수 있다. 기저온도를 결정하는 방법은 생리학적 방법과 통계적 방법이 있다. 생리학적으로는 실험을 통해 온도에 따른 작물의 성장과 발달을 측정하여 결정할 수 있으며, 통계적으로는 유효적산온도에서 표준편차가 가장 작은 값을 설정하는 방법이 널리 활용되고 있다(Salazar-Gutierrez et al., 2013; Slafer and Rawson, 1995; Steinmaus et al., 2000; Yang et al., 1995).

미래 생물계절 예측을 위해 모니터링 자료를 분석하여 확률분포함수에서 총 출현 개체수 대비 10%, 50% 및 90% 출현 개체수에 해당하는 날짜를 최초, 최대 및 마지막 출현일로 지정하고, 각 출현일에 대한 유효적산온도를 계산하였다. 기후변화 시나리오 자료를 적용하여 미래 연도별 최초, 최대, 마지막 출현일의 유효적산온도에 도달하는 날짜를 계산하여 생물계절 발생일을 결정하였다. 미래 기상자료는 3 km 격자단위 자료에서 모니터링 시스템이 위치한 격자의 자료를 추출하여 사용하였으며, 과거 및 미래 기간별 생물계절 발생일의 평균값을 결과로 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 생물계절 모니터링 결과

사돈물땡땡이의 생물계절 모니터링 결과, 최초 출현시기는 당진에서 2018년에 144.5일로 가장 빨랐고, 해남에서 2019년에 206.8일로 가장 늦은 것으로 나타났다. 최대 출현시기는 당진에서 2016년 197.3일로 가장 빨랐고, 당진에서 2014년에 229.1일로 가장 늦었다. 마지막 출현시기는 해남에서 2015년에 224.8일로 가장 빨랐고, 당진에서 2016년에 331.3일로 가장 늦은 것으로 나타났다. 출현기간은 해남에서 2019년에 22.4일로 가장 짧았고, 당진에서 2016년에 168.3일로 가장 길게 나타났다.

사돈물땡땡이의 평균 최초 출현시기는 철원, 당진, 부안, 해남에서 각각 189.8일, 169.3일, 182.8일 및 191.8일로 당진에서 출현이 가장 빠른 것으로 나타났고, 해남에서 가장 늦은 것으로 분석되었다. 평균 최대 출현시기는 철원, 당진, 부안, 해남에서 각각 218.8일, 211.6일, 215.5일 및 214.4일로 당진에서 가장 빠르고 철원에서 가장 늦은 것으로 나타났다. 마지막 출현시기는 철원, 당진, 부안, 해남에서 각각 250.4일, 262.3일, 241.9일 및 230.8일로 해남에서 가장 빠르고 당진에서 가장 느린 것으로 나타났다.

애물땡땡이의 최초 출현시기는 당진에서 2014년에 192.5일로 가장 빨랐고, 당진에서 2018년이 231.7일로 가장 늦은 것으로 나타났다. 최대 출현시기는 부안에서 2016년이 206.6일로 가장 빨랐고, 당진에서 2020년이 240.3일로 가장 늦은 것으로 나타났다. 마지막 출현시기는 부안에서 2016년에 224.3일로 가장 빨랐고, 당진에서 2020년에 226.9일로 가장 늦은 것으로 나타났다. 출현기간은 당진에서 2018년이 13.9일로 가장 짧았고, 부안에서 2018년에 147.9일로 가장 긴 것으로 나타났다. 철원은 개체수가 적어 분석에서 제외하였다.

애물땡땡이의 평균 최초 출현시기는 당진, 부안, 해남에서 각각 211.5일, 202.5일 및 207.0일로 부안에서 출현이 가장 빠른 것으로 나타났고, 당진에서 가장 늦은 것으로 분석되었다. 평균 최대 출현시기는 당진, 부안, 해남에서 각각 233.8일, 223.4일 및 223.6일로 부안에서 가장 빠르고 당진에서 가장 늦은 것으로 나타났다. 마지막 출현시기는 당진, 부안, 해남에서 각각 253.7일, 260.0일 및 240.5일로 해남에서 가장 빠르고 부안에서 가장 느린 것으로 나타났다.

사돈물땡땡이와 애물땡땡이의 지역별 평균 최초 출현

시기는 169.3일 ~ 191.8일 및 202.5일 ~ 211.5일로 사돈물땡땡이의 최초 출현시기가 한달 이상 빠른 것으로 분석되었다. 하지만 사돈물땡땡이와 애물땡땡이의 마지막 출현시기는 230.8일 ~ 262.3일 및 240.5일 ~ 253.7일로 큰 차이를 보이지 않아 사돈물땡땡이의 출현기간이 애물땡땡이에 비해 긴 것으로 나타났다.

선행연구에서 서양금혼초의 개화시기의 경우 평균기온의 영향에 따라 주로 해남에서 가장 빠르고 철원에서 가장 느린 것으로 분석되었으나(Jun et al., 2023), 물땡땡이류의 경우 지역별로 평균기온에 따른 통일된 경향성이 나타나지 않았다. 이는 곤충의 출현은 기온 이외에도 다른 영향을 받을 수 있기 때문으로 사료되며, 장기간 지속적인 모니터링을 통해 다른 환경요소와의 연관성도 분석할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한 식물은 고정된 장소에서 지속적인 관찰이 가능하나 곤충의 경우 유인등을 이

용해 분류판에 날아온 개체만을 관찰하기 때문에, 모니터링 과정에서의 오차가 식물보다 클 것으로 판단된다.

지역과 연도를 통합하여 유효적산온도에 따른 사돈물땡땡이의 출현 생물계절을 분석하였다. 기저온도(Tbase)를 0~15℃ 구간에서 1℃ 간격으로 변화시키면서 결정계수가 가장 높을 때의 기저온도를 산정한 결과, 사돈물땡땡이의 출현 생물계절을 가장 잘 설명하는 기저온도는 13℃ (R²=0.856)로 나타났다. 사돈물땡땡이는 GDD13(기저온도를 13℃로 설정한 유효적산온도)이 390.4 dgree-day에서 최초로 출현을 하고, 822.1 dgree-day에서 최대 출현, 1,216.2 dgree-day에서 마지막 출현을 하는 것으로 나타났다.

유효적산온도에 따른 애물땡땡이의 출현 생물계절을 분석하였다. 애물땡땡이의 출현 생물계절을 가장 잘 설명하는 기저온도를 유도한 결과 6℃(R²=0.866)로 확인되었다. 애물땡땡이는 GDD6이 1,425.0 dgree-day에서 최초로 출현을 하

Table 1. Phenological Characteristics of *Hydrochara affinis* by regions and years. The first, maximum, and last flight dates correspond to the dates when 10%, 50%, and 90% of the total emerged adult individuals have appeared, respectively. The flight duration refers to the time span between the first and last emergence dates

Site	Year	Flight date (days after Jan 1st)			Flight duration (days)
		First (10%)	Maximum (50%)	Last (90%)	
Cheorwon	2018	183.5	222.7	256.0	72.5
	2019	196.1	214.9	244.7	48.5
	Mean	189.8	218.8	250.4	60.5
Dangjin	2014	192.7	229.1	255.4	62.6
	2016	163.0	197.3	331.3	168.3
	2017	185.7	211.7	242.4	56.7
	2018	129.1	204.0	257.0	127.8
	2019	172.8	211.1	236.6	63.9
	2020	172.4	216.3	251.1	78.7
	Mean	169.3	211.6	262.3	93.0
Buan	2014	192.1	218.0	243.2	51.1
	2016	189.5	209.7	231.7	42.2
	2018	194.8	228.3	250.7	55.9
	2019	192.9	221.0	245.0	52.1
	2020	144.5	200.6	239.1	94.6
	Mean	182.8	215.5	241.9	59.2
Haenam	2015	199.4	214.3	224.8	25.4
	2018	167.4	199.7	226.0	58.7
	2019	206.8	220.1	229.2	22.4
	2020	193.5	223.3	243.2	49.7
	Mean	191.8	214.4	230.8	39.1

고, 1,953.4 degree-day에서 최대 출현, 2,395.6 degree-day에서 마지막 출현을 하는 것으로 나타났다. Table 1과 Table 2는 지점 및 연도별 사돈물뽕뿔이와 애물뽕뿔이의 최초, 최대, 마지막 출현시기 및 출현기간을 나타내고 있고, Fig. 3 및 Fig. 4는 지점 및 연도별 사돈물뽕뿔이와 애물뽕뿔이

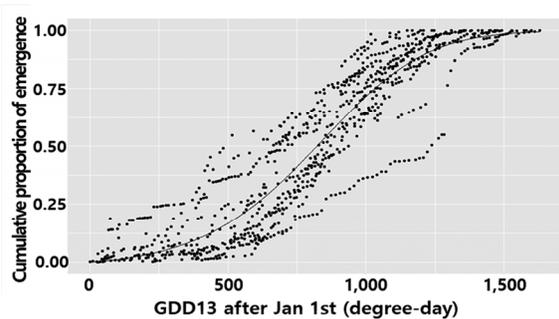
출현일수의 CDF 및 PDF를 나타내고 있다.

3.2. 미래 생물계절 변화 예측

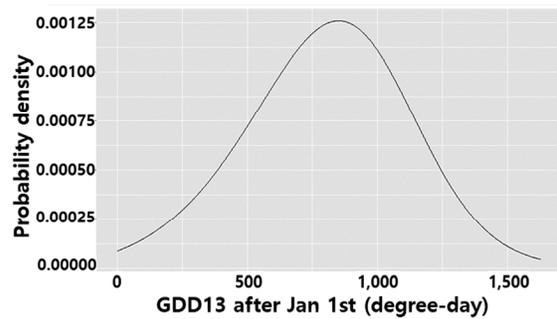
사돈물뽕뿔이와 애물뽕뿔이의 GDD 값을 적용하여 SSP 시나리오에 따른 미래 기상자료에 기반한 생물계절

Table 2. Phenological characteristics of *Sternolophus rufipes* by regions and years. The first, maximum, and last flight dates correspond to the dates when 10%, 50%, and 90% of the total emerged adult individuals have appeared, respectively. The flight duration refers to the time span between the first and last flight dates

Site	Year	Flight date (days after Jan 1st)			Flight duration (days)
		First (10%)	Maximum (50%)	Last (90%)	
Dangjin	2014	192.5	227.8	253.3	60.8
	2016	196.5	238.2	266.1	69.6
	2017	213.6	234.0	247.5	33.9
	2018	231.7	233.5	245.6	13.9
	2019	208.5	229.0	242.7	34.1
	2020	226.4	240.3	266.9	40.5
	Mean	211.5	233.8	253.7	42.1
Buan	2014	202.6	221.6	243.1	40.5
	2016	190.3	206.6	224.3	34.0
	2017	210.8	232.3	252.0	41.3
	2018	199.6	227.5	247.5	47.9
	2019	215.5	230.3	242.6	27.1
	2020	195.9	221.8	250.4	54.5
	Mean	202.5	223.4	243.3	40.9
Haenam	2014	203.1	218.7	229.0	25.9
	2016	206.9	226.5	243.5	36.6
	2018	202.2	215.1	242.6	40.4
	2019	208.8	222.9	236.5	27.6
	2020	213.8	234.9	250.8	37.0
	Mean	207.0	223.6	240.5	33.5



(a) Cumulative density function



(b) Probability density function

Fig. 3. Cumulative density function (CDF, a) and probability density function (PDF, b) of GDD13 (Growing degree days when the base temperature is 13°C) for *Hydrochara affinis*

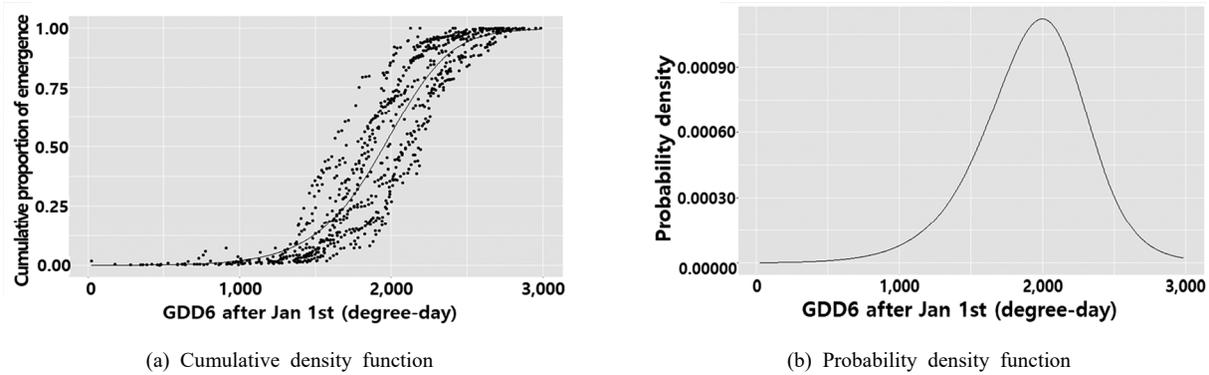


Fig. 4. Cumulative density function (CDF, a) and probability density function (PDF, b) of GDD6 (Growing degree days when the base temperature is 6°C) for *Sternolophus rufipes*

Table 3. Changes in future phenological characteristics of *Hydrochara affinis* under SSP scenarios

Site	Dates and duration (days after Jan 1st)	SSP historical (1981 ~ 2010)	SSP2-4.5 (2011 ~ 2040)	SSP2-4.5 (2041 ~ 2070)	SSP2-4.5 (2071 ~ 2100)
			SSP5-8.5 (2011 ~ 2040)	SSP5-8.5 (2041 ~ 2070)	SSP5-8.5 (2071 ~ 2100)
Buan	First (10%)	178	170	162	156
			169	157	141
	Maximum (50%)	214	204	195	189
			203	190	174
Last (90%)	242	230	220	213	
		229	213	197	
Duration (days)	64	60	58	57	
		59	57	56	
Haenam	First (10%)	178	169	161	154
			169	155	138
	Maximum (50%)	214	203	194	187
			202	188	171
Last (90%)	243	229	219	211	
		228	212	194	
Duration (days)	65	60	58	57	
		60	57	56	

변화를 모의하였다. 모든 지역과 시나리오에서 사돈물땡땡이와 애물땡땡이의 미래 기간 출현시기는 빨라지는 것으로 나타났다. 사돈물땡땡이의 경우 철원과 당진에서 마지막 출현시기에 필요한 GDD13을 일부 시나리오에서 충족하지 못하는 것으로 나타나, 모델링 결과는 부안과 해남에 대해서만 제시하였다. Table 3과 Table 4는 사돈물땡땡이 및 애물땡땡이의 미래 생물계절 모의 결과를 나타내고 있으며, Fig. 5와 Fig. 6은 부안에서 사돈물땡땡이의 생물계절 변화 및 철원에서 애물땡땡이의 생물계절 변화 그래프를 나타내고 있다.

사돈물땡땡이의 미래 생물계절 분석 결과, 최초, 최대 및 마지막 출현시기는 기준년도(1981 ~ 2010)에 부안과 해남에서 각각 178일, 214일, 242일 및 64일과 178일, 214일, 243일 및 65일로 큰 차이를 보이지 않았으나, 미래 출현시기는 해남이 부안에 비해 1일 ~ 3일 더 빨라지는 것으로 나타났다. 이는 기후변화로 인해 미래 해남의 평균 기온이 부안보다 더 크게 상승하기 때문으로 판단된다. 출현기간은 부안과 해남에서 큰 차이를 보이지 않았다. SSP2-4.5 시나리오에 비해 SSP5-8.5 시나리오에서 출현시기는 1일 ~ 17일 더 빨라지는 것으로 나타났으며, 이는

Table 4. Changes in future phenological characteristics of *Sternolophus rufipes* under SSP scenarios

Site	Dates and duration (days after Jan 1st)	SSP historical (1981 ~ 2010)	SSP2-4.5 (2011 ~ 2040)	SSP2-4.5 (2041 ~ 2070)	SSP2-4.5 (2071 ~ 2100)
			SSP5-8.5 (2011 ~ 2040)	SSP5-8.5 (2041 ~ 2070)	SSP5-8.5 (2071 ~ 2100)
Cheorwon	First (10%)	210	203	196	190
			202	191	177
	Maximum (50%)	238	229	221	215
			228	215	200
	Last (90%)	267	254	242	235
			252	235	219
	Duration (days)	58	51	47	44
			51	45	42
Dangjin	First (10%)	206	197	189	183
			196	184	168
	Maximum (50%)	232	222	213	206
			221	207	191
	Last (90%)	256	243	232	225
			242	226	209
	Duration (days)	51	46	43	42
			46	42	40
Buan	First (10%)	202	193	186	179
			193	180	164
	Maximum (50%)	228	218	209	203
			217	203	187
	Last (90%)	251	238	228	221
			237	222	205
	Duration (days)	49	45	43	42
			44	42	41
Haenam	First (10%)	201	191	183	175
			191	176	159
	Maximum (50%)	227	215	207	199
			215	200	182
	Last (90%)	250	236	225	217
			235	218	200
	Duration (days)	49	45	43	42
			44	42	41

기존 연구들의 결과와 마찬가지로 SSP5-8.5 시나리오에서 기온이 더욱 가파르게 상승하기 때문에 판단된다.

애물뽕뽕이의 미래 생물계절 분석 결과, 사돈물뽕뽕이와 마찬가지로 미래 출현시기는 모든 기간 및 시나리오에서 빨라지는 것으로 분석되었다. 생물계절은 먼 미래(2071 ~ 2100)로 갈수록 더욱 빨라지는 것으로 분석되었으며, 해남에서 SSP5-8.5 시나리오에 따른 마지막 출현시기는 최대 50일까지 빨라지는 것으로 분석되었다. 생물계

절의 변화량은 사돈물뽕뽕이와 마찬가지로 해남에서 가장 큰 것으로 나타났으며, SSP2-4.5에 비해 SSP5-8.5에서 변화량이 큰 것으로 분석되었다.

선행연구(Choi et al., 2016)에서는 RCP 8.5 시나리오에 의해 사돈물뽕뽕이 및 애물뽕뽕이의 출현시기가 10.2일 ~ 28.0일 및 7.1일 ~ 27.3일 빨라지는 것으로 분석되었으나, 본 연구에서 SSP5-8.5 시나리오를 적용한 결과 사돈물뽕뽕이 및 애물뽕뽕이의 출현시기는 4일 ~ 49일 및 4일 ~ 50일

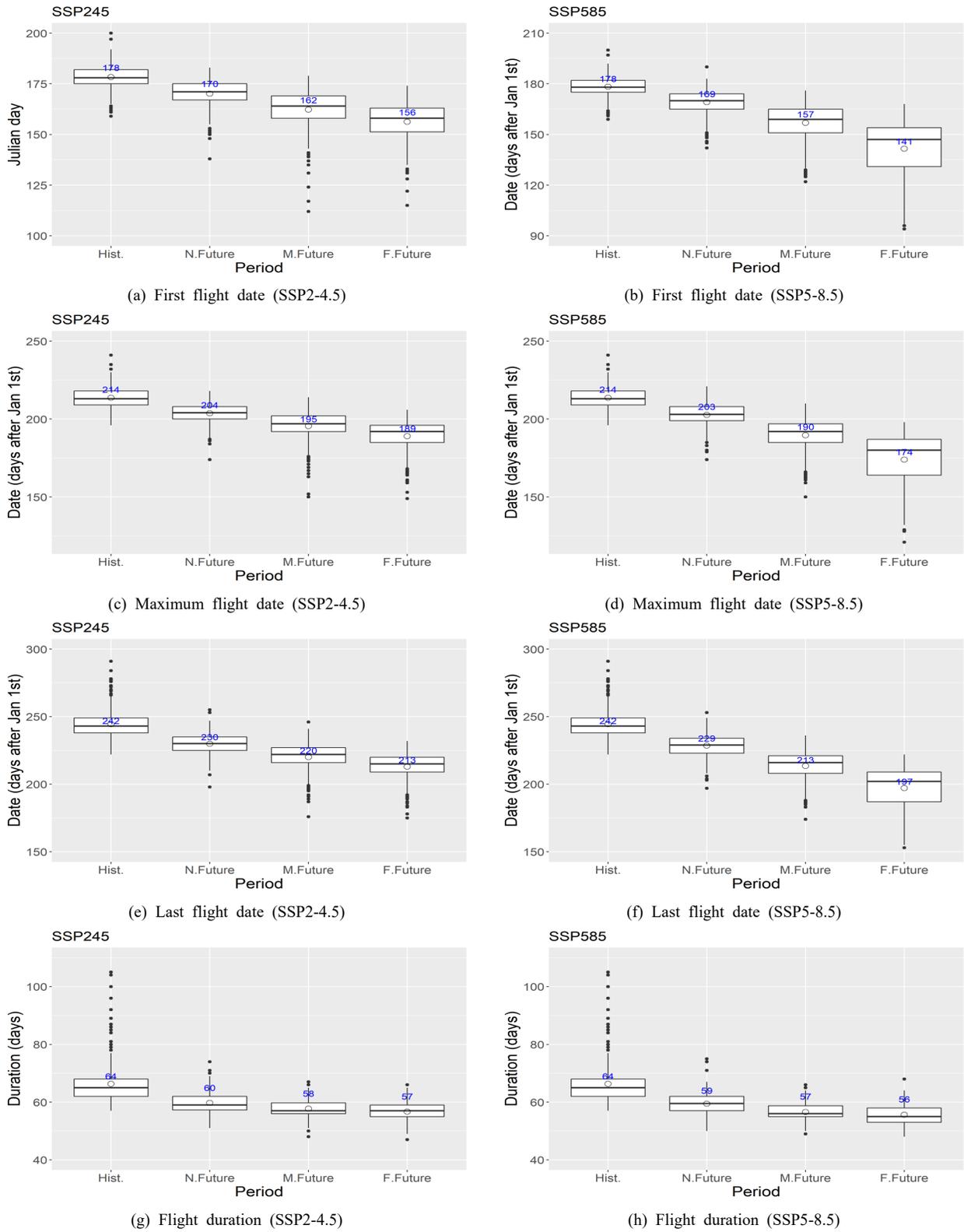


Fig. 5. Changes in future flying characteristics of *Hydrochara affinis* under SSP scenarios (Buan)

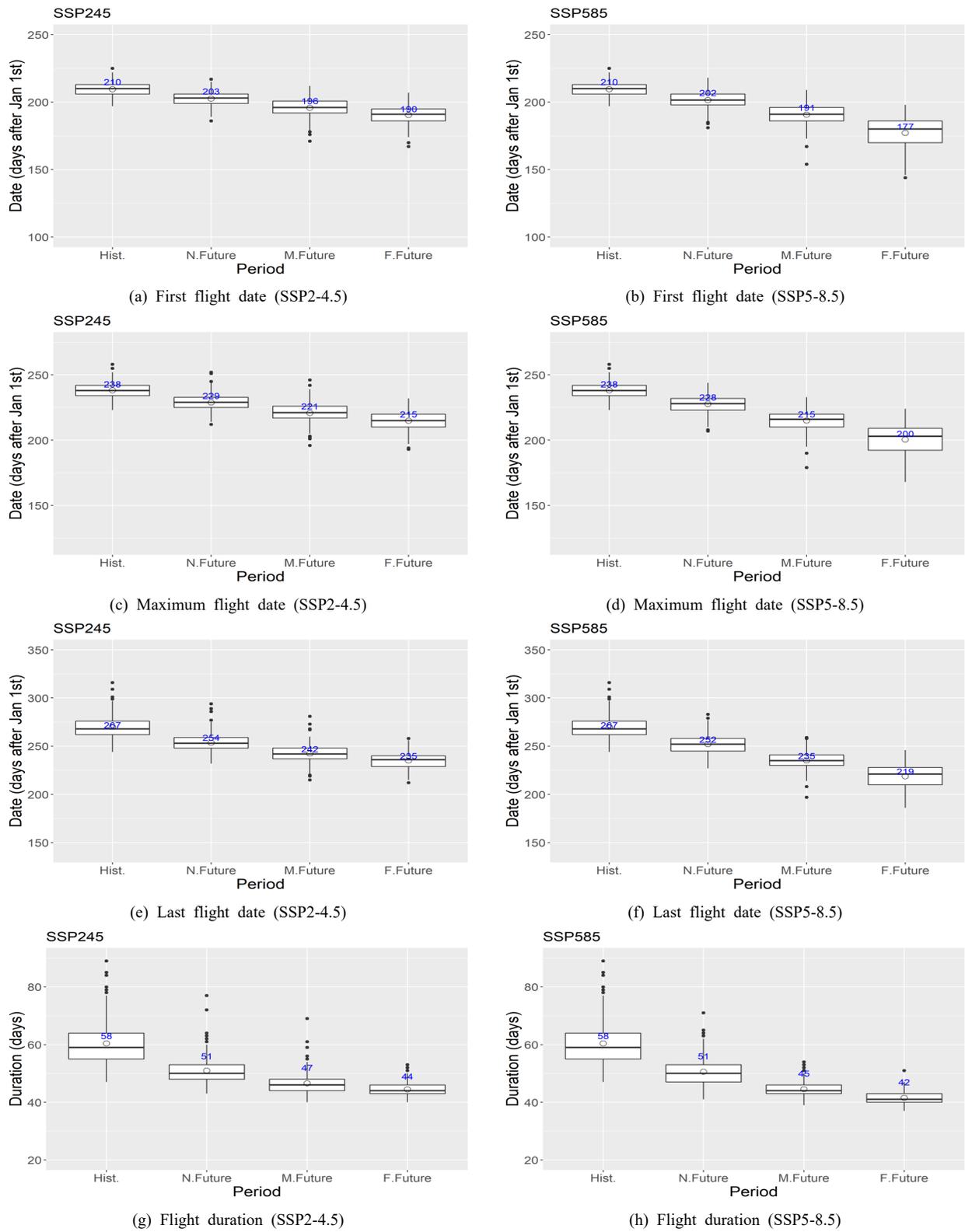


Fig. 6. Changes in future flying characteristics of *Sternolophus rufipes* under SSP scenarios (Cheorwon)

앞당겨지는 것으로 나타났다. 최근 발표된 SSP5-8.5 시나리오에서 RCP 8.5 시나리오에 비해 생물계절의 변화량이 더 큰 것으로 분석되었으며, 이는 IPCC에서 발표한 바와 같이 SSP5-8.5 시나리오의 이산화탄소 배출농도가 RCP 8.5 시나리오에 비해 크기 때문에 기온의 상승이 더욱 뚜렷하게 나타나기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 농업생태계의 생물계절에 기후변화가 미치는 영향을 분석하기 위해 농업생태계 지표생물인 사돈물땡땡이와 애물땡땡이를 대상으로 미래 기후변화 시나리오(SSP) 기반 생물계절의 변화를 예측하였다. 모니터링 자료를 기반으로 유효적산온도와 땡땡이류의 출현수 사이의 통계적 연관성을 분석하고, 미래 기상자료를 적용하여 출현시기 변화를 모의 하였다.

사돈물땡땡이와 애물땡땡이의 최초, 최대 및 마지막 출현시기는 과거에 비해 미래 기간으로 갈수록 빨라지는 것으로 분석되었으며, SSP2-4.5 시나리오에 비해 SSP5-8.5 시나리오에서 출현시기가 더욱 앞당겨지는 것으로 나타났다. 또한, 선행연구의 RCP 8.5 시나리오에 비해 SSP5-8.5 시나리오에서 출현시기가 더욱 빠르게 앞당겨지는 것으로 분석되었다. 이는 기후변화로 인해 미래 기온인 상승함에 따라 유효적산온도에 도달하는 기간이 짧아지기 때문이며, 이러한 현상은 먼 미래에, SSP5-8.5 시나리오에서 더욱 가속되는 것으로 나타났다기 때문이다.

사돈물땡땡이와 애물땡땡이는 농업생태계 기후변화 지표생물로 농업생태계의 기후변화 영향을 분석하기 위해서는 향후 지속적인 관찰과 미래 변동성 예측 연구가 필요하다. 농업생태계 지표생물에 관한 연구를 통해 생태계 건전성 및 생물다양성 보전을 위한 계획 수립의 근거를 마련할 수 있다. 또한, 농업생태계에 서식하는 생물들의 생물계절 변화는 농작물의 생산성에도 영향을 미칠 수 있으므로, 지표생물에 대한 지속적인 연구를 통해 기후변화에 대한 농업생태계의 반응을 분석해야 한다. 본 연구에서 제시한 기후변화에 따른 농업생태계 생물계절 변화 예측 방법 및 결과는 향후 농업생태계 기후변화 적응대책 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 고유연구사업 ‘기후영향 지표생물·물환경 변동 실태조사 및 환경생태 빅데이터 분석 (PJ016740)’의 지원에 의해 이루어진 것임

References

- Badeck FW, Bondeau A, Bottcher K, Doktor D, Lucht W, Schaber J, Sitch S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol* 162(2): 295-309. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x
- Baek HM, Kim DG, Baek MJ, Lee CY, Kang HJ, Kim MC, Yoo JS, Bae YJ. 2014. Predation efficiency and preference of the Hydrophilid water beetle *Hydrochara affinis* (Coleoptera: Hydrophilidae) larvae on two mosquitos *Culex pipiens molestus* and *Ochlerotatus togoi* under laboratory conditions (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Biol* 32(2): 112-117. doi: 10.11626/KJEB.2014.32.2.112
- Bonhomme R. 2000. Bases and limits to using ‘degree.day’ units. *Eur J Agron* 13(1): 1-10. doi: 10.1016/S1161-0301(00)00058-7
- Choi SK, Kim MH, Choi LJ, Eo J, Bang HS. 2016. Prediction of the flight times of *Hydrochara affinis* and *Sternolophus rufipes* in paddy fields based on RCP 8.5 scenario (in Korean with English abstract). *Korean J Agric For Meteorol* 18(1): 16-29. doi: 10.5532/KJAFM.2016.18.1.16
- Eo J, Jun SM, Choi SK, Yeop SJ, An NH. 2023. Seasonal changes in community composition and abundance of aquatic insects and gastropods in rice fields (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Biol* 41(4): 335-344. doi: 10.11626/KJEB.2023.41.4.335
- Fitter AH, Fitter SR. 2002. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science* 296(5573): 1689-1691. doi: 10.1126/science.1071617
- Franco M. 2018. The time distribution of biological phenomena - Illustrated with the London marathon.

- PeerJ Prepr 6: e27175v1. doi: 10.7287/peerj.preprints.27175v1
- Hodgson JA, Thomas CD, Oliver TH, Anderson BJ, Brereton TM, Crone EE. 2011. Predicting insect phenology across space and time. *Glob Change Biol* 17(3): 1289-1300. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02308.x
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for policymakers. In: Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC. p. 1-34.
- Jun SM, An NH, Eo J, Choi SK, Yeop SJ, Kim MH. 2023. Predicting flowering phenology and suitable habitat distribution changes of *Hypochaeris radicata* under Shared Socio-economic Pathway scenarios in South Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-2): 941-955. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.941
- Kim JW, Lee IY. 2019. Germination characteristic of Cat's ear (*Hypochaeris radicata*) (in Korean with English abstract). *Weed Turf Sci* 8(2): 179-183. doi: 10.5660/WTS.2019.8.2.179
- Kim MH, Choi SK, Choi SW, Jung C, Oh YJ, Kim MK, Eo J, Yeob SJ, Bang JH. 2021. Selection of 30 indicator species for climate change in agroecosystem using Analytical Hierarchy Process (AHP) and expert questionnaire survey (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 12(5-1): 421-429. doi: 10.15531/kscrcr.2021.12.5.421
- Lee KM, Kwon WT, Lee SH. 2009. A study on plant phenological trends in South Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Reg Geogr* 15(3): 337-350.
- Lieth H. 1974. *Phenology and seasonality modeling*. Berlin, Germany: Springer.
- Nufio CR, McGuire CR, Bowers MD, Guralnick RP. 2010. Grasshopper community response to climatic change: Variation along an elevational gradient. *PLoS ONE* 5(9): e12977. doi: 10.1371/journal.pone.0012977
- Oh YJ, Kim MH, Choi SK, Kim MK, Eo J, Yeob SJ, Bang JH, Lee YH. 2021. Prediction of the spatial distribution of suitable habitats for *Geranium carolinianum* under SSP scenarios (in Korean with English abstract). *Ecol Resilient Infrastruct* 8(3): 154-163. doi: 10.17820/eri.2021.8.3.154
- Salazar-Gutierrez MR, Johnsonb J, Chaves-Cordoba B, Hoogenbooma G. 2013. Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Int J Plant Prod* 7(4): 741-762.
- Slafer GA, Rawson HM. 1995. Rates and cardinal temperatures for processes of development in wheat: Effects of temperature and thermal amplitude. *Aust J Plant Physiol* 22(6): 913-926. doi: 10.1071/PP9950913
- Steer NC, Ramsay PM, Franco M. 2019. NLSTIMEDIST: An R package for the biologically meaningful quantification of unimodal phenology distributions. *Methods Ecol Evol* 10(11): 1934-1940. doi: 10.1111/2041-210X.13293
- Steinmaus SJ, Prather TS, Holt JS. 2000. Estimation of base temperatures for nine weed species. *J Exp Bot* 51(343): 275-286. doi: 10.1093/jexbot/51.343.275
- Wu D, Zhao X, Liang S, Zhou T, Huang K, Tang B, Zhao W. 2015. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Glob Change Biol* 21(9): 3520-3531. doi: 10.1111/gcb.12945
- Yang S, Logan J, Coffey DL. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agric For Meteorol* 74(1-2): 61-74. doi: 10.1016/0168-1923(94)02185-M
- Yoon SS, Kim MH, Eo J, Song YJ. 2020. Temperature-dependent development models and phenology of *Hydrochara affinis* (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Biol* 38(2): 222-230. doi: 10.11626/KJEB.2020.38.2.222