

계층분석방법(AHP)과 전문가 설문조사를 활용한 농업생태계

기후변화 지표생물 30종 선정

김명현*† · 최순군* · 최세웅** · 정철의*** · 오영주**** · 김민경***** · 어진우* · 엽소진* · 방정환*****

*국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구사, **국립목포대학교 환경교육과 교수, ***국립안동대학교 식물학과 교수,
****(주)미래환경생태연구소 소장, *****국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구관, *****국립농업과학원 기후변화평가과 박사후연구원

Selection of 30 Indicator Species for Climate Change in Agroecosystem Using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Expert Questionnaire Survey

Kim, Myung-Hyun*† · Choi, Soon-Kun* · Choi, Sei-Woong** · Jung, Chuleui*** · Oh, Young-Ju**** · Kim, Min-Kyeong***** · Eo, Jinu*, Yeob, So-Jin* · Bang, Jeong Hwan*****

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

**Professor, Department of Environmental Education, Mokpo National University, Muan, Korea

***Professor, Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong, Korea

****CEO, Institute for Future Environmental Ecology Co., Ltd, Jeonju, Korea

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

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

ABSTRACT

It is more efficient to select and monitor a few climate-sensitive organisms to assess the impacts of climate change on agroecosystems. In this study, indicator species of climate change in agroecosystem in South Korea were selected through analytical hierarchy process and an expert questionnaire survey. Climate sensitivity, agroecosystem symbolism, survey easiness, identification easiness, and public interest were selected as criteria for indicator species, with weights of 0.38 (± 0.15), 0.23 (± 0.13), 0.18 (± 0.11), 0.14 (± 0.09), and 0.07 (± 0.06), respectively. According to these criteria, 30 indicator species were finally selected from six taxonomic groups of plants, aquatic invertebrates, bees, terrestrial beetles, butterflies, and spiders as follows. Seven plant species were selected: *Taraxacum officinale*, *Capsella bursa-pastoris*, *Veronica persica*, *Hypochaeris radicata*, *Lamium amplexicaule*, *Trigonotis peduncularis*, and *Conyza sumatrensis*. Seven aquatic invertebrate species were selected: *Pomacea canaliculata*, *Cybister chinensis*, *Hydrochara affinis*, *Sternolophus rufipes*, *Hydaticus grammicus*, *Appasus japonicus*, and *Rhantus suturalis*. Five butterfly species were selected: *Eurema mandarina*, *Chilo suppressalis*, *Pieris rapae*, *Papilio xuthus*, and *Colias erate*. Three spider species were selected: *Argiope bruennichi*, *Larinioides cornutus*, and *Neoscona adianta*. Four bee species were selected: *Vespa velutha nigrithorax*, *V. simillima simillima*, *V. mandarinia*, and *V. simillima xanthoptera*. Four species were selected for terrestrial beetles: *Pheropsophus javanus*, *P. jessoensis*, *Platydracus brevicornis*, and *Chlaenius micans*. The selected species are expected to be used as indicators for assessing the impacts of climate change in agroecosystems in the future.

Key words : Agroecosystem, Climate Change, Indicators, Phenology, Species Distribution

1. 서론

기후변화는 동식물의 개화시기, 발생시기, 이동시기와 같은 생물계절과 그들의 서식지 분포에 영향을 주며, 그 결

†Corresponding author : wildflower72@korea.kr (166 Nongsangmyeong-ro, Wanju, Jeollabuk-do, 55365, Republic of Korea. Tel. +82-31-201-3687)

ORCID 김명현 0000-0002-5590-6622
최순군 0000-0003-3494-5371
최세웅 0000-0001-6326-399X
정철의 0000-0001-8134-9279
오영주 0000-0001-8861-8558

김민경 0000-0003-4148-055X
어진우 0000-0003-3577-9942
엽소진 0000-0002-4732-6273
방정환 0000-0001-7569-9600

Received: August 25, 2021 / Revised: September 28, 2021 / Accepted: October 08, 2021

과 지역의 생물다양성, 생태계 군집 구조를 변화시킨다 (Warren et al., 2001; Broadmeadow et al., 2005; Pearson, 2006; Thorup et al., 2007; Charmantier et al., 2008; Di and Katano, 2008; Crimmins et al., 2009; Neveu, 2009; Gordo and Sanz, 2010; Lawler et al., 2010; Musolin et al., 2010; Lowe, 2012; Dai et al., 2013; Guo et al., 2015). 이러한 기후변화에 의한 생물분포 및 생물계절의 변화는 자연생태계 뿐만 아니라 농업생태계에 새로운 외래종의 침입, 병해충 확산 등의 가능성을 높이기 때문에 작물의 생장을 직접적으로 방해하거나 잡초, 병해충 등의 관리에 필요한 간접적인 영농활동의 비용을 증가시킬 것이다.

국가에서는 기후영향에 대응하기 위하여 관계부처 합동으로 “제1차 국가 기후변화 적응대책(‘11~’15)”, “제2차 국가 기후변화 적응대책(‘16~’20)”, “제3차 국가 기후변화 적응대책(‘21~’25)을 수립하였다. 농업분야에서는 2014년 “농업·농촌 및 식품산업기본법”이 개정되면서, “농업분야 기후변화 실태조사 및 영향·취약성평가”와 관련된 법적업무가 신설되었다. 동법 시행규칙 제5조에 의한 기후변화 영향·취약성평가의 내용에는 “농업생태계의 생물다양성 및 생물계절 변화에 관한 사항”이 명시되어 있다. 따라서, 이러한 법적 업무를 충실히 수행하기 위해서는 효과적이고 안정적인 자료의 수집이 중요하다.

기후변화에 의해 발생하는 농업생태계의 영향을 파악하기 위해서 농업생태계 내에 존재하는 모든 생물종을 조사하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 기후변화의 영향을 효율적으로 모니터링할 수 있는 방안을 마련하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 지표생물의 이용은 국내 외적으로 기후변화를 포함한 환경변화를 효율적으로 감시하기 위한 좋은 수단으로 간주되고 있다.

국내에서 수행되고 있는 관련 연구현황을 살펴보면, 다음과 같다. 국립생물자원관은 기후변화가 한반도 생물종 분포

에 미치는 영향 및 취약성에 대한 효율적인 감시 및 예측 방법을 마련하기 위하여, 기후변화 생물지표종 100종과 후보종 30종을 선정하여 발표하였다(NIBR, 2021). 기상청에서는 봄철 개화하는 개나리, 벚나무 등의 개화시기, 나비, 제비, 뱀 등의 출현시기, 매미, 종다리, 삿갚기 등의 소리, 단풍나무 등의 단풍시기 등을 지속적으로 모니터링하고 있다(KMA, 2021). 국립수목원은 기후변화 취약 산림식물종(분포 지역별 취약종 100종, 관심종 50종)을 대상으로 계절성(개엽, 개화, 결실, 단풍, 낙엽 등 시기)을 조사하고 있다(Korea National Arboretum, 2010). 분포 지역별 취약종으로는 침엽수 9종, 활엽수 49종, 초본류 42종을 선정하였고, 관심종으로는 침엽수 8종, 활엽수 33종, 초본류 9종을 선정하였다. 이 밖에도 Han et al. (2010)은 논에 서식하는 물뚱뚱이류 중 잔물뚱뚱이, 애물뚱뚱이, 알물뚱뚱이, *Berosus elongatulus*, 점박이물뚱뚱이, 뒷가시물뚱뚱이 및 북방물뚱뚱이 7종을 지역적 분포 특성을 나타내기 때문에 지표생물로 활용할 수 있을 것으로 보고하였다. Park and Jung (2016)은 2003년 국내 침입한 등검은말벌의 확산과 분포가 최근 일련의 기후변화와 관련이 있음을 분석하고 이를 토대로 분포 예측모형에 적용하여 분포 예측 지도를 생산하였다.

본 연구에서는 농업생태계 내에 서식하는 생물을 대상으로 기후변화를 효율적으로 추적할 수 있는 종을 선발하여 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

기후변화에 따른 농업생태계 영향을 파악할 수 있는 지표생물의 선정은 문헌조사, 현장조사, 전문가 자문 및 전문가 설문조사를 통하여 이루어졌다(Fig. 1).

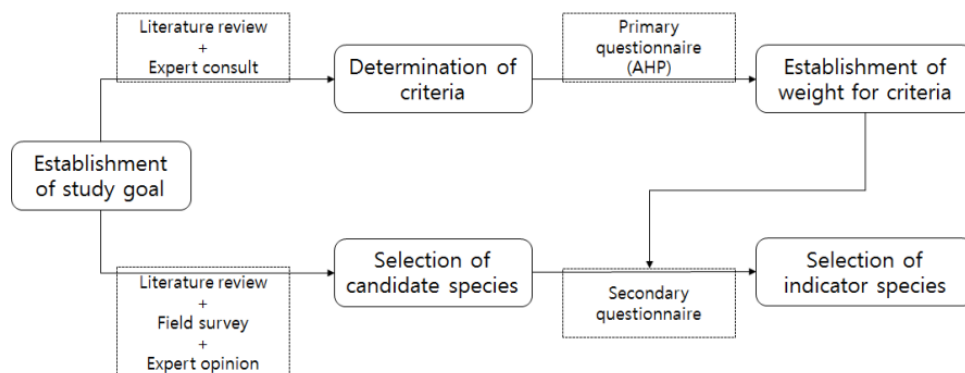


Fig. 1. Procedure for the selection of indicator species

2.1. 지표생물 선정 기준 및 기준별 가중치 산정

농업생태계에서 기후변화를 나타낼 수 있는 지표생물을 선정하기 위한 기준은 문헌조사와 전문가 자문을 통하여 선정하였다. 지표생물 선정 기준은 2016년 2월 각 생물분류군별 전문가 22명을 패널로 한 자문회의를 통하여 결정되었다. 선정된 기준 항목에 대한 정량적 가중치는 각 분류군별로 10년 이상 연구경력을 가진 40명의 전문가 (Table 1)를 대상으로 9점 척도의 계층분석방법(AHP) 1차 설문조사를 통하여 산출했다(Table 2). AHP는 자연과학적 방법으로는 측정이 불가능한 사항에 대하여 인간의 판단을 통해 합리적으로 종합하는 방법으로 절대평가가 아닌 쌍대비교를 통한 상대평가 방식이다. 일반적으로 통계를 기반으로 한 연구에서는 정규분포를 위하여 충분한 표본 수가 필요하지만, AHP는 표본 수보다는 충분한 지식과 경험을 가진 전문가의 확보가 더 중요하다(Lee and

Kim, 2015). 1차 설문조사에서 추가적으로 각 분류군별로 기후변화 지표생물을 추천받았다.

2.2. 지표생물 선정

식물, 수서무척추동물, 나비류, 거미류, 벌류, 육상딱정벌레류 6개 그룹으로 구분하여 문헌조사와 현장조사를 통한 본 연구팀 추천 및 1차 설문조사를 통한 전문가 추천에서 2회 이상 추천을 받은 종을 후보종으로 선정했다. 그 결과, 식물 그룹에서는 큰개불알풀, 뚜껍별꽃, 꽃마리, 서양민들레, 냉이, 광대나물, 개보리뽕이, 서양금혼초, 실망초, 큰망초, 여우구슬, 좀가지풀, 각시그령 총 13 분류군이 선정되었다. 수서무척추동물 그룹에서는 왕우렁이, 물방개, 잔물뽕뽕이, 애물뽕뽕이, 긴꼬리투구새우, 꼬마줄물방개, 물자라, 애기물방개, 각시물자라, 대륙좁잠자리 총 10분류군이 선정되었다. 나비류 그룹에서는

Table 1. Constitution of expert panel for the primary and secondary questionnaire survey

Survey	Taxonomic groups					Total
	Plants	Aquatic invertebrates	Bees	Terrestrial beetles	Butterflies and spiders	
Primary	8	8	8	8	8	40
Secondary	12	19	13	14	16	85

Table 2. The primary questionnaire form (AHP assessment)

Criterion	Scale*									Criterion
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Climate sensitivity										Agroecosystem symbolism
Climate sensitivity										Survey easiness
Climate sensitivity										Identification easiness
Climate sensitivity										Public interest
Agroecosystem symbolism										Survey easiness
Agroecosystem symbolism										Identification easiness
Agroecosystem symbolism										Public interest
Survey easiness										Identification easiness
Survey easiness										Public interest
Identification easiness										Public interest

*Definitions of pairwise comparison numerical scales. 1: equal important; 3: moderate important; 5: strong important; 7: very strong important; 9: extreme important

노랑나비, 남방노랑나비, 배추흰나비, 호랑나비, 벼애나방, 독나방, 이화명나방 총 7분류군이 선정되었다. 거미류 그룹에서는 긴호랑거미, 기생왕거미, 각시어리왕거미 총 3종이 선정되었다. 벌류 그룹에는 등검은말벌, 털보말벌, 장수말벌, 황말벌, 말벌, 땅벌, 쯤말벌, 꼬마장수말벌, 검정말벌 10종이 선정되었다. 육상딱정벌레류 그룹에는 끝무늬녹색면지벌레, 중국머리면지벌레, 중국면지벌레, 남방폭탄면지벌레, 폭탄면지벌레, 홍딱지반날개 총 6분류군이 선정되었다.

각 분류군별로 선정된 후보종을 대상으로 종별 평가표 (Table 3)를 작성하여 각 분류군별로 전문가 85여명을 대상으로 2차 설문조사를 실시하였다. 설문조사표에는 각 후보종에 대한 일반적인 특징과 1차 설문조사에서 수집된 전문가의 의견이 함께 제시되었다. 각 후보종에 대하여 5개 지표생물 선정 기준에 대한 가능성을 5단계로 표시하도록 하였다.

Table 3. The secondary questionnaire form for each candidate species

Criterion	Score				
	1	2	3	4	5
Climate sensitivity					
Agroecosystem symbolism					
Survey easiness					
Identification easiness					
Public interest					

전문가의 설문 결과로 얻어진 값을 기반으로 각 후보종에 대한 점수를 다음과 같은 식에 의해서 계산하였다.

$$Score = \frac{\sum_i^n (\alpha A_i + \beta B_i + \gamma C_i + \delta D_i + \epsilon E_i)}{n}$$

여기에서 A_i, B_i, C_i, D_i, E_i 는 각각 기후민감성, 농업생태계 상징성, 종조사 용이성, 종분류 용이성, 대중성에 대한 i 번째 전문가 평가 결과 값, $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ 은 각 선정기준에 대한 가중치를 나타낸다.

Table 4. Criteria for selecting the indicator species of climate change on the agricultural sector

Criteria	Explanation of criteria
Climate sensitivity	Species that show the characteristics of changes in geographical distribution or phenology due to climate.
Agroecosystem symbolism	Species that play the role of major functional groups (natural enemies, pests etc.) in agricultural ecosystems.
Survey easiness	Species that are easy to observe in the field and can be investigated at low cost.
Identification easiness	Species that the general public can identify easily in the field or in the laboratory.
Public interest	Species that are well known to the general public because of their social, economic and cultural significance.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지표생물 선정 기준 및 가중치 결정

전문가 자문회의를 통하여 기후민감성, 농업생태계 상징성, 종조사 용이성, 종분류 용이성, 대중성의 5개 기준이 선정되었다(Table 4). 지표생물의 기본적인 조건은 환경의 변화에 적절하게 반응을 나타내는 종(군)이어야 하며, 본 연구에서 기후변화라는 환경변화에 초점을 맞추고 있기 때문에, 기후민감성에 대한 기준은 필수 항목이 된다(Rainio and Niemelä, 2003; Holt and Miller, 2011). 기후변화에 따른 생물의 반응은 크게 지리적 분포와 생물계절의 변화로 나타난다(Foden et al., 2008; Hegland et al., 2009). 이러한 측면에서 보면, 기후변화에 따라 지리적 분포의 변화를 나타낼 수 있는 종은 우리나라의 남쪽 또는 북쪽에 편중되어 분포하는 종이 대상이 될 수 있다(Choi and Na, 2010; Han et al., 2010; Park and Jung, 2016; Lee et al., 2020). 생물계절의 변화를 나타낼 수 있는 종은 상대적으로 전국적으로 분포하면서 온도에 의해 개화시기 또는 발생시기가 민감하게 반응하는 종이 대상이 될 수 있다(Kwon et al., 2002; Choi et al., 2011). Groot et al. (1995)은 유럽에서 기후변화의 효과를 평가하기 위한 생물지표의 선정에서 첫 번째 단계로 기후민감도(climate sensitivity)를 제시했다. 농업생태계를 평가하기 위해서는 농업생태계를 상징적으로 나타낼 수 있는 종을 선정하는 것이 의미있다. 예를 들면, 천적, 화분매개 등의 농업생태계에 긍정적인 역할을 하는 종이나

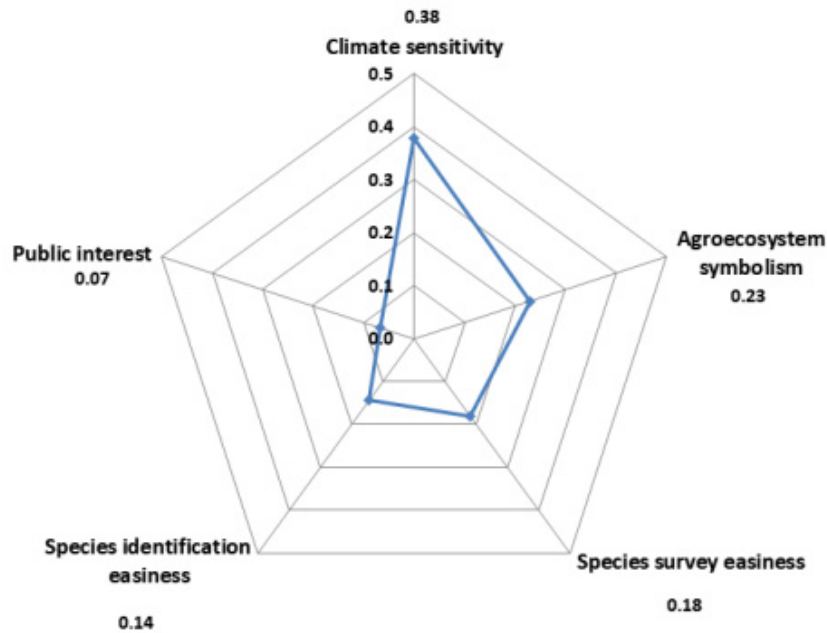


Fig. 2. Weights of criteria to select indicator species for the impact assessment of climate change on the agricultural sector

해충, 잡초 등의 부정적 역할을 하는 종을 선택하는 것이 농업생태계 영향평가에 의미를 가질 것이다.

기후변화에 따른 생태계 영향을 파악하기 위하여 모든 생물을 대상으로 조사하는 것은 거의 불가능하기 때문에, 지표생물을 선정하여 조사 범위를 최소화함으로써 조사의 효율성을 높이는 것이 필요하다. 이러한 맥락에서 조사의 효율성을 고려한 기준으로서 조사의 용이성과 종분류 용이성은 의미가 있다(Carignan and Villard, 2002; Rainio and Niemelä, 2003; Niemi and McDonald, 2004; Lee et al., 2010; Holt and Miller, 2011; Han et al., 2015). 조사 용이성은 야외 조사에서 쉽게 관찰 또는 채집할 수 있어야 하는 것이다. 추가적으로 조사에 필요한 비용 또한 적어야 할 것이다. 이러한 조사 용이성은 선정된 지표생물의 활용성을 증진하는 중요한 요인으로 작용한다. 동정의 오류는 최종 연구 결과에 큰 영향을 줄 수 있다. 대중성은 사회, 경제, 문화적으로 일반 대중들에게 잘 알려진 종으로 종 분류 및 동정에 대한 용이성과 함께 향후 시민모니터링 등으로 확대할 경우 매우 중요한 요소로 판단된다.

선정된 5개 기준에 대한 가중치를 결정하기 위하여

전문가 40명을 대상으로 AHP 조사를 한 결과, 30명의 결과를 얻었다. 그 결과 가중치 평균값은 기후민감성이 $0.38(\pm 0.15)$, 농업생태계 상징성이 $0.23(\pm 0.13)$, 종조사 용이성이 $0.18(\pm 0.11)$, 종분류 용이성이 $0.14(\pm 0.09)$, 대중성이 $0.07(\pm 0.06)$ 의 값을 나타냈다(Fig. 2).

3.2. 지표생물 선정

지표생물 후보종 총 49종에 대한 전문가 설문조사 결과, 평균값 3.5 이상인 30종을 지표생물로 최종 선정하였다(Table 5). 각 분류군별 선정 결과는 다음과 같다.

식물 후보종 13종에 대한 전문가 12명의 평가 결과, 7종이 지표생물로 선정되었고, 서양민들레, 냉이, 큰개불알풀, 서양금혼초, 광대나물, 꽃마리, 큰망초 순으로 높은 값을 나타냈다. 수서무척추동물 후보종 10종에 대한 전문가 19명의 평가 결과, 7종이 지표생물로 선정되었고, 왕우렁이, 물방개, 잔물뽕뽕이, 애물뽕뽕이, 꼬마줄물방개, 물자라, 애기물방개 순으로 높은 값을 나타냈다. 나비류 후보종 7종에 대한 전문가 16명의 평가 결과, 5종이 지표생물로 선정되었고, 남방노랑나비, 이화명나방, 배추

흰나비, 호랑나비, 노랑나비 순으로 높은 값을 나타냈다. 거미류 후보종 3종에 대한 전문가 11명의 평가 결과, 3종이 지표생물로 선정되었고, 긴호랑거미, 기생왕거미, 각시어리왕거미 순으로 높은 값을 나타냈다. 벌류 후보종 10종에 대한 전문가 13명의 평가 결과, 4종이 지표생물로 선정되었고, 등검은말벌, 털보말벌, 장수말벌, 황말벌 순으로 높은 값을 나타냈다. 육상딱정벌레류 후보종 6종

에 대한 전문가 14명의 평가 결과, 4종이 지표생물로 선정되었고, 남방폭탄먼지벌레, 폭탄먼지벌레, 홍딱지반날개, 끝무늬녹색먼지벌레 순으로 높은 값을 나타냈다. 선정된 30개 지표생물 중에서 긴호랑거미가 4.18로 가장 높은 평가 점수를 나타냈다.

지표생물별 선정 기준에 대한 기여도 평가 결과, 모든 종에서 가중치가 가장 높은 기후민감성이 가장 높은 기

Table 5. List of indicator species selected for the impact assessment of climate change on the agricultural sector

Taxonomic groups	Scientific name	Selection criteria (mean score \pm SD)					Total
		Climate sensitivity	Agroecosystem symbolism	Survey easiness	Identification easiness	Public interest	
Plants (7 species)	<i>Taraxacum officinale</i>	1.20 \pm 0.51	0.88 \pm 0.71	0.90 \pm 0.00	0.68 \pm 0.08	0.34 \pm 0.03	4.00 \pm 0.55
	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	1.08 \pm 0.39	1.00 \pm 0.15	0.87 \pm 0.07	0.65 \pm 0.07	0.34 \pm 0.03	3.94 \pm 0.51
	<i>Veronica persica</i>	1.39 \pm 0.47	0.79 \pm 0.15	0.80 \pm 0.09	0.65 \pm 0.07	0.26 \pm 0.08	3.88 \pm 0.60
	<i>Hypochaeris radicata</i>	1.36 \pm 0.34	0.77 \pm 0.15	0.78 \pm 0.12	0.61 \pm 0.09	0.26 \pm 0.05	3.78 \pm 0.54
	<i>Lamium amplexicaule</i>	1.27 \pm 0.34	0.79 \pm 0.18	0.80 \pm 0.12	0.62 \pm 0.07	0.23 \pm 0.08	3.70 \pm 0.46
	<i>Trigonotis peduncularis</i>	1.14 \pm 0.43	0.73 \pm 0.19	0.81 \pm 0.09	0.62 \pm 0.09	0.28 \pm 0.06	3.58 \pm 0.61
	<i>Conyza sumatrensis</i>	1.39 \pm 0.30	0.79 \pm 0.15	0.68 \pm 0.17	0.49 \pm 0.15	0.20 \pm 0.09	3.55 \pm 0.49
Aquatic invertebrates (7 species)	<i>Pomacea canaliculata</i>	1.50 \pm 0.29	0.99 \pm 0.18	0.79 \pm 0.20	0.55 \pm 0.17	0.32 \pm 0.44	4.15 \pm 0.62
	<i>Cybister chinensis</i>	1.40 \pm 0.25	0.96 \pm 0.19	0.62 \pm 0.18	0.63 \pm 0.09	0.35 \pm 0.02	3.94 \pm 0.45
	<i>Hydrochara affinis</i>	1.42 \pm 0.30	0.89 \pm 0.15	0.71 \pm 0.14	0.57 \pm 0.10	0.26 \pm 0.06	3.84 \pm 0.53
	<i>Sternolophus rufipes</i>	1.47 \pm 0.20	0.84 \pm 0.14	0.72 \pm 0.14	0.56 \pm 0.13	0.21 \pm 0.07	3.80 \pm 0.31
	<i>Hydaticus grammicus</i>	1.24 \pm 0.17	0.82 \pm 0.14	0.75 \pm 0.12	0.62 \pm 0.08	0.23 \pm 0.07	3.66 \pm 0.31
	<i>Appasus japonicus</i>	1.29 \pm 0.32	0.78 \pm 0.12	0.69 \pm 0.13	0.58 \pm 0.07	0.30 \pm 0.06	3.64 \pm 0.39
Butterflies (5 species)	<i>Rhantus suturalis</i>	1.26 \pm 0.22	0.80 \pm 0.16	0.70 \pm 0.13	0.52 \pm 0.11	0.22 \pm 0.06	3.51 \pm 0.40
	<i>Eurema mandarina</i>	1.69 \pm 0.19	0.73 \pm 0.17	0.74 \pm 0.11	0.59 \pm 0.09	0.26 \pm 0.07	4.01 \pm 0.37
	<i>Chilo suppressalis</i>	1.49 \pm 0.24	1.08 \pm 0.14	0.66 \pm 0.15	0.48 \pm 0.18	0.25 \pm 0.07	3.97 \pm 0.50
	<i>Pieris rapae</i>	1.12 \pm 0.26	0.95 \pm 0.24	0.83 \pm 0.11	0.66 \pm 0.07	0.34 \pm 0.02	3.90 \pm 0.44
	<i>Papilio xuthus</i>	1.35 \pm 0.28	0.70 \pm 0.24	0.77 \pm 0.18	0.70 \pm 0.00	0.35 \pm 0.02	3.87 \pm 0.55
Spiders (3 species)	<i>Colias erate</i>	1.09 \pm 0.19	0.78 \pm 0.20	0.81 \pm 0.11	0.66 \pm 0.08	0.32 \pm 0.06	3.65 \pm 0.41
	<i>Argiope bruennichi</i>	1.46 \pm 0.27	0.98 \pm 0.22	0.83 \pm 0.14	0.63 \pm 0.09	0.29 \pm 0.06	4.18 \pm 0.57
	<i>Larinioides cornutus</i>	1.38 \pm 0.26	0.96 \pm 0.17	0.74 \pm 0.15	0.55 \pm 0.12	0.20 \pm 0.03	3.82 \pm 0.67
	<i>Neoscona adianta</i>	1.31 \pm 0.20	0.96 \pm 0.17	0.72 \pm 0.16	0.55 \pm 0.13	0.20 \pm 0.06	3.74 \pm 0.50
Bees (4 species)	<i>Vespa velutha nigrithorax</i>	1.61 \pm 0.32	0.69 \pm 0.19	0.71 \pm 0.20	0.53 \pm 0.08	0.29 \pm 0.07	3.82 \pm 0.67
	<i>V. simillima simillima</i>	1.31 \pm 0.26	0.82 \pm 0.21	0.69 \pm 0.19	0.51 \pm 0.11	0.24 \pm 0.07	3.57 \pm 0.69
	<i>V. mandarina</i>	1.24 \pm 0.24	0.69 \pm 0.20	0.69 \pm 0.19	0.58 \pm 0.12	0.33 \pm 0.03	3.53 \pm 0.38
	<i>V. simillima xanthoptera</i>	1.31 \pm 0.26	0.82 \pm 0.21	0.69 \pm 0.19	0.51 \pm 0.11	0.24 \pm 0.07	3.52 \pm 0.51
Terrestrial beetles (4 species)	<i>Pheropsophus javanus</i>	1.52 \pm 0.21	0.76 \pm 0.25	0.71 \pm 0.19	0.56 \pm 0.15	0.29 \pm 0.06	3.83 \pm 0.75
	<i>P. jessoensis</i>	1.36 \pm 0.36	0.69 \pm 0.26	0.71 \pm 0.19	0.57 \pm 0.15	0.30 \pm 0.06	3.62 \pm 0.88
	<i>Platydracus brevicornis</i>	1.25 \pm 0.26	0.83 \pm 0.29	0.68 \pm 0.14	0.57 \pm 0.14	0.18 \pm 0.05	3.52 \pm 0.51
	<i>Chlaenius micans</i>	1.28 \pm 0.32	0.82 \pm 0.20	0.68 \pm 0.18	0.52 \pm 0.13	0.20 \pm 0.06	3.50 \pm 0.74

여도를 나타냈고, 가중치가 가장 낮은 대중성이 가장 낮은 기여도를 나타냈다(Table 5). 선정 기준별 평가 점수 상위 5종은 다음과 같이 나타났다(Table 5). 기후변화 민감도는 남방노랑나비(1.69), 등검은말벌(1.61), 남방폭탄먼지벌레(1.52), 왕우렁이(1.50), 이화명나방(1.49), 애물뽕뽕이(1.47) 순으로 높게 나타났다. 농업생태계 상징성은 이화명나방(1.08), 냉이(1.00), 왕우렁이(0.99), 긴호랑거미(0.98), 물방개(0.96) 순으로 높게 나타났다. 조사 용이성은 서양민들레(0.9), 냉이(0.87), 긴호랑거미(0.83), 배추흰나비(0.83), 노랑나비(0.81) 순으로 높게 나타났다. 분류 용이성은 호랑나비(0.70), 서양민들레(0.68), 배추흰나비(0.66), 노랑나비(0.66), 냉이(0.65) 순으로 높게 나타났다. 대중성은 호랑나비(0.35), 물방개(0.35), 서양민들레(0.34), 배추흰나비(0.34), 냉이(0.34) 순으로 높게 나타났다.

기후변화에 따른 생물종의 반응은 일반적으로 높은 신뢰도 수준의 생물계절과 서식지 분포 변화로 나타난다(IPCC, 2014). 본 연구에서 기후변화 지표생물로 선정된 30종에 대한 활용성은 다양할 것으로 판단된다. 본 연구의 지표생물 30종 중에서 광대나물, 큰개불알풀, 남방노랑나비, 긴호랑거미는 국립생물자원관의 기후변화 생물지표종 및 후보종에도 선정된 종이다(NIBR, 2021).

본 연구에서 선정된 기후변화 지표생물 30종 중 몇몇 종들은 이미 기후변화와 관련된 연구에 활용되고 있다. 서양민들레는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 분포하고 있으며, 이른 봄에 개화하는 특성을 나타내고 있어서 개화 생물계절 연구에 많이 활용되고 있다(Miller-Rusing, 2008; Johnson, 2016; Szabó et al., 2016; Brugnara et al., 2020). 하지만 생물계절 연구에서 오류를 최소화하기 위해서는 개화시기 등 생물계절의 특정 시기보다는 전체 기간을 모니터링할 필요가 있다(Miller-Rushing et al., 2008). 서양금혼초와 큰망초는 우리나라에서 현재 제주도를 중심으로 남부지방에 주로 분포하고 있지만, 이들의 적합 서식지는 기후변화에 의해서 북상할 것으로 전망되었다(Nam et al., 2018; Kim et al., 2017). 열대지방 원산지인 왕우렁이의 국내 서식 및 월동 가능지역은 기후변화에 의해서 전국적으로 확산되는 것으로 밝혀졌다(Bea et al., 2012). Han et al. (2010)은 잔물뽕뽕이와 애물뽕뽕이는 지리적 분포에 차이를 나타내고 있어서 기후변화의 지표로 활용 가능할 것으로 판단하였고, Choi et al. (2016)은 기후변화에 의해서 이들 두 종에 대하여 성충 비행 시기가 빨라질 것으로 예측하였다. Gordo and Sanz (2005)는 배추흰나비의 장기

간의 성충 출현 자료를 통하여 배추흰나비의 성충 출현시기는 봄철 기온과 음의 상관관계를 가지며, 따뜻한 봄에 출현 시기가 빨라진다는 것을 보고하였다. 외래 침입 해충인 등검은말벌은 2003년 우리나라에 침입한 이래 매년 평균 9.4 km씩 분포 면적을 확대해 가고 있으며, 미래에도 분포 가능지는 지속적으로 확대될 것으로 전망하였다(Park and Jung, 2016).

4. 결론

농업생태계의 기후변화 영향을 파악하기 위해 모든 생물을 대상으로 평가하는 것보다 기후변화에 민감한 생물을 선정하여 평가하는 것이 보다 효율적이고 현실적이다. 이러한 측면에서 농업생태계에 서식하는 생물을 대상으로 문헌조사, 현장조사 및 전문가 설문조사를 통하여 농업생태계 기후변화 지표생물을 선정하였다. 지표생물을 선정하는 기준으로 기후민감성, 농업생태계 상징성, 종조사 용이성, 종분류 용이성, 대중성이 선정되었고, 가중치는 각각 $0.38(\pm 0.15)$, $0.23(\pm 0.13)$, $0.18(\pm 0.11)$, $0.14(\pm 0.09)$ 및 $0.07(\pm 0.06)$ 로 나타났다. 이들 기준에 의해 최종적으로 다음과 같이 식물, 수서무척추동물, 나비류, 거미류, 벌류, 육상딱정벌레류 6개 분류군에서 30개 지표생물이 선정되었다. 식물에서는 서양민들레, 냉이, 큰개불알풀, 서양금혼초, 광대나물, 꽃마리, 큰망초 7종이 선정되었다. 수서무척추동물에서는 왕우렁이, 물방개, 잔물뽕뽕이, 애물뽕뽕이, 꼬마줄물방개, 물자라, 애기물방개 7종이 선정되었다. 나비류에서는 남방노랑나비, 이화명나방, 배추흰나비, 호랑나비, 노랑나비 5종이 선정되었다. 거미류에서는 긴호랑거미, 기생왕거미, 각시어리왕거미 3종이 선정되었다. 벌류에서는 등검은말벌, 털보말벌, 장수말벌, 황말벌이 선정되었다. 육상딱정벌레에서는 남방폭탄먼지벌레, 폭탄먼지벌레, 홍딱지반날개, 끝무늬늑색먼지벌레 4종이 선정되었다. 이와 같이 선정된 30종은 향후 농업생태계의 기후변화 영향 평가를 위한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01480801, PJ01480802, PJ01480803, PJ01480804)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Bae MJ, Kwon YS, Park YS. 2012. Effects of global warming on the distribution of overwintering *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae) in Korea. Korean J Limnol 45(4): 453-458.
- Broadmeadow MSJ, Ray D, Samuel CJA. 2005. Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. Forestry 78: 145-161.
- Brugnara Y, Auchmann R, Rutishauser T, Gehring R, Pietragalla B, Begert M, Sigg C, Knechtl V, Konzelmann T, Calpini B, Brönnimann S. 2020. Homogeneity assessment of phenological records from the Swiss Phenology Network. Int J Biometeorol 64(1): 71-81.
- Carignan V, Villard MA. 2002. Selecting indicator species to monitor ecological integrity: a review. Environ Monit Assess 78: 45-61.
- Charmantier A, McCleery RH, Cole LR, Perrins C, Kruuk LE, Sheldon BC. 2008. Adaptive phenotype plasticity in response to climate change in a wild bird population. Science 320: 800-803.
- Crimmins TM, Crimmins MA, Bertelsen CD. 2009. Flowering range changes across an elevation gradient in response to warming summer temperatures. Glob Change Biol 15: 1141-1152.
- Choi SK, Kim MH, Choe 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. Korean J Agric For Meteorol 18(1): 16-29. (in Korean with English abstract)
- Choi SW, Na SD. 2010. Review of the description pattern of newly recorded insect species from 1999 to 2009 in Korea. Anim Cells Syst 14(3): 207-212.
- Choi WI, Park YK, Park YS, Ryo MI, Lee HP. 2011. Changes in voltinism in a pine moth *Dendrolimus spectabilis* (Lepidoptera: Lasiocampidae) population: Implications of climate change. Appl Entomol Zool 46(3): 319-325.
- Dai J, Wang H, Ge Q. 2013. Multiple phenological responses to climate change among 42 plant species in Xian, China. Int J Biometeorol 57: 749-758.
- Di H, Katano I. 2008. Phenological timings of leaf budburst with climate change in Japan. Agric For Meteorol 148: 512-516.
- Foden WB, Mace GM, Vié JC, Angulo A, Butchart SHM, DeVantier L, Dublin HT, Gutsche A, Stuart SN, Turak E. 2008. Species susceptibility to climate change impacts. In: Vié JC, Hilton-Taylor C, Stuart SN (ed). Wildlife in a changing world—an analysis of the 2008 IUCN Red List of threatened species. Switzerland: IUCN Gland. p. 77-88.
- Gordo O, Sanz JJ. 2005. Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. Oecologia 146: 484-495.
- Gordo O, Sanz JJ. 2010. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. Glob Change Biol 16: 1082-1106.
- de Groot RS, Ketner P, Ovaas AH. 1995. Selection and use of bio-indicator to assess the possible effects of climate change in Europe. J Biogeogr 22: 935-943.
- Guo L, Dai J, Wang M, Xu J, Luedeling E. 2015. Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: A case study of apricot flowering in China. Agric For Meteorol 201: 1-7.
- Han MS, Bang HS, Kim MH, Kang KK, Jung MP, Lee DB. 2010. Distribution characteristics of water scavenger beetles (Hydrophilidae) in Korean paddy field. Korean J Environ Agric 29(4): 427-433. (in Korean with English abstract)
- Han YG, Kwon O, Cho Y. 2015. A study of bioindicator selection for long-term ecological monitoring. J Ecol Environ 38(1): 119-122.
- Holt EA, Miller SW. 2011. Bioindicators: Using organisms to measure environmental impacts. Nat Educ Knowl 2(2): 8.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: Cambridge University Press.
- Johnson KA. 2016. Real Life Science with Dandelions and Project BudBurst. *J Microbiol Biol Educ*, 17: 115-116.
- Kim JW, Lee IY, Lee J. 2017. Distribution of invasive alien species in Korean croplands. *Weed Turf Sci* 6(2): 117-123. (in Korean with English abstract)
- KMA. 2021. KMA Weather Data Service [accessed 2021 July 20]. <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>
- Korea National Arboretum. 2010. Manual of conservation project of threatened plants for climate change. Pocheon: Korea National Arboretum.
- Kwon TS, Park YK, Oh KS, Kwon YD, Shin SC, Kim CS, Par JD, Lee HP. 2002. Increase in the number of generations in *Dendrolimus spectabilis* (Butler) (Lepidoptera: Lasiocampidae) in Korea. *Jour Korean For Soc* 91(2): 149-155. (in Korean with English abstract)
- Lawler JJ, Shafer SL, Bancroft BA, Blaustein AR. 2010. Projected climate impacts for the amphibians of the Western Hemisphere. *Conserv Biol* 24: 38-50.
- Lee BY, Nam GH, Yun JH, Cho GY, Lee JS, Kim JH, Park TS, Kim K, Oh K. 2010. Biological indicators to monitor responses against climate change in Korea. *Korean J Pl Taxon* 40(4): 202-207.
- Lee S, Jeon H, Kim M. 2020. Spatial distribution of butterflies in accordance with climate change in the Korean Peninsula. *Sustainability* 12: 1995.
- Lowe WH. 2012. Climate change is linked to long-term decline in a stream salamander. *Biol Conserv* 145: 48-53.
- Miller-Rushing AJ, Inouye DW, Primack RB. 2008. How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling frequency. *J Ecol* 96(6): 1289-1296.
- Musolin DL, Tougou D, Fujisaki K. 2010. Too hot to handle? phenological and life-history responses to simulated climate change of the southern green stink bug *Nezara viridula* (Heteroptera: Pentatomidae). *Glob Change Biol* 16: 73-87.
- Nam YK, Song YJ, Kwon SI, Eo J, Kim MH. 2018. Potential changes in the distribution of seven agricultural indicator plant in response to climate change at agroecosystem in South Korea. *Korean J Ecol Environ* 51(3): 221-233. (in Korean with English abstract)
- Neveu A. 2009. Incidence of climate on common frog breeding: Long-term and short-term changes. *Acta Oecol* 35: 671-678.
- NIBR. 2021. NIBR Korean Biodiversity [accessed 2021 July 20]. <https://species.nibr.go.kr>
- Niemi GJ, McDonald ME. 2004. Application of ecological indicators. *Annu Re Ecol Evol Syst* 35: 89-111.
- Park JJ, Jung C. 2016. Risk prediction of the distribution of invasive hornet, *Vespa vultina nigrothorax* in Korea using CLIMAX model. *J Apic* 31(4): 293-303. (in Korean with English abstract)
- Pearson RG. 2006. Climate change and the migration capacity of species. *Trends Ecol Evol* 21: 111-113.
- Rainio J, Niemelä J. 2003. Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodivers Conserv* 12: 487-506.
- Szabó B, Vincze E, Czucz B. 2016. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *Int J Biometeorol* 60: 1347-1356.
- Thorup K, Tøttrup AP, Rahbek C. 2007. Patterns of phenological changes in migratory birds. *Oecologia* 15: 697-703.
- Warren M, Hill J, Thomas J. et al. 2001. Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. *Nature* 414: 65-69.