

## 기후변화에 따른 농업생태계 내 해충 발생 예측을 위한 연구 현황 및 향후 과제

정종국<sup>1</sup> · 이효석<sup>1</sup> · 이준호<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농생명공학부 곤충학전공, <sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학연구원  
(2014년 10월 13일 접수; 2014년 11월 9일 수정; 2014년 11월 10일 수락)

## Research Status and Future Subjects to Predict Pest Occurrences in Agricultural Ecosystems Under Climate Change

Jong-Kook Jung<sup>1</sup>, Hyoseok Lee<sup>1</sup> and Joon-Ho Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Entomology Program, Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University,  
Gwanakro 1, Gwanakgu, Seoul 151-921, Korea

<sup>2</sup>Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Gwanakro 1,  
Gwanakgu, Seoul 151-921, Korea

(Received October 13, 2014; Revised November 9, 2014; Accepted November 10, 2014)

### ABSTRACT

Climate change is expected to affect population density, phenology, distribution, morphological traits, reproduction and genetics of insects, and even in the extinction of insects. To develop novel research subjects for predicting climate change effect, basic information about biological and ecological data on insect species should be compiled and reviewed. For this reason, this study was conducted to collect the biological information on insect pests that are essential for predicting potential damage caused by insect pests in future environment. In addition, we compared domestic and foreign research trends regarding climate change effect and suggested future research subjects. Domestic researchers were rather narrow in the subject, and were mostly conducted based on short-term monitoring data to determine relationship between insects and environmental variables. On the other hand, foreign researches studied on various subjects to analyze the effect of climate change, such as changes in distribution of insect using long-term monitoring data or their prediction using population parameters and models, and monitoring of the change of the insect community structure. To determine change of the phenology, distribution, overwintering characteristics, and genetic structures of insects under climate change through development of monitoring technique, in conclusion, further researches are needed. Also, development of population models for major or potential pests is important for prediction of climate change effects.

**Key words:** Global warming, Monitoring, Population models, Environmental change

### I. 서 론

기후변화는 동물 개체군 밀도와 분포의 변화, 몸의 형태와 개체의 크기 등 생물학적인 형질 변화, 생식

및 유전적 변화, 그리고 생물종의 멸종 등에 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다(IPCC 2007). 지역에 따라 차이는 있겠지만 최근에 발표된 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change,



\* Corresponding Author : Joon-Ho Lee  
(jh7lee@snu.ac.kr)

IPCC) 5차 평가보고서(IPCC, 2014)에 따르면 건조지역과 습윤지역의 계절 강수량 차이가 커지고 우기와 건기 간의 기온 차이도 증가할 것으로 예상되는 등 기후변화가 이미 전 지구적으로 일어나고 있는 상황이 관측되고 있다. 우리나라의 기후 역시 기온의 상승, 폭염 및 열대야의 증가, 호우 증가 등의 기후가 지속적으로 변화할 것으로 예상하고 있다(National Institute of Meteorological Research, 2013).

환경의 변화 중 특히 기후변화에 대한 반응은 종에 따라 다르게 나타날 것으로 예상되는데, 특히 IPCC(2007)에서 제시한 육상생태계에서의 변화는 다음과 같다: 1) 생물계절발생(phenology)의 변화, 2) 종 분포 및 개체군 크기의 변화, 3) 기후와 연관된 종의 멸종과 침입, 4) 종의 형태적 변화와 생식 변화, 5) 군집 및 생태계 과정의 변화, 그리고 6) 종의 진화 과정 변화 등이다. 이러한 변화 양상은 IPCC 5차 평가보고서(IPCC, 2014)에서도 크게 달라지지 않고 있으며, 종의 계절발생, 분포, 발생밀도의 변화와 지역적인 멸종 가능성에 대해 보다 중점적으로 많은 근거들을 제시하고 있다. 기후변화와 생물의 반응을 연구하기 위해서는 오랜 기간 동안의 조사된 자료를 활용하는 접근 방식과 기후변화의 피해 예측을 위한 모델을 활용하는 접근 방식으로 구분이 될 수 있다. 특히 곤충의 경우, 발생시기나 개체군의 크기 변화에 대한 개체군 동태 모델(population dynamics models)이나 종의 분포와 관련한 모델(Bioclimate envelope models)이 대표적이다. 곤충에 있어 개체군 동태 모델은 기대 수명(life expectancy), 생식 능력(reproductive rate), 세대 기간(generation time) 및 내적 증가율(intrinsic rate of increase)과 같은 생활사 모델과 변온동물인 곤충의 특성을 이용하여 만들어진 온도의존적 발육 모델(temperature dependent development models)과 같은 개체군 성장 모델이 대표적이다. 이러한 모델들을 활용한다면 곤충의 연발생 횟수나 분포 가능 범위를 예측할 수 있으며 해충별 피해 예측을 통해 작물의 손실을 최소화할 수 있을 것이다. 예를 들어 Kiritani(2006)는 거미류와 같은 천적 군집의 약화 가능성을 제기하면서 이로 인한 해충 발생 증가를 예상한 바 있으며, 이는 곧 작물 생산량의 감소와 같은 중대한 영향으로 이어질 것으로 예상된다(Chakraborty *et al.*, 2000; IPCC, 2007).

곤충의 개체군 변동과 관련하여 기후변화의 영향을

예측하여 피해를 줄이기 위해 필요한 기본적인 생물학적/생태학적 정보들은 분산되어 있거나 불완전한 상황에 있으며, 이로 인해 연구 수요를 도출하는 것조차 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 기후 및 환경의 변화에 대한 곤충, 특히 해충의 발생 변화 예측에 필요한 생물학적 정보를 정리하여 이를 활용한 미래 피해 예측을 위한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다. 또한 국내외 문헌을 비교 분석하여 국내에서 기후변화 연구를 수행하는데 있어 제한요인들을 확인하고 향후 필요한 연구 수요를 제시하고자 하였다.

## II. 기후변화 및 발육모델 관련 국내의 연구 현황

### 2.1. 기후변화의 영향에 대한 곤충 관련 연구 현황

#### 2.1.1. 국내 연구 현황

기후변화와 관련하여 곤충을 대상으로 수행된 국내의 연구는 많지 않았다(Table 1). Table 1에 포함되지 않은 일부 선행 연구들(Ki and Choi, 2004; Park *et al.*, 2006; Kwon *et al.*, 2008)은 기후변화와의 관련성을 제기하긴 하였으나 기후변화와의 연관성을 입증하기엔 자료가 부족한 것으로 판단된다. 반면, 최근의 연구들은 많은 자료를 활용하거나 비교적 정밀한 연구를 통해 이를 극복하려고 노력 중에 있다. 예를 들어, Choi(2008)는 온도나 강수량과 같은 기상 인자들과 나방류의 종수 및 개체수의 관련성을 입증함으로써 향후 기후변화의 영향을 예측하였다. Kwon *et al.*(2010, 2014)은 과거 발생분포 자료를 분석하여 온도의 상승으로 인한 남방계 나비류의 북방한계의 북상 가능성을 제시하였고, Kwon(2014)은 광릉숲 내 개미류의 발생자료를 이용하여 미래 기후조건하에서의 발생 증감을 예측하기도 하였다. Lee *et al.*(2011)은 침입 해충인 꽃매미(*Lycorma delicatula*)의 월동 알 사망률과 겨울 최저 기온과의 관계를 분석하여 겨울철 기온의 상승이 꽃매미 개체군의 발생 증가 및 분포 확장에 영향을 줄 것이라 예상하였다. Kim and Lee(2010)는 복숭아심식나방의 개체군 동태 모델을 개발하여 온도변화에 따른 복숭아심식나방 성충의 발생 시기와 밀도의 변화양상을 분석하였다.

#### 2.1.2. 국외 연구 현황

국내 연구들이 주로 모니터링을 통한 환경요인과의

**Table 1.** Examples of several previous studies about effect of climate change on insects

Research type	Categories	References
Prediction on climate change by models	Change of phenology	Kiritani(2006, 2013) Yamamura <i>et al.</i> (2006) Asch <i>et al.</i> (2007) Kim and Lee(2010)
	Intra- and inter-specific competition	Bale <i>et al.</i> (2002) Kiritani(2013)
	Change of distributional range and abundance	Samways <i>et al.</i> (1999) Baker <i>et al.</i> (2000) Newman(2005) Crozier and Dwyer(2006) Hicke <i>et al.</i> (2006) Zhongren <i>et al.</i> (2007) Poutsma <i>et al.</i> (2008) Kiritani(2006, 2013) Kroschel <i>et al.</i> (2013) Kwon(2014)
Responses of insect on climate change by monitoring	Change of phenology	Roy and Sparks(2000) Forister and Shapiro(2003) Stefanescu <i>et al.</i> (2003) Tikkanen and Julkunen-Tiitto(2003) Gordo and Sanz(2005) Pozsgai and Littlewood(2014)
	Intra- and inter-specific competition	Skirvin <i>et al.</i> (1997) Yukawa <i>et al.</i> (2007)
	Change of distributional range and abundance	Ashworth(1996) Masters <i>et al.</i> (1998) Hickling <i>et al.</i> (2005) Battisti <i>et al.</i> (2006) Choi(2008) Yukawa <i>et al.</i> (2009) Kwon <i>et al.</i> (2010, 2014) Lee <i>et al.</i> (2011) Parkash <i>et al.</i> (2013)
	Change of diversity	Andrew and Hughes(2005) Choi(2008)

관계 분석이나 분포자료를 활용한 분포변화에 집중되어 있었다면, 국외 연구들은 기후변화의 영향에 대해서 보다 다양한 방식으로 접근하고 있었다(Table 1). 이들 연구들은 크게 모델을 이용한 예측과 모니터링 자료를 활용한 연구로 나눌 수 있으며, 세부적으로는 생물계절발생의 변화, 종간 또는 종내 경쟁, 분포 및 발생의 변화, 그리고 생물다양성의 변화로 구분이 되었다. 모니터링 연구의 경우, 연간 발생 세대 수에 대해 10년 이상의 장기간에 걸쳐 수행된 경우가 대부분이었다(Roy and Sparks, 2000; Forister and Shapiro, 2003; Stefanescu *et al.*, 2003; Gordo and Sanz, 2005). 또한 과거 발생 분포 조사 자료를 활용한 분포 범위

의 변화에 대한 연구들도 수행되고 있었다(Hickling *et al.*, 2005; Yukawa *et al.*, 2009; Parkash *et al.*, 2013). 이들 중 많은 연구들이 장기간에 걸쳐 축적된 광범위한 조사 자료가 있었기에 기후변화에 대한 영향 평가가 가능한 것으로 생각된다.

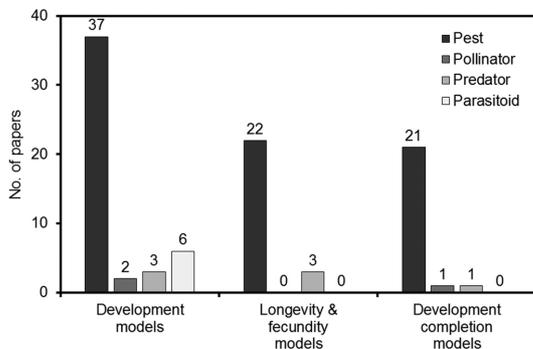
모니터링 연구와는 달리 모델을 이용한 예측 연구들의 경우, 발육영점온도나 내한성 등을 바탕으로 분포 및 발생밀도의 변화를 예측하고 있으며(Samways *et al.*, 1999; Baker *et al.*, 2000; Hicke *et al.*, 2006; Kiritani, 2006, 2013; Zhongren *et al.*, 2007; Poutsma *et al.*, 2008), 연간 발생 세대 수의 변화(kiritani, 2006, 2013; Yamamura *et al.*, 2006; Asch *et al.*,

2007) 또는 중내 및 중간 경쟁의 변화(Bale *et al.*, 2002; Kiritani, 2013)에 대해서도 모델을 이용하여 예측하고 있었다.

**2.2. 주요 작물의 해충, 천적 및 화분매개곤충에 대한 모델 현황**

**2.2.1. 해충**

주요 작물의 해충에 대한 발육모델 현황은 Fig. 1과 같으며, 총 30종에 대한 발육모델(온도발육 실험을 통한 발육속도 식이 있는 경우), 생존 및 산란모델(성충 산란 실험 후 생존율 식과 산란수에 관한 식이 있는 경우), 발육완료분포모델(발육속도 또는 산란모델에서 Weibull 함수로 표현된 경우), 그리고 일부 시·공간적인 분포와 관련한 모델들이 개발되어 있는 것으로 확인되었다. 그러나 목화진딧물(Xia *et al.*, 1999; Giarola *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2012), 담배가루이(Drost *et al.*, 1989; Han *et al.*, 2013), 복숭아심식나방(Kim and Lee, 2001, 2010; Kim *et al.*, 2001), 고자리파리(Otto and Hommes, 2000), 아메리카요굴파리(Park *et al.*, 2012), 벼멸구(Bae *et al.*, 1987; Cheng *et al.*, 1990), 감자나방(Sporleder, 2004), 배추좀나방(Liu *et al.*, 2002; Golizadeh *et al.*, 2009)을 제외한 22종은 모델의 일부만이 개발되어 있어 개체군 동태 모델 개발과 시공간적 분포 분석을 위해서는 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다(Appendix-1). 특히 대부분의 연구들이 온도의존적인 발육 모델 개발에 집중되어 있으며, 상대적으로 생존, 산란 및 발육완료분포 모델은 개발이 안되었거나 일부만 작성되어 있었다.



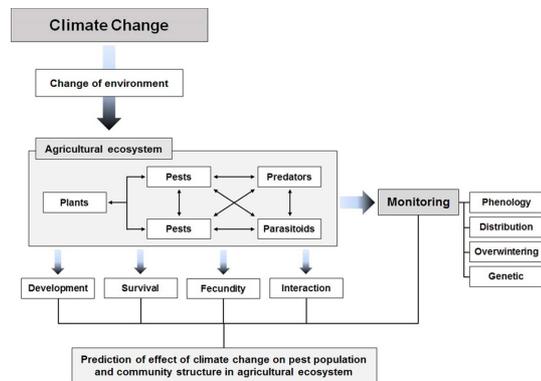
**Fig. 1.** Number of papers for development models, longevity and fecundity models and development completion models in pests, pollinators, predators and parasitoids.

**2.2.2. 화분매개곤충 및 천적**

화분매개곤충 및 천적에 대한 발육모델은 해충군에 비해 상대적으로 부족한 것으로 확인되었다(Fig. 1). 화분매개곤충의 경우, 머리빨가위벌을 제외하고 발육이나 생존 및 산란을 연구하기 위한 실내 항온 조건 하에서의 실험보다는 화분의 확산과 관련된 분포 모델 개발에 집중되는 경향을 보였다(Cresswell *et al.*, 1995; Kadoya and Washitani, 2010; Chifflet *et al.*, 2011)(Appendix-2). 화분매개곤충과는 달리 천적의 경우에는 포식성 응애류와 기생벌에 대한 온도의존적인 발육 연구(Osborne, 1982; Lee and Ahn, 2000; Gotoh *et al.*, 2004; Qiu *et al.*, 2004; Zamani *et al.*, 2007; Lee and Gillespie, 2011) 및 먹이 조건에 따라 달라지는 발육 속도를 고려한 기능반응(Shipp and Whitfield, 1991; Skirvin and Fenlon, 2003; Zamani *et al.*, 2006; Paik *et al.*, 2010)에 관한 연구가 비교적 많이 수행되었다(Appendix-2). 그러나 해충과 비교하여 이들 화분매개곤충 또는 천적에 대한 생존 및 산란 연구나 발육완료분포모델 연구는 부족한 상황이며, 이러한 경향은 상대적으로 긴 수명으로 인한 실험의 어려움, 먹이 조건에 따른 생존 및 산란율의 변화, 개체별 사육의 어려움(특히 꿀벌과 같은 군체를 형성하는 화분매개곤충) 등의 이유로 인한 것으로 생각된다.

**III. 기후변화 대응을 위한 향후 과제**

기온의 상승이나 이산화탄소의 증가와 같은 환경의 변화는 해충의 발육, 생존, 산란 등 생활사 파라미터



**Fig. 2.** Schematic representation of the effects of climate change on insects, included pests, predators and parasitoids, in agricultural ecosystem.

들에 영향을 줄 것이며, 이는 식물-해충, 해충-해충 및 해충-천적 사이의 관계에도 영향을 줄 것이다(Fig. 2). 따라서 농업생태계를 비롯한 생태계 전반에 걸쳐 기후 변화의 영향을 예측하기 위해서는 곤충의 계절발생, 분포, 월동 및 유전적인 변화를 추적할 수 있는 체계적인 모니터링 기술 개발이 필수적이다. 더불어 기후 시나리오를 이용하여 외부 환경 요인, 특히 온도에 민감하게 반응하는 곤충을 대상으로 이들의 발생 동태를 예측할 수 있는 개체군 동태 모델의 개발 역시 중요하다. 본 연구에서는 곤충을 대상으로 기후변화 대응을 위한 향후 과제로 다음의 5개 주제(기후변화에 의한 발생 시기 및 발생 세대 수 변화 연구, 기후변화에 의한 분포 변화 연구, 기후변화에 의한 휴면 환경 변화 연구, 식물과의 연계 연구, 기후변화에 대한 유전적 변이 연구)를 제안하고자 한다.

### 3.1. 기후변화에 의한 발생 시기 및 발생 세대 수 변화 연구

Gordo and Sanz(2005)는 1943년부터 2003년까지 60년에 걸친 장기 모니터링 결과를 이용하여 45종의 식물, 4종의 나비 그리고 6종의 식충성 조류의 발생 시기 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이들의 연구에 의하면, 1970년대 이후 식물과 나비의 발생 시기가 앞당겨지는 경향을 보였는데 2000년대에 이르러서는 나비의 발생 시기가 지나치게 앞당겨져서 기주 식물과의 발생시기 불일치 현상이 나타나고 있다고 보고하였다. Pozsgai and Littlewood(2014) 역시 1994년부터 2011년까지 함정트랩(pitfall trap)을 이용하여 25종의 딱정벌레류(Carabidae)를 모니터링한 결과, 일부 종의 발생 시기가 약간 빨라지거나 발생 밀도의 증감을 관찰한 바 있다. Pozsgai and Littlewood(2014)의 연구에서 보다 흥미로운 부분은 발생 시기가 빨라지는 속도가 큰 종은 발생 밀도가 적게 감소하는 경향이 있다는 점인데, 정밀한 과거 자료의 부재로 인하여 기후변화의 영향을 명확하게 밝히지 못한 측면도 있다. 한편 Kiritani(2006)는 벼 해충군의 연간 세대 수 증가 폭에 비해 대표 천적군 중 하나인 거미류의 연간 세대 수의 증가 폭은 적을 것으로 예상하면서 기후변화에 의한 해충 피해 증가의 가능성을 제기하기도 하였다(Fig. 3). 이들 연구 사례로 미뤄볼 때 기후 변화의 영향을 분석하고 예측하기 위해서는 분류군의 생물학적 특성을 고려한 양질의 자료 축적이 필수적일

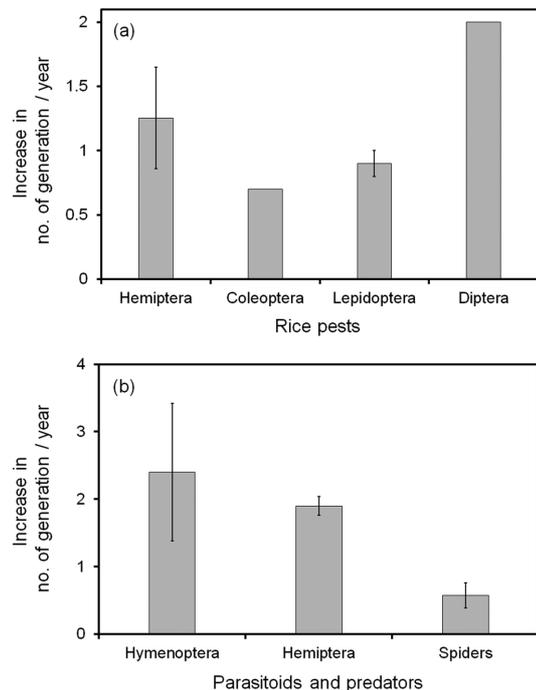


Fig. 3. Expected mean increase in the number of generations of the rice pests (a) and parasitoids and predators (b) a year under 2°C warming (modified from Kiritani, 2006).

것이다.

곤충의 발생 시기 변화는 최근의 급격한 온도 상승이 곤충과 식물의 관계, 특히 화분매개자 역할을 하는 곤충류와 식물의 관계 또는 식식성 곤충류와 식물의 관계 변화가 더욱 심해질 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또한 세대간 간격이 짧거나 발생시기가 앞당겨지는 곤충의 경우, 성충의 활동기간 역시 길어짐에 따라 번식활동, 산란기간 및 월동 생존율 등 개체군의 크기와 관련된 요소들에 있어 장점으로 작용할 가능성이 있다. 따라서 앞으로 곤충의 발생시기 조사는 장기 모니터링 및 보전 프로그램뿐만 아니라 해충 개체군의 관리 방안 마련에 있어서도 매우 중요한 분야가 될 것이기 때문에 체계적인 연구 계획 수립이 필요하다.

### 3.2. 기후변화에 의한 분포 변화 연구

Yukawa *et al.*(2009)은 콩과, 가지과, 국화과, 벼과 등 많은 작물의 해충이기도 한 남쪽풀색노린재(*Neazara viridula*)와 근연종인 풀색노린재(*Neazara antennata*)의 일본 내 분포 지역에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이들은 2007년부터 2008년에 걸쳐 혼수

의 추고쿠 지역과 시코쿠 지역에서 남쪽폴색노린재와 폴색노린재 2종에 대한 야외 조사 및 기존의 문헌과 표본 확인을 수행하였다. 그 결과, 남쪽폴색노린재의 분포 지역이 과거 시코쿠 지역의 남부 해안 지역 일부에 한정되어 있었던 것에 비해 최근 들어서는 시코쿠 지역의 북부 해안 지역뿐만 아니라 혼슈의 추고쿠 지역의 북부 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서도 분포하는 것으로 확인되었다. 또한 Kiritani *et al.*(1963)은 남방계 해충인 남쪽폴색노린재의 서식지를 분석하여 겨울철 월평균 기온이 5°C 이상인 지역에 분포하는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 Yukawa *et al.*(2009)은 1961년부터 2008년까지 분포 가능 지역의 변화를 조사하기도 하였다. 요약하면, 남쪽폴색노린재의 분포 확장이 폴색노린재와의 경쟁을 유도할 뿐만 아니라 폴색노린재의 위치를 대체하고 있는데, 이는 향후 해충 구성의 변화 가능성을 보여주고 있는 것이기도 하다.

종의 분포 지역 확장은 침입종의 분포 가능 지역 추정과도 연관이 있으며, 이를 통해 침입종의 위해성 평가를 수행할 수도 있다. 예를 들어, Kroschel *et al.*(2013)은 기후변화에 의한 온도 상승이 감자나방 (*Phthorimaea operculella*)의 분포 지역, 발생 세대 수 및 발생 밀도를 증가시킬 것이라 연구를 수행한 바 있다. 침입종의 위해성은 전 지구적으로 생물다양성에 큰 위협이 되고 있으며, 이를 방지하기 위해서는 침입종의 정착가능성을 낮춰야 한다(Worner and Gevrey, 2006). 하지만 종의 침입은 다양한 경로로 이뤄지고 있을 뿐만 아니라 다양한 환경적 요인(생물 및 무생물적 요인)에 의해서도 정착가능성이 변화하기 때문에 침입종의 위해성 평가는 국내 생물다양성의 보전과 농작물의 관리 계획 수립에 있어 필수적인 분야가 되고 있다. 이를 위해 GIS(geographic information system)에 기반한 BioSIM(Régnière and Saint-Amant, 2008), DYMEX(Maywald *et al.*, 1997), CLIMEX(Sutherst and Maywald, 1985; Sutherst *et al.*, 1995), ILCYM(Sporleder *et al.*, 2009) 등의 프로그램들이 개발되어 있으며, 최근 들어 이들 프로그램을 이용하여 외래 해충의 정착가능성에 대해 연구하는 경향이 늘어나고 있다(Dentener *et al.*, 2002; Stephens and Dentener, 2005; Li *et al.*, 2012; Kroschel *et al.*, 2013). 최근 들어 국내에서도 침입종의 정착가능성에 대한 연구가 수행되고 있는 상황인데, 보다 체계적인

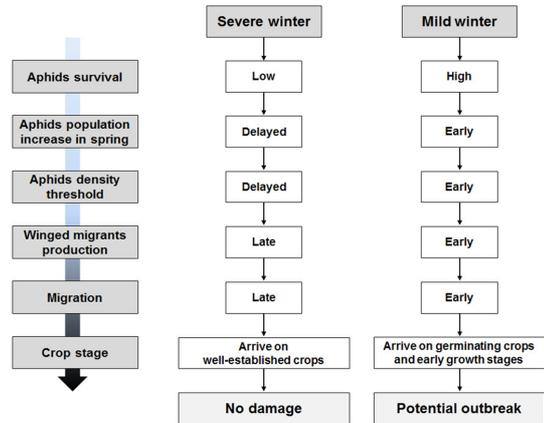


Fig. 4. Schematic representation of the effects of mild and severe winters on spring and summer populations and related damage potential of aphids overwintering (modified from Bale and Hayward, 2010).

관리 프로그램 운영을 위해서는 향후 기후변화에 따른 외래 해충의 서식지 확장이나 발생시기의 변화 등에 관한 연구 역시 수행될 필요가 있을 것으로 생각된다.

### 3.3. 기후변화에 의한 휴면 환경 변화 연구

기후변화, 특히 겨울철 기온의 상승은 곤충의 월동 환경을 변화시키고 이로 인한 개체군 동태의 변화는 작물의 수확량 변화를 초래할 것으로 예상된다(Bale and Hayward 2010). 즉, 혹독한 겨울과 상대적으로 온난한 겨울은 휴면 중 생존율의 차이를 유발할 것이며, 이는 봄철 개체군 밀도 차이와 직결된다(Fig. 4). 또한 진딧물의 경우처럼 환경 조건에 따라 무시충과 유시충이 나타나는 경우에는 개체군 밀도의 증가에 의해 이동성이 강한 유시충이 증가할 가능성이 높아지고, 이는 곧 작물로 이동하는 시기와 밀접한 관련이 있게 된다. 결과적으로는 기후변화에 의한 겨울철 기온 상승은 작물피해의 증가를 가져올 수 있다. 하지만 겨울철 기온 상승효과가 모든 계절에서 동일하게 작용할지 또는 그 영향이 계절에 따라 어떻게 다르게 나타날 지에 대해서는 추가 연구를 통해 구명해야 할 부분이다. 한편, 겨울철 기온 상승으로 인한 적설량의 감소는 오히려 대기 중의 차가운 공기에 노출되어 휴면 중 생존율이 감소할 가능성도 있다. 따라서 보다 정밀한 예측을 위해서는 휴면 전(휴면이 유도되기 시작하는 늦여름과 가을), 중(본격적인 휴면이 일어나는 한겨울), 후(휴면 타파가 일어나는 늦겨울과 봄)의 3단

계로 구분하여 온도의 영향에 관한 연구를 수행할 필요가 있을 것이다(Bale and Hayward, 2010). 또한 온도의 상승이 일어나더라도 휴면에 영향을 주는 중요한 요소인 광주기는 변화가 없기 때문에 이에 대한 연구도 동시에 수행될 필요가 있다.

### 3.4. 식물과의 연계 연구

식식성 곤충에 있어 먹이가 되는 기주 식물의 질적인 변화는 식식성 곤충의 산란과 발육에 매우 중요한 요소이다(Awmack and Leather, 2002). 최근의 기후 변화로 인한 대기 중 이산화탄소의 증가는 식물의 성장 및 생식뿐만 아니라 물질대사에도 영향을 미치게 되는데, 탄소와 질소의 비율 변화는 탄소 기반의 물질 증가를 유도할 수도 있다(Agrell *et al.*, 2000). Agrell *et al.*(2000)은 이산화탄소와 빛의 세기 모두 나방의 생존율, 발육기간 및 번데기 무게에 영향을 주는 것을 확인하였으며 그 이유로 이산화탄소 농도의 증가가 식물체 내 페놀염 글리코사이드(phenolic glycosides)나 탄닌(tannins) 성분의 증가를 유도하여 나방 유충의 섭식량 감소로 이어진 것으로 추정하였다. 현재까지 수행되고 있는 많은 연구들이 온도 상승에 대한 분포 변화나 발생 세대 수 증가 등에 집중되고 있는 것에 비해 이산화탄소의 증가에 의한 영향 연구는 매우 제한적으로 수행되고 있기 때문에(Bale *et al.*, 2002) 향후 기후 변화의 영향에 관한 연구는 온도, 이산화탄소, 빛의 세기 등 다양한 환경 조건의 변화에 의한 식물체 구성 물질 변화와 이에 따른 식식성 곤충의 물리적/생리적 반응 역시 중요하게 다룰 필요가 있다.

### 3.5. 기후변화에 대한 유전적 변이 연구

앞서 언급한 것과 같이 기후변화에 대한 생물의 반응은 분포 범위의 확장, 발생 시기의 변화, 발육, 생존 및 생식의 변화, 그리고 종 구성의 변화에 따른 종간 상호작용의 변화가 대표적이다. 하지만 기후변화에 따라 이러한 변화들에 대응하지 못한다면 종은 멸종할 가능성이 커지게 될 것이기 때문에 대체 서식처를 찾거나 환경에 대한 적응을 통해 멸종을 피하기 위해 노력할 것이다(Hoffmann and Sgrò, 2011). 실제 몇몇 연구들에서 일부 곤충들이 지리적인 계통을 갖는 형태로 진화해왔다는 것을 보여주고 있으며(Bale *et al.*, 2002), 심지어 Korol *et al.*(2000)은 근거리에 위치한 노랑초파리(*Drosophila melanogaster*)의 지역

개체군들 간에 유전적으로 불화합성을 보이는, 즉 진화가 막 시작된 사례를 보여주고 있다. 최근에는 Kearney *et al.*(2009)이 텅기열을 전염시키는 *Aedes aegypti* 모기 알의 탈수 저항성이 진화하는 경우를 모델화하여 기후변화 시 분포 가능 지역이 확장되는 과정을 모사한 바 있다. 지금까지의 연구들이 표현형의 변화에 보다 집중이 되어 있었다면, 앞으로는 기후변화에 적응하는데 어려움을 겪을 가능성이 큰 종들에 대한 표현형 변화 연구에 집중하거나 진화 과정에 대한 모델화 작업을 통해 개체군별 기후변화에 적응할 수 있는 가능성을 예측하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 이러한 작업을 통해 해충 관리 시스템의 구축이나 생물다양성의 보전을 위한 프로그램을 개발할 수 있을 것이다.

## IV. 결 론

현재 국내에서의 곤충을 이용한 기후변화 대응 연구는 크게 두 가지로 구분될 수 있을 것이다. 첫 번째는 기후변화에 따른 생물계절발생이나 발생 밀도 및 군집 구조의 변화 등 장기적인 모니터링 사업이고, 두 번째는 개체군 동태를 추정하는 변수들을 이용하여 분포 확장, 발생 시기 및 발생 세대 수의 변화를 예측하는 모델을 개발하는 연구일 것이다. 그러나 국외의 많은 사례와 비교하여 볼 때 곤충을 이용한 국내의 기후변화에 대한 영향 연구는 상대적으로 특정 분야에 치우쳐 있는 것으로 판단되며 앞으로 연구과제의 다양성을 확보하는 것이 필요하다. 또한 연구과제를 종합적으로 계획할 수 있는 방안을 마련하는 것 역시 필요하다. 곤충의 경우, 다른 생물들에 비해 외부 환경에 대한 민감도가 높을 뿐만 아니라 상대적으로 사육이 쉽고, 시간적/공간적인 측면에서도 연구자에게 많은 장점을 제공하기 때문에 기후변화의 영향을 예측하기 위한 지표로 사용하기 유리한 측면이 있다. 따라서 개체군 동태 모델 개발을 위한 해충별 기본적인 생물학적 자료(발육, 생존, 산란 등)와 기상 자료(기온, 습도, 강수량 등)의 확보 및 표준화가 선행되어야 하며, 이후에는 이를 이용한 피해 예측이 수반되어야 할 것이다. 그러나 곤충은 매우 많은 분류군이 존재하고 분류군에 따른 생물학적/생태학적 특성이 큰 차이를 보이기 때문에 분류군별로 기후변화의 영향을 분석하고 예측하는 접근 방식에 대한 보다 심층적인 고찰이 필요하다.

## 적 요

기후변화는 곤충의 밀도와 분포, 몸의 형태와 개체의 크기 등 생물학적인 형질 변화, 생식 및 유전적 특성, 그리고 멸종 등에 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 기후변화의 영향을 예측하여 피해를 줄이기 위해서는 분산되어 있는 곤충 종별 기본적인 생물학적/생태학적 정보들을 종합하여 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 기후 및 환경의 변화에 대한 곤충, 특히 해충의 발생 변화 예측에 필요한 생물학적 정보를 정리하여 이를 활용한 미래 피해 예측을 위한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다. 또한 국내외 문헌을 비교 분석하여 국내에서 기후변화 연구를 수행하는데 있어 제한 요인들을 확인하고 향후 필요한 연구소요를 제시하고자 하였다. 국내의 연구들은 단기 모니터링 자료를 이용하여 환경 요인과의 관계를 분석하는 수준에 그치고 있는 반면, 국외 연구들은 장기 모니터링 자료를 이용한 분포 변화 분석이나 기 개발된 생물 종의 파라미터를 이용한 발생 및 분포 변화 예측 그리고 곤충 군집의 구성 변화를 모니터링하는 등 다양한 내용을 주제로 기후변화의 영향을 연구하고 있었다. 결론적으로 기후변화에 대응하기 위해서는 체계적인 모니터링 기술 개발을 통해 곤충의 계절발생, 분포, 월동 특성 및 유전적 구조 변화에 대한 연구가 필수적이며, 주요 해충 및 잠재적인 해충에 대한 기후변화의 영향을 예측하기 위해 곤충 개체군 모델의 개발 역시 중요한 부분이 될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ009860), 환경부 국가장기생태연구(Korea National Long-Term Ecological Research) 및 서울대학교 BK21 plus사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

Agrell, J., E. P. McDonald, R. L. Lindroth, 2000: Effects of CO<sub>2</sub> and light on tree phytochemistry and insect performance. *Oikos* **88**, 259-272.  
 Ahn, J. J., C. Y. Yang, and C. Jung, 2012: Model of *Grapholita molesta* spring emergence in pear orchards based on statistical information criteria. *Journal of Asia-*

*Pacific Entomology* **15**, 589-593.  
 Andrew, N. R., and L. Hughes, 2005: Diversity and assemblage structure of phytophagous Hemiptera along a latitudinal gradient: predicting the potential impacts of climate change. *Global Ecology and Biogeography* **14**, 249-262.  
 Asch, M., P. H. Tienderen, L. J. M. Holleman, and M.E. Visser, 2007: Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example. *Global Change Biology* **13**(8), 1596-1604.  
 Ashworth, A.C. 1996: The response of arctic Carabidae (Coleoptera) to climate change based on the fossil record of the Quaternary Period. *Annales Zoologici Fennici* **33**(1), 125-131.  
 Awmack, C.S., and S. R. Leather, 2002: Host plant quality and fecundity in herbivorous insects. *Annual Review of Entomology* **47**, 817-844.  
 Bae, S. D., H. J. Kim, C. G. Park, G. H. Lee, and S. T. Park, 2005: The development and oviposition of bean bug, *Riptortus clavatus* Thunberg (Hemiptera: Alydidae) at temperature conditions. *Korean Journal of Plant Protection* **44**(4), 325-330. (in Korean with English abstract)  
 Bae, S. D., K. B. Park, and Y. J. Oh, 1997: Effect of temperature and food source on the egg and larval development of tobacco cutworm, *Spodoptera litura* Fabricius. *Korean Journal of Applied Entomology* **36**(1), 48-54. (in Korean with English abstract)  
 Bae, S. D., Y. H. Song, and Y. D. Park, 1987: Effects of temperature conditions on the growth and oviposition of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. *Korean Journal of Plant Protection* **26**(1), 13-23. (in Korean with English abstract)  
 Baker, R. H. A., C. E. Sansford, C.H. Jarvis, R. J. C. Cannon, A. MacLeod, and K. F. A. Walters, 2000: The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **82**(1-3), 57-71.  
 Bale, J. S., and S. A. Hayward, 2010: Insect overwintering in a changing climate. *The Journal of Experimental Biology* **213**, 980-994.  
 Bale, J. S., G. J. Masters, I. D. Hodkinson, C. Awmack, T.M. Bezemer, V. K. Brown, J. Butterfield, A. Buse, J. C. Coulson, J. Farrar, J. E. G. Good, R. Harrington, S. Hartley, T. H. Jones, R. Lindroth, M. C. Press, I. Symrnioudis, A.D. Watt, and J. B. Whittaker, 2002: Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology* **8**, 1-16.  
 Battisti, A., M. Stastny, E. Buffo, and S. Larsson, 2006: A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology* **12**(4), 662-671.  
 Bounfour, M., and L. K. Tanigoshi, 2001: Effect of temperature on development and demographic parameters of *Tetranychus urticae* and *Eotetranychus carpini borealis* (Acari:

- Tetranychidae). *Annals of the Entomological Society of America* **94**(3), 400-404.
- Carey, J. R., 1982: Demography of the twospotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch. *Oecologia* **52**(3), 389-395.
- Chakraborty, S., A. V. Tiedemann, P. S. Teng, 2000: Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* **108**, 317-326.
- Cheng, J. A., and J. Holt, 1990: A systems analysis approach to brown planthopper control on rice in Zhejiang Province, China. I. Simulation of outbreaks. *Journal of Applied Ecology* **27**(1), 85-99.
- Chifflet, R., E. K. Klein, C. Lavigne, V. L. Féon, A. E. Ricroch, J. Lecomte, and B. E. Vaissière, 2011: Spatial scale of insect-mediated pollen dispersal in oilseed rape in an open agricultural landscape. *Journal of Applied Ecology* **48**, 689-696.
- Choi, S. W., 2008: Effects of weather factors on the abundance and diversity of moths in a temperate deciduous mixed forest of Korea. *Zoological Science* **25**(1), 53-58.
- Cresswell, J. E., A. P. Bassom, S. A. Bell, S. J. Collins, and T. B. Kelly, 1995: Predicted pollen dispersal by honeybees and three species of bumblebees foraging on oilseed rape: A comparison of three models. *Functional Ecology* **9**(6), 829-841.
- Crozier, L., and G. Dwyer, 2006: Combining population-dynamic and ecophysiological models to predict climate-induced insect range shifts. *The American Naturalist* **167**(6), 853-866.
- Da Silva, E. D. B., T. M. A. Kuhn, and L. B. Monteiro, 2011: Oviposition behavior of *Grapholita molesta* Busck (Lepidoptera: Tortricidae) at different temperatures. *Neotropical Entomology* **40**(4), 415-420.
- Dentener, P. R., D. C. Whiting, and P. G. Connolly, 2002: *Thrips palmi* Karny (Thysanoptera: Thripidae): Could it survive in New Zealand? *New Zealand Plant Protection* **55**, 18-24.
- Drost, Y. C., J. C. van Lenteren, and H. J. W. van Roermund, 1998: Life-history parameters of different biotypes of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in relation to temperature and host plant: a selective review. *Bulletine of Entomological Research* **88**, 219-229.
- Forister, M. L., and A.M. Shapiro, 2003: Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Global Change Biology* **9**(7), 1130-1135.
- Giarola, L. T. P., S. G. F. Martins, and M. C. P. Toledo Costa, 2006: Computer simulation of *Aphis gossypii* insect using Penna aging model. *Physica A* **368**, 147-154.
- Golizadeh, A., K. Kamali, Y. Fathipour, and H. Abbasipour, 2009: Effect of temperature on life table parameters of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) on two brassicaceous host plants. *Journal of Asia-Pacific Entomology* **12**, 207-212.
- Gordo, O., and J. J. Sanz, 2005: Temporal trends in phenology of the honey bee *Apis mellifera* (L.) and the small white *Pieris rapae* (L.) in the Iberian Peninsula (1952–2004). *Ecological Entomology* **31**, 261-268.
- Gotoh, T., K. Yamaguchi, and K. Mori, 2004: Effect of temperature on life history of the predatory mite *Amblyseius (Neoseiulus) californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology* **32**, 15-30.
- Han, M. W., J. H. Lee, M. H. Lee, 1993: Effect of temperature on development of oriental tobacco budworm, *Helicoverpa assulta* Guenee. *Korean Journal of Applied Entomology* **32**(2), 236-244. (in Korean with English abstract)
- Han, E. J., B. R. Choi, and J. H. Lee, 2013: Temperature-dependent development models of *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology* **16**, 5-10.
- Hicke, J. A., J. A. Logan, J. Powell, and D. S. Ojima, 2006: Changing temperatures influence suitability for modeled mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) outbreaks in the western United States. *Journal of Geophysical Research* **111**, G02019.
- Hickling, R., D. B. Roy, J. K. Hill, R. Fox, and C. D. Thomas, 2006: The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology* **12**, 450-455.
- Hoffmann, A. A., and C. M. Sgrò, 2011: Climate change and evolutionary adaptation. *Nature* **470**, 479-485.
- IPCC, 2007: Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-32.
- Jeon, H. Y., D. S. Kim, M. R. Cho, Y. D. Chang, and M. S. Yiem, 2003: Temperature-dependent development of *Pseudococcus comstocki* (Homoptera: Pseudococcidae) and its stage transition models. *Korean Journal of Applied Entomology* **42**(1), 43-51. (in Korean with English abstract)
- Jeong, S. A., and C. Jung, 2011: Effect of temperature and relative humidity on the emergence of overwintered *Osmia cornifrons* (Hymenoptera: Megachilidae). *Korean Journal of Apiculture* **26**(4), 261-266. (in Korean with English abstract)
- Kadoya, T. and I. Washitani, 2010: Predicting the rate of range expansion of an invasive alien bumblebee (*Bombus terrestris*) using a stochastic spatio-temporal model.

- Biological Conservation* **143**, 1228-1235.
- Kasap, İ., 2009: The biology and fecundity of the citrus red mite *Panonychus citri* (McGregor) (Acari: Tetranychidae) at different temperatures under laboratory conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* **33**, 593-600.
- Kearney, M., W. P. Porter, C. Williams, S. Ritchie, and A. A. Hoffmann, 2009: Integrating biophysical models and evolutionary theory to predict climatic impacts on species' ranges: the dengue mosquito *Aedes aegypti* in Australia. *Functional Ecology* **23**, 528-538.
- Ki, G. J., and S. W. Choi, 2004: Butterfly population dynamics at Mt. Yudal. Mokpo, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **22**(1), 35-42. (in Korean with English abstract)
- Kieckhefer, R. W., N. C. Elliott, and D. D. Walgenbach, 1989: Effects of constant and fluctuating temperatures on developmental rates and demographic statistics of the English Grain Aphid (Homoptera: Aphididae). *Annals of the Entomological Society of America* **82**(6), 701-706.
- Kim, D. S., and J. H. Lee, 2003: Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Ecological Modelling* **162**, 145-153.
- Kim, D. S., and J. H. Lee, 2010: A population model for the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae), in a Korean orchard system. *Ecological Modelling* **221**, 268-280.
- Kim, D. I., D. S. Choi, S. J. Ko, B. R. Kang, C. G. Park, S. G. Kim, J. D. Park, and S. S. Kim, 2012a: Comparison of dependent times of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) between the constant and variable temperatures and its temperature-dependent development models. *Korean Journal of Applied Entomology* **51**(4), 431-438. (in Korean with English abstract)
- Kim, D. I., S. J. Ko, D. S. Choi, B. R. Kang, C. G. Park, S. G. Kim, J. D. Park, and S. S. Kim, 2012b: Comparison of temperature-dependent development model of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) under constant temperature and fluctuating temperature. *Korean Journal of Applied Entomology* **51**(4), 421-429. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. S., T. H. Kim, and S. G. Lee, 2005: Bionomics of the green peach aphid (*Myzus persicae* Sülzer) adults on Chinese cabbage (*Brassica campestris*). *Korean Journal of Applied Entomology* **44**(3), 213-217. (in Korean with English abstract)
- Kim, D. S., J. H. Lee, and M. S. Yiem, 2001: Temperature-dependent development of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae) and its stage emergence models. *Environmental Entomology* **30**(2), 298-305.
- Kiritani, K., 2006: Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan. *Population Ecology* **48**, 5-12.
- Kiritani, K., 2013: Different effects of climate change on the population dynamics of insects. *Applied Entomology and Zoology* **48**(2), 97-104.
- Korol, A., E. Rashkovetsky, K. Iliadi, P. Michalak, Y. Ronin, and E. Nevo, 2000: Nonrandom mating in *Drosophila melanogaster* laboratory populations derived from closely adjacent ecologically contrasting slopes at "Evolution Canyon". *PNAS* **97**, 12637-12642.
- Kroschel, J. M., H. E. Z. Sporleder, H. Tonnang, P. Juarez, J. C. Carhuapoma, and R. S. Gonzales, 2013: Predicting climate-change-caused changes in global temperature on potato tuber moth *Phthorimaea operculella* (Zeller) distribution and abundance using phenology modeling and GIS mapping. *Agricultural and Forest Meteorology* **170**, 228-241.
- Kwon, T. S., 2014: Change of ant fauna in the Gwangneung forest: Test on influence of climatic warming. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity* **7**, 219-224.
- Kwon, T. S., B. K. Byun, S. H. Kang, S. S. Kim, B. W. Lee, and Y. K. Kim, 2008: Analysis on changes, and problems in phenology of butterflies in Gwangneung Forest. *Korean Journal of Applied Entomology* **47**(3), 209-216. (in Korean with English abstract)
- Kwon, T. S., S. S. Kim, J. H. Chun, B. K. Byun, J. H. Lim, and J. H. Shin, 2010: Changes in butterfly abundance in response to global warming and reforestation. *Environmental Entomology* **39**(2), 337-345.
- Kwon, T. S., C. M. Lee, and S. S. Kim, 2014: Northward range shifts in Korean butterflies. *Climate Change* **126**, 163-174.
- Lee, G. H., C. H. Paik, C. Y. Hwang, M. Y. Choi, D. H. Kim, S. Y. Na, S. S. Kim, and I. H. Choi, 2003: Effect of host plants on the development and reproduction of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae). *Korean Journal of Applied Entomology* **42**(4), 301-305. (in Korean with English abstract)
- Lee, H. S., and D. R. Gillespie, 2011: Life tables and development of *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae) at different temperatures. *Experimental and Applied Acarology* **53**, 17-27.
- Lee, J. H., and J. J. Ahn, 2000: Temperature effects on development, fecundity, and life table parameters of *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae). *Environmental Entomology* **29**(2), 265-271.
- Lee, J. S., I. K. Kim, S. H. Koh, S. J. Cho, S. J. Jang, S. H. Pyo, and W. I. Choi, 2011: Impact of minimum winter temperature on *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae) egg mortality. *Journal of Asia-Pacific Entomology* **14**, 123-125.
- Lee, S. K., J. Kim, S. S. Cheong, Y. K. Kim, S. G. Lee, and C. Y. Hwang, 2013: Temperature-dependent development model of Hawaiian beet webworm, *Spoladea recurvalis* Fabricius (Lepidoptera: Pyraustinae). *Korean Journal of Applied Entomology* **52**(1), 5-12. (in Korean with English abstract)
- Liu, S. S., F. Z. Chen, and M. P. Zalucki, 2002: Development and Survival of the Diamondback Moth (Lepidoptera:

- Plutellidae) at Constant and Alternating Temperatures. *Environmental Entomology* **31**(2), 221-231.
- Liu, S. S., and X. D. Meng, 2000: Modelling development time of *Lipaphis erysimi* (Hemiptera: Aphididae) at constant and variable temperatures. *Bulletin of Entomological Research* **90**, 337-347.
- Masters, G. J., V. K. Brown, I. P. Clarke, and J. B. Whittaker, 1998: Direct and indirect effects of climate change on insect herbivores: Auchenorrhyncha (Homoptera). *Ecological Entomology* **23**, 45-52.
- Maywald, G. F., R. W. Sutherst, and M. P. Zalucki, 1997: Generic modelling for integrated pest management. In 'Proceedings of MODSIM 97, international congress on modelling and simulation'. McDonald, A. D., and M. McAleer (Eds.), MODSIM '97: Hobart, Australia, 1115-1116.
- McCornack, B. P., D. W. Ragsdale, and R. C. Venette, 2004: Demography of soybean aphid (Homoptera: Aphididae) at summer temperatures. *Journal of Economic Entomology* **97**(3), 854-861.
- McDonald, J. R., J. S. Bale, and K. F. A. Walters, 1998: Effect of temperature on development of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *European Journal of Entomology* **95**, 301-306.
- McDonald, J. R., J. S. Bale, and K. F. A. Walters, 1999: Temperature, development and establishment potential of Thrips palmi (Thysanoptera: Thripidae) in the United Kingdom. *European Journal of Entomology* **96**, 169-173.
- Newman, J. A., 2005: Climate change and the fate of cereal aphids in Southern Britain. *Global Change Biology* **11**, 940-944.
- Nielsen, A. L., G. C. Hamilton, and D. Matadha, 2008: Developmental rate estimation and life table analysis for *Halymorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *Environmental Entomology* **37**(2), 348-355.
- National Institute of Meteorological Research, 2013: *Development and application of methodology for climate change prediction (V)*. Korea Meteorological Administration, 447pp.
- Osborne, L. S., 1982: Temperature-dependent development of greenhouse whitefly and its parasite *Encarsia formosa*. *Environmental Entomology* **11**, 483-485.
- Otto, M., and M. Hommes, 2000: Development of a simulation model for the population dynamics of the onion fly *Delia antiqua* in Germany. *Bulletin OEPP/EPP* **30**, 115-119.
- Otuka, A., M. Matsumura, S. Sanada-Morimura, H. Takeuchi, T. Watanabe, R. Ohtsu, and H. Inoue, 2010: The 2008 overseas mass migration of the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* and subsequent outbreak of rice stripe disease in western Japan. *Applied Entomology and Zoology* **45**(2), 259-266.
- Paik, C. H., C. Y. Hwang, G. H. Lee, D. H. Kim, M. Y. Choi, S. Y. Na, and S. S. Kim, 2003: Development, reproduction and longevity of predator *Orius sauteri* Poppius (Hemiptera: Anthocoridae) when reared on three different preys. *Korean Journal of Applied Entomology* **42**(1), 35-41. (in Korean with English abstract)
- Paik, C. H., G. H. Lee, C. Y. Hwang, S. J. Kim, 2010: Predatory response of the pirate bug, *Orius sauteri* Poppius (Heteroptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis*, *Aphid gossypii* and *Tetranychus urticae*. *Korean Journal of Applied Entomology* **49**(4), 401-407. (in Korean with English abstract)
- Park, C. G., H. H. Park, and K. H. Kim, 2011: Temperature-dependent development model and forecasting of adult emergence of overwintered small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* Fallen, population. *Korean Journal of Applied Entomology* **50**(4), 343-352. (in Korean with English abstract)
- Park, C. G., H. H. Park, K. H. Kim, and S. G. Lee, 2013: Temperature-dependent development model of white backed planthopper (WBPH), *Sogatella furcifera* (Horvath) (Homoptera: Delphacidae). *Korean Journal of Applied Entomology* **52**(2), 133-140. (in Korean with English abstract)
- Park, C. G., H. H. Park, K. B. Uhm, and J. H. Lee, 2010: Temperature-dependent development model of *Paromius exiguus* (Distant) (Heteroptera: Lygaeidae). *Korean Journal of Applied Entomology* **49**(4), 305-312. (in Korean with English abstract)
- Park, C. G., H. Y. Kim, and J. H. Lee, 2010: Parameter estimation for a temperature-dependent development model of *Thrips palmi* Karny (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology* **13**, 145-149.
- Park, E. C., K. H. Choi, J. W. Kim, S. Cho, and G. H. Kim, 2001: Effect of temperature on development and reproduction of the persimmon fruit moth, *Stathmopoda masinissa* (Lepidoptera: Stathmopodidae). *Korean Journal of Applied Entomology* **40**(4), 297-300. (in Korean with English abstract)
- Park, H. H., L. Shipp, R. Buitenhuis, and J. J. Ahn, 2011: Life history parameters of a commercially available *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae) fed on cattail (*Typha latifolia*) pollen and tomato russet mite (*Aculops lycopersici*). *Journal of Asia-Pacific Entomology* **14**, 497-501.
- Park, J. J., H. Mo, D. H. Lee, K. I. Shin, and K. Cho, 2012: Modeling and validation of population dynamics of the American Serpentine Leafminer (*Liriomyza trifolii*) using leaf surface temperatures of greenhouses cherry tomatoes. *Korean Journal of Applied Entomology* **51**(3), 235-243. (in Korean with English abstract)
- Park, K. T., T. M. Kang, M. Y. Kim, M. Y. Chae, E. M. Ji, and Y. S. Bae, 2006: Discovery of the ten species of subtropical-moths in Is. Daechong, Korea. *Korean Journal of Applied Entomology* **45**(3), 261-268. (in

- Korean with English abstract)
- Parkash, R., S. Ramniwas, and B. Kajla, 2013: Climate warming mediates range shift of two differentially adapted stenothermal *Drosophila* species in the Western Himalayas. *Journal of Asia-Pacific Entomology* **16**(2), 147-153.
- Poutsma, J., A. J. M. Loomans, B. Aukema, and T. Heijerman, 2008: Predicting the potential geographical distribution of the harlequin ladybird, *Harmonia axyridis*, using the CLIMEX model. *BioControl* **53**, 103-125.
- Pozsgai, G., and N. A. Littlewood, 2014: Ground beetle (Coleoptera: Carabidae) population declines and phenological changes: Is there a connection? *Ecological Indicators* **41**, 15-24.
- Qui, Y. T., J. C. van Lenteren, Y. C. Drost, and C. J. A. M. Posthuma-Doodeman, 2004: Life-history parameters of *Encarsia Formosa*, *Eretmocerus eremicus* and *E. mundus*, aphelinid parasitoids of *Bemisia argentifolii* (Hemiptera: Aleyrodidae). *European Journal of Entomology* **101**, 83-94.
- Raga, I. N., K. Ito, M. Matsui, and M. Okada, 1988: Effects of temperature on adult longevity, fertility, and rate of transovarial passage of rice stripe virus in the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* Fallen (Homoptera: Delphacidae). *Applied Entomology and Zoology* **23**(1), 67-75.
- Régnière, J., and R. St-Amant, 2008: BioSIM 9 user's manual. Information Report LAU-X-134. Quebec, Canada, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre.
- Roy, D. B., and T. H. Sparks, 2000: Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology* **6**, 407-416.
- Samways, M. J., R. Osborn, H. Hastings, and V. Hattingh, 1999: Global climate change and accuracy of prediction of species' geographical ranges: establishment success of introduced ladybirds (Coccinellidae, *Chilocorus* spp.) worldwide. *Journal of Biogeography* **26**, 795-812.
- Seal, D. R., W. Klassen, and V. Kumar, 2010: Biological parameters of *Scirtothrips dorsalis* (Thysanoptera: Thripidae) on selected hosts. *Environmental Entomology* **39**(5), 1389-1398.
- Shipp, J. L., and Y. M. van Houten, 1997: Influence of temperature and vapor pressure deficit on survival of the predatory mite, *Amblyseius cucumeris* (Acari: Phytoseiidae). *Environmental Entomology* **26**(1), 106-113.
- Shipp, J. L., K. I. Ward, and T. J. Gillespie, 1996: Influence of temperature and vapor pressure deficit on the rate of predation by the predatory mite, *Amblyseius cucumeris*, on *Frankliniella occidentalis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **78**, 31-38.
- Shipp, J. L., and G. H. Whitefield, 1991: Functional response of the predatory mite, *Amblyseius cucumeris* (Acari: Phytoseiidae), on western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Environmental Entomology* **20**(2), 694-699.
- Skirvin, D. J., and J. S. Fenlon, 2003: The effect of temperature on the functional response of *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology* **31**, 37-49.
- Skirvin, D. J., J. N. Perry, and R. Harrington, 1997: The effect of climate change on an aphid-coccinellid interaction. *Global Change Biology* **3**(1), 1-11.
- Sporleder, M., J. Kroschel, M. R. Gutierrez Quispe, and A. Lagnaoui, 2004: A temperature-based simulation model for the potato tuberworm, *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera: Gelechiidae). *Environmental Entomology* **33**(3), 477-486.
- Sporleder, M., R. Simon, J. Gonzales, P. Carhuapoma, H. Juarez, F. De Mendiburu, and J. Kroschel, 2009: ILCYM-Insect Life Cycle Modeling. In: A Software Package for Developing Temperature-based Insect Phenology Models with Applications for Regional and Global Pest Risk Assessments and Mapping (User Manual). International Potato Center, Lima, Peru.
- Stefanescu, C., J. Peñuelas, and I. Filella, 2003: Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology* **9**, 1494-1506.
- Stephens, A. E. A., and P. R. Dentener, 2005: *Thrips palmi* -potential survival and population growth in New Zealand. *New Zealand Plant Protection* **58**, 24-30.
- Sutherst, R. W., and G. F. Maywald, 1985: A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture Ecosystems and Environment* **13**, 281-299.
- Sutherst, R. W., G. F. Maywald, D. B. Skarratt, 1995: Predicting insect distributions in a changed climate. In 'Insects in a changing environment'. Harrington, R., and N. E. Stork (Eds.), Academic Press: London, 59-91.
- Tatara, A., 1994: Effect of temperature and host plant on the development, fertility and longevity of *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae). *Applied Entomology and Zoology* **29**(1), 31-37.
- Tikkanen, O. P., and R. Julkunen-Tiitto, 2003: Phenological variation as protection against defoliating insects: the case of *Quercus robur* and *Operophtera brumata*. *Oecologia* **136**, 244-251.
- Turner, R., Y. H. Song, and K. B. Uhm, 1999: Numerical model simulations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* and white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) migration. *Bulletin of Entomological Research* **89**, 557-568.
- Wang, L., P. Shi, C. Chen, and F. Xue, 2013: Effect of temperature on the dependent of *Laodelphax striatellus* (Homoptera: Delphacidae). *Journal of Economic Entomology* **106**(1), 107-114.
- White, J., Y. S. Son, and Y. L. Park, 2009: Temperature-dependent emergence of *Osmia cornifrons* (Hymenoptera: Megachilidae) adults. *Journal of Economic Entomology* **102**(6), 2026-2032.

- Worner, S. P., and M. Gevrey, 2006: Modelling global insect pest species assemblages to determine risk of invasion. *Journal of Applied Ecology* **43**, 858-867.
- Xia, J. Y., W. van der Werf, and R. Rabbinge, 1999: Influence of temperature on bionomics of cotton aphid, *Aphis gossypii*, on cotton. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **90**, 25-35.
- Yamamura, K., M. Yokozawa, M. Nishimori, Y. Ueda, and T. Yokosuka, 2006: How to analyze long-term insect population dynamics under climate change: 50-year data of three insect pests in paddy fields. *Population Ecology* **48**, 31-48.
- Yukawa, J., K. Kiritani, N. Gyotoku, N. Uechi, D. Yamaguchi, and S. Kamitani, 2007: Distribution range shift of two allied species, *Nezara viridula* and *N. antennata* (Hemiptera: Pentatomidae), in Japan, possibly due to global warming. *Applied Entomology and Zoology* **42**(2), 205-215.
- Yukawa, J., K. Kiritani, T. Kawasawa, Y. Higashiura, N. Sawamura, K. Nakada, N. Gyotoku, A. Tanaka, S. Kamitani, K. Matsuo, S. Yamauchi, and Y. Takematsu, 2009: Northward range expansion by *Nezara viridula* (Hemiptera: Pentatomidae) in Shikoku and Chugoku Districts, Japan, possibly due to global warming. *Applied Entomology and Zoology* **44**(3), 429-437.
- Zamani, A. A., A. Talebi, Y. Fathipour, and V. Baniamari, 2006: Temperature-dependent functional response of two aphid parasitoids, *Aphidius colemani* and *Aphidius matricariae* (Hymenoptera: Aphididae), on the cotton aphid. *Journal of Pest Science* **79**, 183-188.
- Zamani, A. A., A. Talebi, Y. Fathipour, and V. Baniamari, 2007: Effect of temperature on life history of *Aphidius colemani* and *Aphidius matricariae* (Hymenoptera: Braconidae), two parasitoids of *Aphis gossypii* and *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology* **36**(2), 263-271.
- Zhongren, L., Y. Junming, Z. Canjian, W. Haihong, 2007: Prediction of suitable areas for *Liriomyza trifolii* (Burgess) in China. *Plant Protection-Beijing* **33**(5), 100.

**Appendix-1.** List of references on development models, longevity and fecundity models, and development completion models of several pests. In models, circle and triangle represent their availability of data in the references as follows: circle, in case of completion of the estimation for model parameters; triangle, in case of incompleteness of the estimation for model parameters

Scientific name	Common name	Korean name	Development models	Survival & fecundity models	Development completion models	References	Notes
<i>Aphis glycines</i>	Soybean aphid	콩진딧물	○	△		McCornack <i>et al.</i> (2004)	
<i>Aphis gossypii</i>	Cotton aphid	목화진딧물	○	○	○	Giarola <i>et al.</i> (2006)	
<i>Aphis gossypii</i>	Cotton aphid	목화진딧물	○	○	○	Xia <i>et al.</i> (1999)	
<i>Aphis gossypii</i>	Cotton aphid	목화진딧물	○	○	○	Kim <i>et al.</i> (2012b)	
<i>Bemisia tabaci</i>	Tobacco whitefly	담배가루이	○	○	○	Han <i>et al.</i> (2013)	
<i>Bemisia tabaci</i>	Tobacco whitefly	담배가루이	○	○	○	Drost <i>et al.</i> (1998)	
<i>Carposina sasakii</i>	Peach Fruit Moth	복숭아심식나방	○	○	○	Kim <i>et al.</i> (2001)	
<i>Carposina sasakii</i>	Peach Fruit Moth	복숭아심식나방	○	○	○	Kim & Lee(2001)	
<i>Chilo suppressalis</i>	Asiatic rice borer	이화명나방				Yamamura <i>et al.</i> (2006)	Long-term dynamics
<i>Delia antiqua</i>	Onion fly	고자리파리	○	○	○	Otto and Hommes(2000)	
<i>Frankliniella occidentalis</i>	Western flower thrips	꽃노랑총채벌레	○			McDonald <i>et al.</i> (1998)	
<i>Frankliniella occidentalis</i>	Western flower thrips	꽃노랑총채벌레	○			Lee <i>et al.</i> (2003)	
<i>Grapholita molesta</i>	Oriental fruit moth	복숭아순나방				Ahn <i>et al.</i> (2012)	Spring emergence models
<i>Grapholita molesta</i>	Oriental fruit moth	복숭아순나방				Silva <i>et al.</i> (2011)	
<i>Halymorpha halyis</i>	Brown marmorated stink bug	썩덩나무노린재	○	△		Nielsen <i>et al.</i> (2008)	Life table
<i>Helicoverpa assulta</i>	Oriental tobacco budworm	담배나방	○		○	Han <i>et al.</i> (1993)	
<i>Laodelphax striatellus</i>	Small brown planthopper	애벌구	○		○	Wang <i>et al.</i> (2013)	
<i>Laodelphax striatellus</i>	Small brown planthopper	애벌구	○		○	Park <i>et al.</i> (2011)	
<i>Laodelphax striatellus</i>	Small brown planthopper	애벌구		△		Raga <i>et al.</i> (1988)	
<i>Laodelphax striatellus</i>	Small brown planthopper	애벌구				Otuka <i>et al.</i> (2010)	Long-distance migration
<i>Laodelphax striatellus</i>	Small brown planthopper	애벌구				Yamamura <i>et al.</i> (2006)	Long-term dynamics
<i>Lipaphis eryimi</i>	Turnip Aphid	무태두리진딧물	○		○	Liu <i>et al.</i> (2000)	
<i>Lirionymza trifolii</i>	American serpentine leafminer	아메리카잎굴파리	○	○	○	Park <i>et al.</i> (2012)	
<i>Macrosiphum avenae</i>	English Grain Aphid	보리수염진딧물	○	△		Kieckhefer <i>et al.</i> (1989)	
<i>Myzus persicae</i>	Green peach aphid, Peach-potato aphid	복숭아혹진딧물	△	△	△	Kim <i>et al.</i> (2005)	
<i>Myzus persicae</i>	Green peach aphid, Peach-potato aphid	복숭아혹진딧물	○		○	Kim <i>et al.</i> (2012a)	
<i>Nephotettix cincticeps</i>	Green rice leafhopper	끝동매미충				Yamamura <i>et al.</i> (2006)	Long-term dynamics
<i>Nilaparvata lugens</i>	Brown planthopper	벼멸구	○	○	○	Cheng <i>et al.</i> (1990)	
<i>Nilaparvata lugens</i>	Brown planthopper	벼멸구	○	△		Bae <i>et al.</i> (1987)	

Appendix-1. Continued

Scientific name	Common name	Korean name	Development models	Survival & fecundity models	Development models completion models	References	Notes
<i>Nilaparvata lugens</i>	Brown planthopper	벼멸구				Turner <i>et al.</i> (1999)	Long-distance migration (BLAYER model)
<i>Paromolus exiguus</i>	-	혹다리긴노린재	0		0	Park <i>et al.</i> (2010)	
<i>Panonychus citri</i>	Citrus red mite	귤응애	0	△		Kasap(2009)	
<i>Phthorimaea operculella</i>	Potato tuber moth	감자나방	0	0	0	Sporleder(2004)	
<i>Plutella xylostella</i>	Diamondback moth	배추좀나방	0	0	0	Liu <i>et al.</i> (2002)	
<i>Plutella xylostella</i>	Diamondback moth	배추좀나방	0	0	0	Golizadeh <i>et al.</i> (2009)	
<i>Pseudococcus comstocki</i>	Comstock mealybug	가루깍지벌레	0	△	0	Jeon <i>et al.</i> (2003)	
<i>Riptortus clavatus</i>	Bean bug	톱다리개미허리노린재	0	△		Bae <i>et al.</i> (2005)	
<i>Scirtothrips dorsalis</i>	Chilli thrips, yellow tea thrips	블록총채벌레				Seal <i>et al.</i> (2010)	Intrinsic rate
<i>Scirtothrips dorsalis</i>	Chilli thrips, yellow tea thrips	블록총채벌레	△			Tatara(1994)	
<i>Sogatella furcifera</i>	White backed planthopper	흰등멸구				Turner <i>et al.</i> (1999)	Long-distance migration (BLAYER model)
<i>Sogatella furcifera</i>	White backed planthopper	흰등멸구	0		0	Park <i>et al.</i> (2013)	
<i>Spodoptera litura</i>	Oriental leafworm moth	담배거세미나방	0			Bae <i>et al.</i> (1997)	
<i>Spoladea recurvalis</i>	Hawaiian beet webworm	흰띠명나방	0		0	Lee <i>et al.</i> (2013)	
<i>Stathmopoda masinissa</i>	Persimmon fruit moth	감꼭지나방	0			Park <i>et al.</i> (2001)	
<i>Tetranychus urticae</i>	Twospotted Spider Mite	점박이응애		△	0	Carey(1982)	
<i>Tetranychus urticae</i>	Twospotted Spider Mite	점박이응애	0			Bounfour and Tanigoshi(2001)	
<i>Thrips palmi</i>	Melon thrips	오이총채벌레	0	0		Dentener <i>et al.</i> (2002)	Potential survival using CLIMEX
<i>Thrips palmi</i>	Melon thrips	오이총채벌레				Stephens and Dentener(2005)	Potential survival and population growth using DYMEX
<i>Thrips palmi</i>	Melon thrips	오이총채벌레	0		0	Park <i>et al.</i> (2010)	
<i>Thrips palmi</i>	Melon thrips	오이총채벌레	0			McDonald <i>et al.</i> (1999)	
<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	Greenhouse whitefly	온실가루이	0			Osborne(1982)	

**Appendix-2.** List of references on development models, longevity and fecundity models, and development completion models of several pollinators, predators, and parasitoids. In models, circle and triangle represent their availability of data in the references as follows: circle, in case of completion of the estimation for model parameters; triangle, in case of incompleteness of the estimation for model parameters

Scientific name	Common name	Korean name	Development models	Survival & fecundity models	Development completion models	References	Notes
<b>Pollinator</b>							
<i>Apis mellifera</i>	Western honey bee	양봉꿀벌				Cresswell <i>et al.</i> (1995)	Pollen dispersal by spatial distribution models
<i>Bombus terrestris</i>	Buff-tailed bumblebee, Large earth bumblebee	서양뒤영벌				Kadoya and Washitani(2010)	Stochastic spatio-temporal model
<i>Bombus terrestris</i>	Buff-tailed bumblebee, Large earth bumblebee	서양뒤영벌				Chifflet <i>et al.</i> (2011)	Pollen dispersal
<i>Osmia cornifrons</i>	Hornfaced bee	머리빨가위벌	○		○	White <i>et al.</i> (2009)	
<i>Osmia cornifrons</i>	Hornfaced bee	머리빨가위벌	△			Jeong and Jung(2011)	
<b>Predator</b>							
<i>Amblyseius californicus</i>	-	사막이리응애	△			Gotoh <i>et al.</i> (2004)	Intrinsic rate
<i>Amblyseius swirskii</i>	-	지중해이리응애	○			Lee and Gillespie(2011)	Intrinsic rate
<i>Amblyseius swirskii</i>	-	지중해이리응애		○		Park <i>et al.</i> (2011)	Intrinsic rate
<i>Amblyseius womersleyi</i>	-	긴털이리응애	○	○	○	Lee and Ahn(2000)	Intrinsic rate
<i>Neoseiulus cucumeris</i>	-	오이이리응애				Shipp and Whitfield(1991)	Functional response on prey
<i>Neoseiulus cucumeris</i>	-	오이이리응애				Shipp <i>et al.</i> (1996)	Influence of temperature and vapor pressure deficit on the rate of predation
<i>Neoseiulus cucumeris</i>	-	오이이리응애				Shipp and Houten(1997)	Influence of temperature and vapor pressure deficit on survival rate
<i>Orius sauteri</i>	-	애꽃노린재				Paik <i>et al.</i> (2003)	Functional response on prey
<i>Orius sauteri</i>	-	애꽃노린재			△	Paik <i>et al.</i> (2010)	Functional response on prey
<i>Phytoseiulus persimilis</i>	-	칠레이리응애				Skirvin and Fenlon(2003)	Functional response on prey
<b>Parasitoid</b>							
<i>Aphidius colemani</i>	-	클레마니진디벌	○			Zamani <i>et al.</i> (2007)	Functional response on prey
<i>Aphidius colemani</i>	-	클레마니진디벌				Zamani <i>et al.</i> (2006)	Functional response on prey
<i>Aphidius matricariae</i>	-	복숭아혹진디벌	○			Zamani <i>et al.</i> (2007)	Functional response on prey
<i>Aphidius matricariae</i>	-	복숭아혹진디벌				Zamani <i>et al.</i> (2006)	Functional response on prey
<i>Encarsia formosa</i>	-	온실가루이좀벌	○			Osborne(1982)	Rate of parasitism, total fecundity
<i>Encarsia formosa</i>	-	온실가루이좀벌	○			Qiu <i>et al.</i> (2004)	Rate of parasitism, total fecundity
<i>Eretmocerus eremicus</i>	-	황은좀벌	○			Qiu <i>et al.</i> (2004)	Rate of parasitism, total fecundity
<i>Eretmocerus mundus</i>	-	담배가루이좀벌	○			Qiu <i>et al.</i> (2004)	Rate of parasitism, total fecundity