

## 온도가 농약효과에 미치는 영향분석 및 농약사용량 예측 모의실험

모형호<sup>1</sup> · 강주완<sup>2</sup> · 조기종<sup>3</sup> · 배연재<sup>3</sup> · 이미경<sup>4</sup> · 박정준<sup>2,5,\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 생명자원연구소, <sup>2</sup>국립경상대학교 식물외과, <sup>3</sup>고려대학교 환경생태공학부,  
<sup>4</sup>국립안동대학교 식품생명공학과, <sup>5</sup>국립경상대학교 농업생명과학연구원

## Analysis of the Effect of Temperature on the Pesticide Efficacy and Simulation of the Change in the Amount of Pesticide Use

Hyoung-ho Mo<sup>1</sup>, Ju Wan Kang<sup>2</sup>, Kijong Cho<sup>3</sup>, Yeon Jae Bae<sup>3</sup>, Mi-Gyung Lee<sup>4</sup>  
and Jung-Joon Park<sup>2,5,\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Korea

<sup>2</sup>Department of Applied Biology, Gyeongsang National University, Korea

<sup>3</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Korea

<sup>4</sup>Department of Food Science and Biotechnology, National Andong University, Korea

<sup>5</sup>Institute of Agricultural and Life Science, Gyeongsang National University, Korea

**Abstract** - Pest population density models are very important to monitor the initial occurrence and to understand the continuous fluctuation pattern of pest in pest management. This is one of the major issues in agriculture because these predictions make pesticides more effective and environmental impact of pesticides less. In this study, we combined and predicted the mortality change of pest caused by pesticides with temperature change and population dynamic model. Sensitive strain of two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) with kidney bean leaf as host was exposed to mixed acaricide, Acrinathrin-Spiromesifen and organotin acaricide, Azocyclotin, at 20, 25, 30, and 35°C, respectively. There was significant difference in mortality of *T. urticae* among pesticides and temperatures. We used DYMEX to simulate population density of *T. urticae* and predicted that the initial management time and number of chemical control would be changed in the future with climate change. There would be implications for strategies for pest management and selection process of pesticide in the future corresponding climate change.

**Key words** : climate change, DYMEX, population dynamics, *Tetranychus urticae*

### 서 론

기후변화와 관련된 연구는 인간의 경제적인 활동과 관련된 영역에 집중되어 왔으며, 특히 농업과 관련된 연구가 다

수 수행되어 왔다. 농업은 기후변화에 따른 경제적인 영향을 직접적으로 받는 바, 이는 인류의 생존에 직접적으로 연관되어 있고, 기후변화에 매우 민감한 산업이기 때문이다. 따라서 여러 학자들은 미래 기후변화에 따른 농업의 경제적인 영향에 관하여 논하였으며, 현재까지도 선진국을 중심으로 이와 관련된 연구가 이뤄지고 있다(Adams 1989; Adams *et al.* 1990; Lewandrowski and Schimmelpfennig 1999; Chen

\* Corresponding author: Jung-Joon Park, Tel. 055-772-1928,  
Fax. 055-772-1929, E-mail. jungpark@gnu.ac.kr

and McCarl 2001).

농업에서 기후변화에 민감한 요인 중 하나는 농업 해충 및 병발생과 관련된 연구이다(Chen and McCarl 2001). 특히 곤충은 변온동물로서 생활사가 외부 환경조건에 의존하여 변화한다(Urarov 1931). 곤충의 생활사에 영향을 주는 가장 중요한 환경조건은 온도와 습도로서 기후변화에 기인한 온습도 변화는 해충 생활사 및 서식처에 일부 변화를 주어, 해충 밀도 수준이 공간적, 시간적 변동을 야기한다. 최근 온실내 토마토 잎 표면온도와 대기온도가 5~8°C 가량 차이가 나는 경우, 온도 증감에 따른 온실가루이(*Trialeturodes vaporariorum*)와 아메리카잎굴파리(*Liriomyza trifolii*)의 생활사가 0.5세대 정도 차이가 발생하는 것으로 보고되었으며(Park *et al.* 2011a, 2012), 기상청 기후변화 시나리오 보고서에 의하면 21세기 후반 한반도 기온은 6°C까지 상승하고, 평균 강우량은 18.7% 증가할 것으로 전망되고 있다(Kim and Lee 2011). 기후변화에 의한 해충 밀도 증감 변화는 작물의 생리적인 변화와 맞물려 복합적인 현상을 나타내며, 해충 방제 전략에 많은 영향을 미치게 된다. 일반적으로 기후변화에 따라, 이미 존재하는 해충의 지리적 변동과 양적 증가는 보다 빈번하고 광범위한 농약살포를 야기할 것으로 예측된다. 또한 현재 농약제품에 대한 해충의 저항성이 증가함으로써 더 많은 농약이 살포될 것이며, 이는 결국 새로운 농약개발을 요구할 것으로 예측되고 있다(Bloomfield *et al.* 2006; Boxall *et al.* 2009; Rohr *et al.* 2011). Chen and McCarl(2001)은 미국에서 기후변화 시나리오에 따른, 각 작물별 사용되는 농약 사용량을 조사하였는데, 밀을 제외한 옥수수, 면화, 감자와 콩의 생산량을 유지하기 위해서는 농약 사용 비용 증가가 예상된다고 하였다. 하지만, 이는 기후변화에 의거한 연평균온도의 증가와 강수량의 조건으로 단순히 농약의 사용량을 예측한 것으로 실제 온도가 변화함에 따라 농약의 효과가 변화하는 지에 대한 물음에 답이 될 수 없다.

온도변화에 따른 해충개체군 증감모형은 해충방제를 위한 초발생예찰과 연중 발생하는 연속적 해충변동 양상의 파악에 매우 중요하다. 이러한 예측은 농약사용의 효율성을 높이고, 환경에 적은 영향을 줄 수 있으므로, 현대 해충방제전략의 화두로 볼 수 있다.

본 연구목표는 온도변화에 따른 해충의 농약효과에 따른 사충률의 변화를 개체군 모형과 결합시켜 모의실험하는 것으로, 대상 해충은 농작물과 원예작물에 광범위하게 피해를 주는 해충인 점박이응애(*Tetranychus urticae* Koch)를 이용하였으며, 시판되는 상업적 농약들을 이용한 생물검정법 실험(농약에 의한 사충수 및 산란수 실험)을 여러 온도 조건하에서 실시하여 온도 변화에 따른 농약의 효과를 살피고 그 결과를 이용하여 모형화 및 모의실험(modeling and

simulation)을 온도의 변동에 따라 실시하여 향후 기후변화에 따른 온도의 증감에 대한 해충 개체군의 밀도변동과 방제를 위한 농약 사용의 변동을 알아보는 데 있다.

## 재료 및 방법

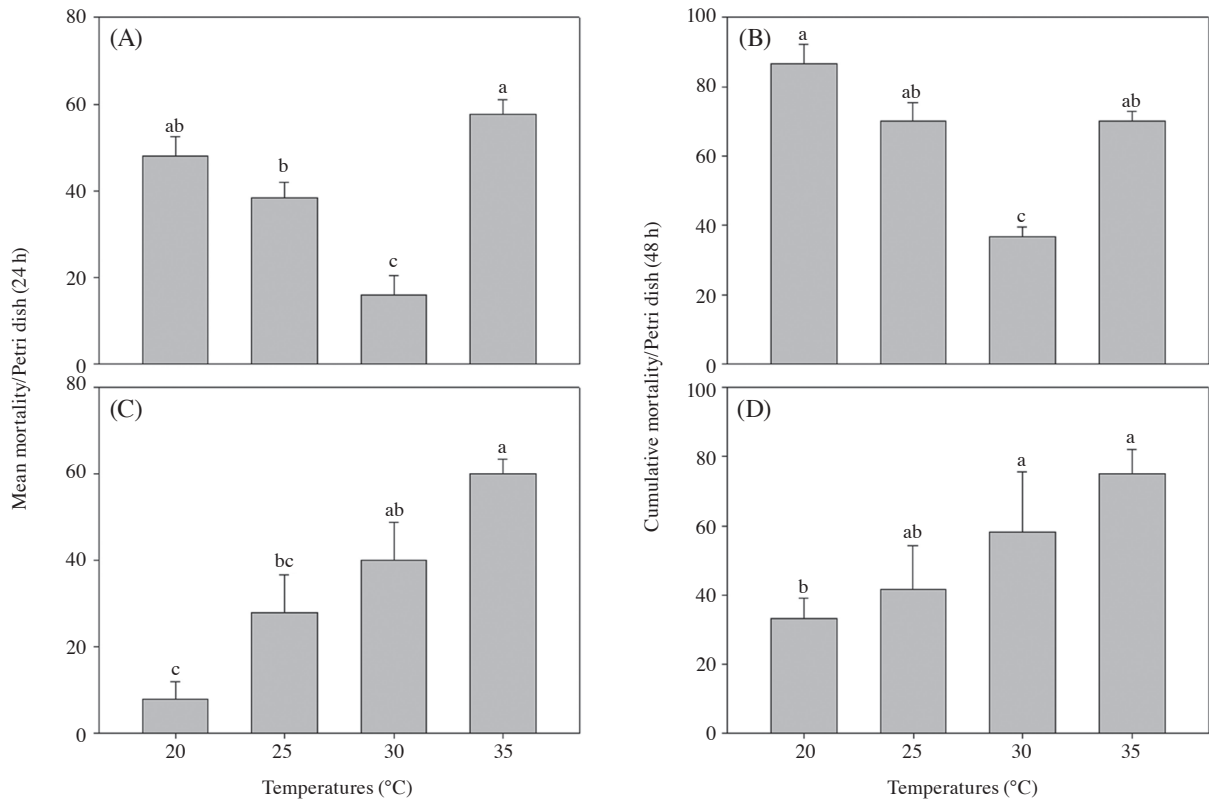
### 1. 생물검정법

본 실험에는 농촌진흥청-국립농업과학원에서 누대 사육된 감수성계통 점박이응애를 2010년 분양받아 이용하였다. 강낭콩(*Phaseolus vulgaris*)을 기주로 하여 사육실(25±10°C, 광주기 16L:8D, RH 60%)에서 물이 담긴 트레이에 격리하여 증식시켰다. 강낭콩은 일반 원예용 상토를 흑색비닐포트(300 mL)에 넣어 한 포트당 3립을 심어 키웠으며, 첫 본잎 한 쌍만을 유지시켜 실험에 사용하였다. 점박이응애 밀도에 따라 새로운 강낭콩 포트를 2~3개씩 공급하여 유지, 증식시키거나 잎을 잘라 생물검정 실험에 사용하였다.

점박이응애 방제를 위한 상업용 농약 2가지 계통을 선정하여 실험을 실시하였다. 2가지 농약은 Acrinathrin-Spiromesifen 혼합제(유효성분: 권장농도; acrinathrin: 0.015 mL L<sup>-1</sup>, spiromesifen: 0.075 mL L<sup>-1</sup>)와 Azocyclotin 유기주석계(유효성분: 권장농도; azocyclotin: 0.1625g L<sup>-1</sup>)로 해충방제에 사용되는 권장농도를 기준으로 실험하였다.

생물검정시험을 위해 패트리디시(90×15 mm)에 탈지면을 놓고 물로 적신 후 강낭콩의 잎 절편을 직경 3 cm의 Cork-borer를 이용하여 잎의 주맥이 포함되도록 원형으로 잘라 잎 뒷면이 위를 향하도록 탈지면 위에 하나씩 올려놓은 후, 점박이응애가 증식된 강낭콩 잎에서 한 패트리디시 당 갓 부화한 암컷 성충 10마리를 붓(미술용 세필)으로 강낭콩 잎 뒷면에 접종하였다. 각 살충제별 권장농도로 증류수를 이용하여 희석시킨 후, 각 5반복씩 처리하였다. 실험에 사용한 온도조건은 총 4가지로 20, 25, 30, 35°C로 하였고, 각 온도 조건마다 동일 농도의 살충제가 처리될 패트리디시를 모아놓고 분무법(Spraying)을 이용해 농도별 농약을 분무하고 실내에서 30분 이상 건조시켰다. 대조구에는 동일한 방법으로 증류수를 분무하였다. 건조 후 강낭콩 잎 절편은 각각 20, 25, 30, 35°C의 항온기(각 온도±0.5°C, 광주기 16L:8D, RH 60%)에 보관하였다. 24, 48시간 후 해부현미경하에서 점박이응애의 사충률을 조사하였으며 이때 익사충은 제외하고 붓으로 자극하였을 때 2개 미만의 부속지가 움직였을 경우를 사망한 것으로 하여 기록하였다. 모든 실험에서 무처리구 및 처리농약구의 분무량은 모두 1.6 mg cm<sup>-2</sup>가 되도록 조절하였다.

생물검정실험 결과의 각 온도별 차이는 분산분석을 이용



**Fig. 1.** Mean mortality for 24 h and cumulative mortality for 48 h of *Tetranychus urticae* exposed to Acrinathrin-Spiromesifen (A and B) and Azocyclotin (C and D) for 24 hours at 20, 25, 30, and 35°C, respectively.

하여 분석했고, 분산분석 결과가 유의한 경우 Tukey 사후 검정을 실시하여 그룹화 했다 (PROC GLM; SAS Institute 1995).

## 2. DYMEX를 이용한 점박이응애 개체군 모형 모의실험

점박이응애 개체군 밀도변동모형을 이용한 모의실험 평가에 사용된 DYMEX<sup>®</sup> 프로그램은 호주 CSIRO에서 개발한 상용 프로그램으로, Builder (Maywald *et al.* 2007a)와 Simulator (Maywald *et al.* 2007b)로 구성되어 있다. DYMEX<sup>®</sup>는 동일연령 집단(cohort)을 기반으로 개체군의 각 성장태별 발육 및 개체군 밀도 변동 모형에 사용할 수 있는 모듈들(modules)을 제공한다. 사용자는 제공된 모듈을 대상 개체군, 혹은 대상 기후지역에 맞게 고쳐서 사용할 수 있다 (Maywald *et al.* 2007a, b; Park *et al.* 2011b). DYMEX를 이용하여 모의실험하기 위하여 필요한 것은 다음의 3가지이다. 첫째, 기후관련 자료, 둘째, 곤충개체군의 온도에 따른 발육모형과 모형계수, 셋째, 개체군 밀도변동에 영향을 줄 특별한 이벤트와 관련된 자료이다 (Maywald *et al.* 2007a, b). 먼저 기후관련자료는 2009년 7월 1일부터 2011년 6월 31일 경상북

도 안동지역 기상청에서 제공하는 일 최고, 최저온도를 이용하였다. 다음으로 점박이응애 개체군의 온도에 따른 발육모형과 모형계수는 Sabelis (1982)가 제안한 발육모형과 모형계수를 이용하였다. 끝으로 농약의 효과와 관련된 자료로서, 성충기준 5000마리 이상일 경우 농약을 살포하는 것으로 하여, 현재 온도상태를 기준으로 농약 살포시 일반 방제 대상 해충용 등록약제의 방제효과인 90%를 적용하여 점박이응애 밀도가 감소하는 것으로 하였다 (농촌진흥청 2011). 일반적으로 농약은 살포 후 일정시간이 지나면 그 효과가 감소하게 되어있는데, 본 연구에서는 48시간 이후 농약의 살충력이 5%로 감소된다고 가정하였다 (Maywald *et al.* 2007a, b). 완성된 DYMEX 모형의 각 계수는 기후자료인 온도자료의 변화에 맞추어 발육모형의 모형계수에 맞추어 개체군 밀도변동이 이루어지게 된다. 연평균 기온의 변화는 현재 온도조건과 이를 기준으로 평균 1, 2, 3°C 증가된 온도자료를 작성하여 DYMEX 모의 실험을 실시하여 비교하였으며, 변화된 연평균 기온자료를 사용하는 경우, 온도변화에 따른 농약의 효과(사충율의 변화)를 수리화하여 DYMEX 모형에 반영하여 모의실험 하였다.

## 결과 및 고찰

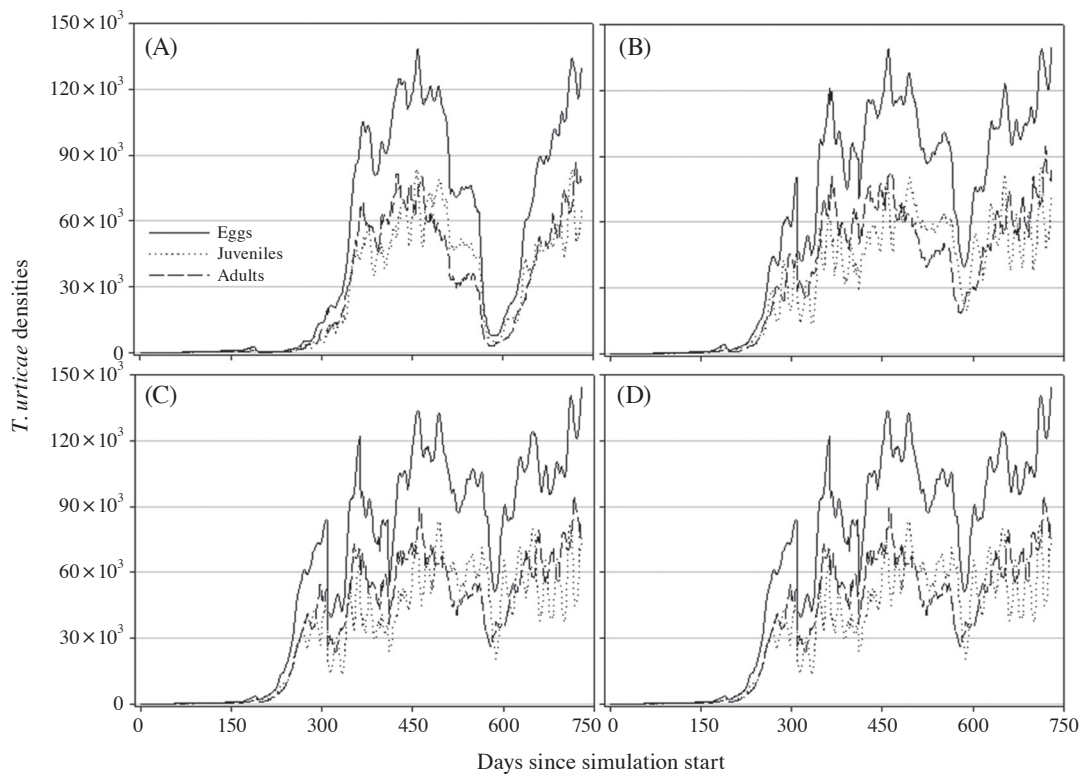
### 1. 온도변화에 따른 농약처리효과 사충률

사충률 자료는 점박이응애 성충이 농약에 노출된 후 24, 48시간 후에 각각 관찰하여 익사한 수를 제외하고 계산되었다(Fig. 1). 24시간 후 사충률과 48시간 후 누적사충률의 경향은 처리한 농약의 종류와 관계없이 비슷하게 나타났으며, 무처리구의 경우 익사한 경우를 제외하고 사충수는 없었으므로 사충율을 0%로 하였고 그림으로 나타내지 않았다. Acrinathrin-Spinomesifen 혼합제의 경우 35°C를 제외하고 온도가 증가함에 따라 누적 사충수가 유의하게 감소하였으며, Azocyclotin 유기주석계의 경우 온도의 증가에 따라 사충수가 유의하게 증가하는 경향을 보였다( $P$ -value < 0.05; Fig. 1). 이러한 결과는 온도에 따른 농약 효과가 유효성분 종류에 따라 증감되는 것을 의미한다. 다만 혼합제의 사충률 결과, 35°C에서 사충률이 증가하는 것은 35°C 이상 고온역에서 점박이응애 자연사충수가 증가하기 때문으로 사료된다(Sabelis 1982). 따라서 본 실험에서 온도 변화에 따른 사충율 증감계산에서 혼합제의 경우 35°C 결과를 제외하였다. Fig. 1A에서 혼합제의 경우 20°C에서 약 50%의 사충률을

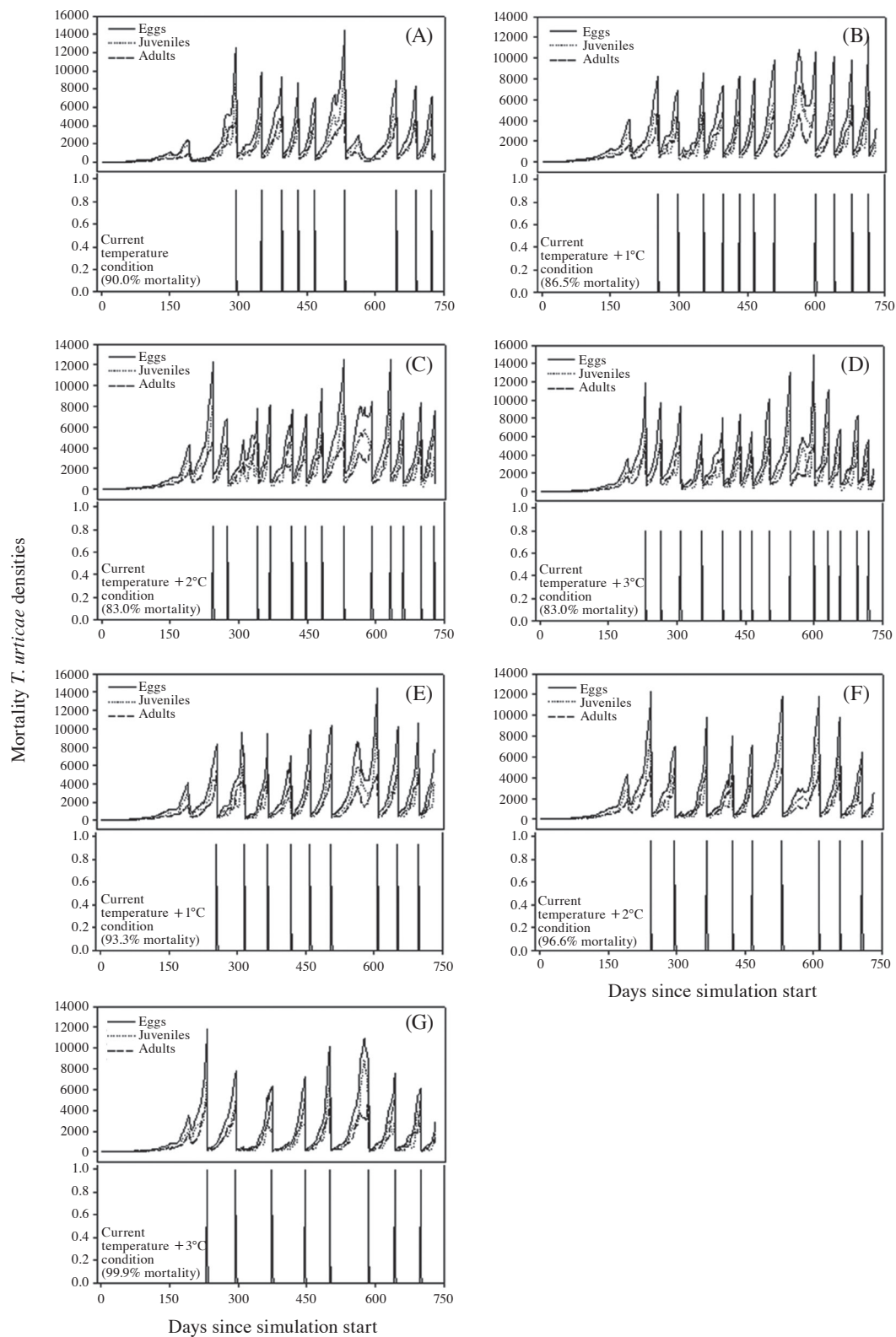
30°C에서 15%의 사충률을 보이므로 사충률의 감소를 3.5% °C<sup>-1</sup>로 설정하였으며, Fig. 1C에서 유기주석계 결과 20°C에서 약 10%인 사충률이 35°C에서는 60% 이므로 사충률의 증가를 3.3% °C<sup>-1</sup>로 각각 설정하였다.

### 2. DYMEX를 이용한 점박이응애 개체군 밀도변동 모의 실험

DYMEX를 이용한 점박이응애의 밀도변동 모형은 알, 유충, 성충의 3단계로 구분하여 작성하였다. 각각의 영기에 맞는 모형 파라미터는 기 발표된 문헌의 값을 수정하여 작성하였다(Sabelis 1982). 개발된 모형의 사망률과 관련하여 기 발표된 문헌의 값에 더하여, 생존최저온도역(4°C)보다 낮은 경우, 최고온도역(38°C)보다 높을 경우, 각 태별 밀도가 1000마리 이상일 경우 각각 사망률을 높이는 종내경쟁함수를 포함하였다. 모의실험의 시작은 알 4개, 유충 2마리, 성충 2마리가 새로운 과수원으로 들어온 것을 가정하였다. Fig. 2는 점박이응애 각 태별 밀도변동곡선으로 현재 온도조건과 평균온도가 각각 1, 2, 3°C 증가했을 때를 가정한 경우이다. 현재 온도 조건(Fig. 2A)에서 모의실험 후 약 1년이 지난, 350일 경 보이는 밀도의 감소는 고온에 의한 사망률 증가에



**Fig. 2.** Prediction of population variation of *Tetranychus urticae* in present temperature condition (A), +1°C (B), +2°C (C), and +3°C (D) using DYMEX.



**Fig. 3.** Prediction of population variation of *Tetranychus urticae* in present temperature condition without pesticide application (A), +1°C with Acrinathrin-Spinomesifen application (B), +2°C with Acrinathrin-Spinomesifen application (C), +3°C with Acrinathrin-Spinomesifen application (D), +1°C with Azocyclotin application (E), +2°C with Azocyclotin application (F), +3°C Azocyclotin application (G) using DYMEX.

따른 것이고, 500일 이후 보이는 감소는 저온에 의한 사망률 증가에 따른 것이며, 밀도가 급격히 증가하다가, 어느 순간 완만해 지는 것은 밀도가 높아져서 종내경쟁에 의한 사망률이 높아지는 것을 의미한다. 이를 평균온도가 증가했을 때와 비교해 본다면, 공히 약 300일 전후로 하여 고온에 의한 사망률 증가가 높게 나타나고 있으며, 500일 이후 보이던 저온에 의한 사망률의 영향이 많이 줄어들 것으로 보인다(Fig. 2B, C). 특히 점박이응애 밀도변동에 큰 영향을 주는 저온사망율의 감소는 이듬해 해충인 점박이응애의 초기밀도 증가에 의한 방제비용증가를 비롯한 해충방제문제를 야기시킬 것으로 사료된다(Fig. 2). 이러한 밀도변동 모의실험을 기준으로 성충이 5000마리 이상일 경우 혼합제와 유기주석계 농약을 각각 살포한 경우는 Fig. 3에 정리하였다. 현재 온도 조건에서 농약사용시 보이는 일반적인 90% 사충률을 기준으로 한 모의실험결과, 최초 농약 살포일은 모의실험 294일째이며, 총 9회 농약을 살포할 것으로 나타났다(Fig. 3A). 온도의 증가에 따른 농약 효과의 감소가 보이는 Acrinathrin-Spinomesifen 혼합제의 경우 평균온도의 증가는 초기 방제가 빨라지며, 방제횟수가 증가하는 패턴을 보였으며(Fig. 3 B-D), 그 반대의 경우인 Azocyclotin 유기주석계의 경우 초기방제시기는 동일하지만, 방제횟수가 감소하는 것을 알 수 있었다(Fig. 3E-G).

해충 개체군은 외부 온도에 맞추어 발육과 번식을 하는 변온동물(poikilotherm)이며, 외부 온도변화는 해충 대사에 영향을 주게 되어, 발육율과 번식률을 결정한다. 해충 개체군의 밀도증감은 외부온도에 따라 변화하므로, 생존 가능한 온도범위에서 온도에 의한 발육율과 번식률을 수리화하고 이를 바탕으로 모형작성이 가능하다(Wagner *et al.* 1984). 일반적으로 낮은 수준의 온도 증가는 곤충 대사속도를 증가시켜 세대를 앞당기고, 전체적인 밀도증가를 가져오게 된다. 하지만 급격한 온도 변화는 곤충종의 생리적인 변화에 영향을 주기도 하는데, Yu *et al.*(2012)은 *Nilaparvata lugens* 수컷 성충의 생식계 분비샘(Male Accessory Glands; MAGs)에서 분비되는 활성 펩타이드가 고온역(34°C)에서 낮게 분비되어, 결과적으로 암컷의 산란력 감소가 유도된다고 하였다.

모형은 적절히 사용되는 경우, 우리가 경험하지 못한 환경에서 밀도예측 및 분포예측을 가능케 한다(Sutherst *et al.* 2007; He *et al.* 2012). 본 연구에서 사용된 모형은 저온과 고온역에서 사망률을 높이는 함수와 밀도변동에 따른 종내경쟁 함수를 활용하였으므로, 실제 야외개체군에 근사하도록 작성하였으며, 그 결과 평균온도의 상승에 따른 점박이응애 밀도의 변동과 이에 따른 농약 사용의 증감을 모의 실험할 수 있었다(Figs. 2, 3). 현재 사용가능한 농약은 현재 환경에서 사용을 염두에 둔 것이며, 본 연구결과 온도의 변화는 농

약 효과를 증가 혹은 감소시키고 있었으며(Fig. 1), 이를 기준으로 평균온도의 증가에 따른 농약 살포횟수의 변화를 확인할 수 있었다(Fig. 3).

기후변화가 진행되면서 나타나는 평균기온 증가는 해충의 지리적 변동과 양적 증가로 나타나고 이에 따라 주요한 방제전략인 농약의 살포는 더 빈번하고 광범위할 것으로 예측되고 있으며, 현재 출시된 농약제품에 대한 해충의 저항성 증가는 더 많은 농약살포를 유도하므로 새로운 농약개발이 필요할 것으로 예측하고 있다(Bloomfield *et al.* 2006; Boxall *et al.* 2009; Rohr *et al.* 2011). 하지만 본 연구결과 온도변화에 따른 농약효과는 농약종류에 따라 다르고, 이를 기준으로 한 농약의 사용빈도 역시 온도변화에 따라 증가 혹은 감소하였으므로, 평균온도증가에 영향이 없거나, 약효가 증가하는 농약의 선발 역시 미래 기후변화대응 해충방제 전략으로 포함시켜야 한다. 다만 본 연구는 실험실내에서 소규모로 이루어진 실험이므로, 향후 야외 포장 수준에서 온도변화에 따른 농약의 약효 검증실험이 필요하며, 점박이응애 모형을 좀 더 개선하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

## 적 요

기후변화에 따른 해충개체군 증감모형은 해충방제를 위한 초발생예찰과 연속적 해충변동 양상의 파악에 매우 중요하다. 이러한 예측은 농약사용의 효율성을 높이고, 환경에 적은 영향을 줄 수 있으므로, 현대 해충방제전략의 화두로 볼 수 있다. 본 연구는 온도변화에 따른 해충의 농약효과에 따른 사충률의 변화를 개체군 모형과 결합시켜 모의했다. 감수성 점박이응애를 강낭콩을 기주로 20, 25, 30, 35°C에서 Acrinathrin-Spiromesifen 혼합제와 Azocyclotin 유기주석계 농약에 노출시켰다. 생물검정 결과 점박이응애의 사충률은 온도와 농약의 종류에 따라 유의한 차이가 발생했다. 점박이응애의 개체군 밀도변동 모의는 DYMEX를 이용했으며, 모의결과 농약의 종류별로 기후변화에 따른 초기방제 시기와 방제횟수에 차이가 나타날 것으로 예측됐다. 본 연구결과는 미래의 기후변화에 대응한 해충방제 전략과 농약 선발에 있어 중요한 시사점을 제공할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “기후변화대응환경기술개발사업(2014001310008)”의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Adams RM. 1989. Global Climate Change and Agriculture: An Economic Perspective. *Am. J. Agr. Econ.* 71:1272-1279.
- Adams RM, C Rosenzweig, RM Peart, JT Ritchie, BA McCarl, JD Glycer, RB Curry, JW Jones, KJ Boote and LH Allen Jr. 1990. Global climate change and US agriculture. *Nature* 345:219-224.
- Bloomfield JP, RJ Williams, DC Gooddy, JN Cape and P Guha. 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater-a UK perspective. *Sci. Total Environ.* 369:163-177.
- Boxall AB, A Hardy, S Beulke, T Boucard, L Burgin, PD Falloon, PM Haygarth, T Hutchinson, RS Kovats, G Leonardi, LS Levy, G Nichols, SA Parsons, L Potts, D Stone, E Topp, DB Turley, K Walsh, EMH Wellington and RJ Williams. 2009. Impacts of Climate Change on Indirect Human Exposure to Pathogens and Chemicals from Agriculture. *Environ. Health Perspect.* 117:508-514.
- Chen C and BA McCarl. 2001. An Investigation of the Relationship between Pesticide Usage and Climate Change. *Clim. Chang.* 50:474-487.
- He W, M You, L Vasseur, G Yang, M Xie, K Cui and S Huang. 2012. Developmental and insecticide-resistant insights from the de novo assembled transcriptome of the diamond-back moth, *Plutella xylostella*. *Genomics* 99:169-177.
- Kim M and D Lee. 2011. Korean climate change assessment report 2010. Ministry of Environment.
- Lewandrowski J and D Schimmelpfennig. 1999. Economic implications of climate change for US agriculture: assessing recent evidence. *Land Econ.* 75:39-57.
- Maywald GF, DJ Kriticos, RW Sutherst and W Bottomley. 2007a. Dymex Model Builder Version 3: User's Guide. Hearne Scientific Software Pty Ltd, Melbourne.
- Maywald GF, W Bottomley and RW Sutherst. 2007b. DYMEX Model simulator, version 3: user's guide. Hearne Scientific Software Pty Ltd, Melbourne.
- Park JJ, KW Park, KI Shin and K Cho. 2011a. Evaluation and Comparison of Effects of Air and Tomato Leaf Temperatures on the Population Dynamics of Greenhouse Whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) in Cherry Tomato Grown in Greenhouses. *Korean J. Hortic. Sci.* 29:420-432.
- Park JJ, JH Lee, KI Shin, SE Lee and K Cho. 2011b. Geostatistical analysis of the attractive distance of two different sizes of yellow sticky traps for greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Homoptera: Aleyrodidae), in cherry tomato greenhouses. *Aust. J. Entomol.* 50:144-151.
- Park JJ, HH Mo, DH Lee, KI 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 J. Appl. Entomol.* 51:235-243.
- Rohr JR, TM Sesterhenn and C Stieha. 2011. Will climate change reduce the effects of a pesticide on amphibians?: partitioning effects on exposure and susceptibility to contaminants. *Glob. Chang. Biol.* 17:657-666.
- SAS Institute. 1995. SAS user's guide. SAS Institute, NC.
- Sabelis MW. 1982. Biological control of two-spotted spider mites using phytoseiid predators. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen.
- Sutherst RW, GF Maywald and DJ Kriticos. 2007. CLIMEX version 3: user's guide. Hearne Scientific Software Pty Ltd.
- Wagner TL, Hi Wu, PJH Sharpe and RN Coulson. 1984. Modeling distributions of insect development time: a literature review and application of the Weibull function. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 77:475-483.
- Yu YL, LJ Huang, LP Wang and JC Wu. 2012. The combined effects of temperature and insecticide on the fecundity of adult males and adult females of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae). *Crop Prot.* 34:59-64.

Received: 23 February 2016

Revised: 14 March 2016

Revision accepted: 14 March 2016