

상용소프트웨어(DYMEX)를 이용한 톱다리개미허리노린재 (*Riptortus pedestris*) 밀도 변동 양상 예측 모델 구축 및 평가

박창규* · 염기홍¹ · 이상구 · 이상계

국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과, ¹신젠타코리아 진천연구소

Construction and Evaluation of Cohort Based Model for Predicting Population Dynamics of *Riptortus pedestris* (Fabricicus) (Hemiptera: Alydidae) Using DYMEX

Chang-Gyu Park*, Ki-Hong Yum¹, Sang-Ku Lee and Sang-Guei Lee

Crop protection Division, Department of Crop Life Safety, National Academy of Agricultural Science, Wanju 565-851, Republic of Korea

¹R&D Trialing team, Syngenta Korea Ltd. Jincheon 365-841, Republic of Korea

ABSTRACT: A Cohort based model for temperature-dependent population dynamics of *Riptortus pedestris* was constructed by using a commercial software (DYMEX) and seasonal occurrence along with pesticide treatments effect was simulated and validated with pheromone trap data. Ten modules of DYMEX software were used to construct the model and Lifecycle module was consisted of seven developmental stages (egg, 1 - 5 nymphal instars, and adult) of *R. pedestris*. Simulated peaks of adult populations occurred three or four times after the peak of overwintered populations which was similar to those observed from pheromone trap catch. Estimated dates for the second peak were quite similar (1-2 day difference) with those observed with pheromone trap. However, the estimated dates for the first population peak were 9-16 days later than the observed dates by pheromone trap and the estimated dates for the last peak were 17-23 days earlier than the observed dates. When insecticide treatments were included in the simulation, the biggest decrease in *R. pedestris* adult density occurred when insecticide was applied on July 1 for the first peak population: the estimated adult density of the second peak was 3% of untreated population density. When insecticide was assumed to be applied on August 30 for the second peak population, the estimated adult density of the following generation was about 25% of untreated population and the peak density of the following generation reached about two weeks later than untreated population. These results can be used for the efficient management strategies for the populations of *R. pedestris*.

Key words: *Riptortus pedestris*, DYMEX, Population dynamics model, Simulation

초록: 온도에 따른 톱다리개미허리노린재 (*Riptortus pedestris*)의 개체군 밀도 변동 예측 모델을 상용 소프트웨어인 DYMEX로 구축하고 월동 성충 밀도를 바탕으로 한 연간 발생 밀도 변동 패턴과 살충제 처리 시기에 따른 밀도 억제 효과를 시뮬레이션하였다. 구축된 모델은 총 10개의 모듈을 사용하였으며, Lifecycle 모듈은 알, 1, 2, 3, 4, 5령, 성충의 7개 발육 단계로 구성하였다. 월동 성충 개체군의 포획시기를 이용하여 연중 밀도 변동을 예측한 결과 연도에 따라 3~4번의 신 성충 발생이 가능하여 페로몬 트랩 포획밀도 조사와 유사하였다. 콩 포장으로 침입해 들어오는 두 번째 신 성충의 경우 개발된 모델을 이용하여 예측된 성충 발생 최성일이 페로몬 트랩으로 조사된 포획 밀도 최성기와 거의 일치 하였다. 그러나 예측된 첫 번째 신 성충 발생 최성일은 페로몬트랩 포획 최성기보다 연도에 따라 9~16일 늦었으며, 마지막 세대의 발생 최성일은 연도에 따라 페로몬 트랩 포획 최성기보다 17~23일 빨랐다. 살충제 사용을 가정 한 첫 번째 신성충 개체군 밀도 억제가 다음 세대의 밀도 증가에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결과, 신 성충 발생 초기일수록 밀도 억제효과가 커서 7월 1일 살충제 처리를 가정하였을 때 다음 세대에 형성된 성충은 무처리의 3% 정도로 현저하게 낮았다. 또한 포장에 침입해 들어오는 두 번째 신성충 개체군을 대상으로 시기별 살충제 처리 효과를 시뮬레이션한 결과 8월 30일 살충제 처리를 가정 한 경우 다음세대 성충 최고 밀도는 무처리의 25% 정도로 줄었고, 최고 밀도에 도달한 시기도 무처리에 비해 2주 이상 늦었다. 이상의 연구 결과들은 톱다리개미허리노린재의 효율적인 종합적 방제 계획을 세우는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

검색어: 톱다리개미허리노린재, DYMEX, 개체군 밀도변동 모델, 시뮬레이션

*Corresponding author: changgpark@korea.kr

Received February 10 2015; Revised March 30 2015

Accepted April 15 2015

톱다리개미허리노린재(*Riptortus pedestris*)는 한국, 일본, 중국, 인도네시아, 인도 등 아시아 지역에 분포하고 있으며(Kikuhara, 2005), 콩 재배 포장 주변이나 야산의 활엽 낙엽층에서 성충으로 월동한다(Lee et al., 1997; Natsuhara, 1985; Tabuchi and Ito, 2004; Moriya, 2005). 본 해충은 연중 여러 세대를 경과하고, 기주 식물의 분포나 주변 작물의 재배 형태에 따라 세대수와 서식처를 달리하는 해충으로 하루 평균 이동 거리는 수 킬로미터에 달할 수 있다(Maharjan and Jung, 2009). 톱다리개미허리노린재 연중 발생 밀도 변동에 관하여 조사한 결과들을 보면 연구자들에 따라 2~3번의 신성충이 발생한다고 보고하였으며(Natsuhara, 1985; Kono, 1989b; Tabuchi et al., 2005; Endo et al., 2011; Shin et al., 2012), 경상남도 진주 지역에서 집합페로몬 트랩 포획 밀도와 난소 발육 정보를 이용하여 예측한 결과 연 3회 신성충이 발생한다고 하였다(Huh et al., 2005). 톱다리개미허리노린재를 대상으로 발육 기간 및 산란에 가장 중요한 영향을 미치는 온도에 기초하여 장기간에 걸친 개체군의 정량, 정성적 밀도 변동 경과를 수리적으로 추정된 결과를 보고한 예는 없었으며, 본 해충과 같이 비행 능력이 크고 세대에 따라 서식처를 이동하는 경우, 연간 세대수를 추정하거나 특정 작물로의 침입 시기를 신속, 정확하게 예측하는 기술을 개발하는 것은 해당 해충의 효과적인 관리전략 수립에 중요한 요소가 될 것이다.

국내에서 많은 연구자들이 온도를 기반으로 한 동일 연령 집단의 해충 발육과 산란에 관한 연구들을 진행하였고 그에 따른 결과들을 보고하였지만, 이들을 결합하여 장기간 밀도 변동 예측 결과를 보고한 것은 토마토에서 아메리카잎굴파리의 개체군 밀도 변동 예측 모델(Park et al., 2012)을 제외하고는 거의 찾아보기 어려웠다. 해충개체군의 시기별 밀도 변동 상황 및 세대 경과를 예측하기 위한 모델은 온도에 따른 발육 및 산란을

해석하는 수리적 모델을 기반으로 컴퓨터 프로그래밍 언어를 이용하여 직접 프로그래밍하거나 상용 소프트웨어를 이용하여 구축할 수 있다. 상용프로그램 중 DYMEX는 컴퓨터 프로그래밍 언어를 모르는 일반인 및 연구자들도 내장 모듈들을 사용하여 수리 모델 기반의 모델을 쉽게 구축할 수 있게 사용자 편의성을 제공하고 있다.

따라서 본 연구는 기존에 보고된 톱다리개미허리노린재의 온도에 따른 발육 및 산란 함수를 사용하여 동일연령 집단을 기반으로 한 톱다리개미허리노린재 개체군 밀도 변동 예측 모델을 구축하고, 연중 시기별 밀도 변동 양상을 시뮬레이션 하였으며, 밀도 변동 예측 결과를 야외에서 집합페로몬 트랩으로 조사한 성충 밀도 자료와 비교하여 연도별 세대수 등 개체군의 정성, 정량적 변화를 해석하고자 하였다. 또한 포장에 침입하기 전인 첫 번째 신성충 개체군과 콩 포장에 침입하는 두 번째 신성충 개체군을 대상으로 살충제 적용시기에 따른 밀도 변동 양상을 시뮬레이션하고 결과를 제시함으로써 살충제를 이용한 효과적인 밀도 관리 전략의 예를 제안하고자 수행하였다.

재료 및 방법

온도에 따른 발육, 전이 및 산란 함수

모델 구축에 사용된 톱다리개미허리노린재 성충 전 발육태별 온도에 따른 발육율, 성충전 발육완료, 성충 사망률, 총 산란수, 누적 산란율 함수는 Kim et al. (2009)이 발표한 논문의 자료(Table 1, 2)를 사용하였으나, 성충 전 발육완료 함수 및 누적 산란율 함수의 경우 파라메타 중 β 값은 상기 논문에서 제공한 값이 아닌 그 값에 가장 가까운 홀수 정수 값을 사용하였다(구

Table 1. Cited parameters of the temperature-dependent developmental rate and stage emergence equations for immature stages of *Riptortus pedestris* (Kim et al., 2009)

Stages	Parameters					
	Temperature-dependent developmental rate equation ^{a)}			Stage emergence equation ^{b)}		
	ρ	δ	t	λ	α	β
Egg	0.0084	2.2450	45.148	-1.1250	0.962	15.0
1st nymph	0.0340	14.6960	59.083	-1.2283	0.898	5.0
2nd nymph	0.1681	5.9387	39.745	-0.0172	1.022	5.0
3rd nymph	0.0868	11.1461	46.881	-0.3271	0.898	5.0
4th nymph	0.1091	9.0773	44.666	-0.1355	0.927	7.0
5th nymph	0.0533	16.8143	54.756	-0.4948	0.973	13.0

^{a)}Lactin 2 model : $r(T) = e^{(\rho t)} - e^{(\rho T - (T-t)/\delta)} + \lambda$

^{b)}Two-parameter Weibull function : $F(px) = 1 - e^{-(px/\alpha)^\beta}$

Table 2. Cited and estimated parameters of temperature-dependent adult developmental rate, survival rate, temperature-dependent total fecundity and cumulative oviposition rate models for female adult *Riptortus pedestris* (Kim et al., 2009)

Models	Equations	Parameters	Estimated values
Adult developmental rate model	$r(T) = e^{(a+bT^3)}$	a	-6.747
		b	0.00012
Survival rate model	$s(px) = \frac{1}{1 + e^{((\gamma - px)/\delta)}}$	γ	0.96
		δ	-0.33
		m	453.8
Temperature-dependent total fecundity model	$f(T) = me^{[1 + ((n - T)/k) - e^{((n - T)/k)}]}$	n	25.94
		k	-6.06
		α	0.62
Cumulative oviposition model	$C(px) = 1 - e^{-(px/\alpha)^\beta}$	β	1.0

측된 프로그램을 구동할 경우 Weibull 함수의 파라미터 β 값이 소숫점 이하의 값을 가지거나 짝수 정수 값을 가질 경우 오류가 발생 함). 또한 성충 발육율 함수는 Kim et al. (2009)의 논문에 보고된 자료를 이용해서는 프로그램을 구축할 수 없어, 상기 논문에 제시된 온도에 따른 성충 수명의 역수를 사용해 별도의 함수를 선발하였다. 사용된 함수는 윈도우용 TableCurve 2D (SYSTAT, 2002) 함수 라이브러리에서 제공하는 28번 함수 $r(T) = e^{(a+bT^3)}$ 를 사용하였다. $r(T)$ 는 성충발육율이며, T 는 온도(°C) 그리고 a , b 는 추정된 매개 변수이다. 성충발육율 함수 매개변수 추정을 위해서는 윈도우용 TableCurve 2D (SYSTAT, 2002)의 사용자 정의 비선형 모형 분석 모듈을 사용하였다.

개체군 밀도 변동 예측 모델 구축

톱다리개미허리노린재 개체군의 밀도 변동 예측 모델 구축에 사용된 소프트웨어는 호주 CSIRO에서 개발하여 상용화된 DYMEX (version 3.0) Builder (Maywald et al., 2007b)를 사용하였다. 동일연령 기반의 톱다리개미허리노린재 밀도 변동 예측 모델은 성충 및 약충에 대한 살충제 작용 효과 반영 모듈 등 총 10개의 모듈을 사용하였으며, Lifecycle 모듈은 알, 1, 2, 3, 4, 5령, 성충의 7개 발육 단계로 구성하였다(Table 3, Fig. 1). 각 모듈들에 사용된 입력 변수나 계산과정은 작게는 한 개부터 많게는 다섯 개까지 사용하였으며 출력변수도 모듈에 따라 한 개부터 네 개까지 지정하였다(Table 3). Daily Temperature cycle은 일 최고, 최저 온도를 이용하여 composite (sine + sine) 설정으로 계산하였으며, 알 및 약충의 영기별 사망률은 각각 20, 13.3, 5.7, 8.0, 16.0, 7.0%로(Park et al., unpublished observation), 성충의 성비는 0.5로 가정하였고 사망률은 전 단계에서 발육이 완료되어 다음 발육단계로 넘어오는 개체 수에 적용되도록 설정하였다.

개체군 밀도 변동 예측 모델 평가 자료의 수집

구축된 모델의 평가를 위해서 2010년부터 2012년까지 3년간 충청남도 예산군 신암면에서 3월 하순부터 11월 상순까지 집합 페로몬 트랩을 이용하여 톱다리개미허리노린재 성충 포획 밀도를 조사하였다. 집합페로몬 트랩은 충청남도농업기술원내 콩 포장과 인접한 경사면에 설치하였으며 집합페로몬 트랩 미끼는 상용 페로몬 루어((E)-2-hexenyl (Z)-3-hexenoate (E2HZ3H), (E)-2-hexenyl (E)-2-hexenoate (E2HE2H), Tetradecyl isobutyrate (TI), Octadecyl isobutyrate (OI)를 각각 5.5, 27.6, 38.7, 14.3% 비율로 섞어 상업용으로 판매하는 [(주) 그린아그로텍] 제품을 사용하였다. 상용 루어를 넣은 원통형 통발트랩(직경 14 cm 길이 28 cm)을 플라스틱 지주대(직경 12 mm, 높이 1.5 m)를 사용하여 지상으로부터 1~1.2 m 높이에 설치하였다. 트랩은 15 m 간격으로 3개 설치하였으며 미끼는 4주 간격으로 교체하였고, 포획 밀도 조사는 6~8일 간격으로 매주 실시하였다. 모델 평가에 사용된 온도자료는 충청남도농업기술원에서 설치 운영하고 있는 충청남도 예산군 신암면 소재 자동기상관측장비(AWS)의 기상 자료를 사용하였다.

개체군 밀도 변동 예측 모델 평가

구축된 톱다리개미허리노린재 개체군 밀도 변동 예측 모델의 시뮬레이션을 위해 호주 CSIRO에서 개발하여 상용화된 DYMEX (version 3.0) Simulator (Maywald et al., 2007a)를 사용하였다. 시뮬레이션은 월동성충 포획 시점을 시작으로 매년 11월 중순까지 수행하였다. 월동세대는 2010년의 경우 4월 16일부터 5월 28까지, 2011년은 4월 6일부터 5월 25일까지 그리고 2012년의 경우 4월 5일부터 5월 31일까지 포획된 성충을 월동 세대로 간주하였다. 각 시뮬레이션 시작 시 초기 밀도 입력은 월동 세대로 간주된 전 시기, 각 조사일들의 포획밀도 10%

Table 3. DYMEX modules for constructing population dynamics model of *Riptortus pedestris*

Name	Module	Stage	Input variable (or process in Lifecycle module)	Output variable
Time	Timer	All	Not used	Days since start Day of year Simulation date Time of day
Latitude	QueryUser	All	Direct (35.12.12)	Latitude of City
Daylength1	Daylength	All	Latitude of City Day of year Simulation Date	Day length of City
Daily input temperature (T)	DataFile	All	Simulation Date	Daily minimum temperature (T) Daily maximum temperature (T)
Daily input temperature (T-1)	DataFile	All	Simulation Date	Daily minimum temperature (T-1) Daily maximum temperature (T-1)
Daily temperature cycle (T)	Circadian	All	Daily minimum temperature (T) Daily maximum temperature (T) Day Length of City	Daily average temperature (T)
Daily temperature cycle (T-1)	Circadian	All	Daily minimum temperature (T-1) Daily maximum temperature (T-1) Day Length of City	Daily average temperature (T-1)
Lifecycle	Lifecycle	Egg to 5th Nymph	Development (affect physiological age) Mortality (affect number) Transfer (affects stage transition to next stage)	Total number of egg, each nymph Graduates to next nymph, adult
		Adult	Sex ratio Mortality (1-Survival rate) Development (T) Development (T-1) Fecundity Progeny Production	Total number of adult Total graduates (dead) Progeny Production
Pesticide spray effect (Nymph)	Event	Nymph	Day of year Simulation date	Nymphal mortality by pesticide Event Flag 1
Pesticide spray effect (Adult)	Event	Adult	Day of year Simulation date	Adult mortality by pesticide Event Flag 1

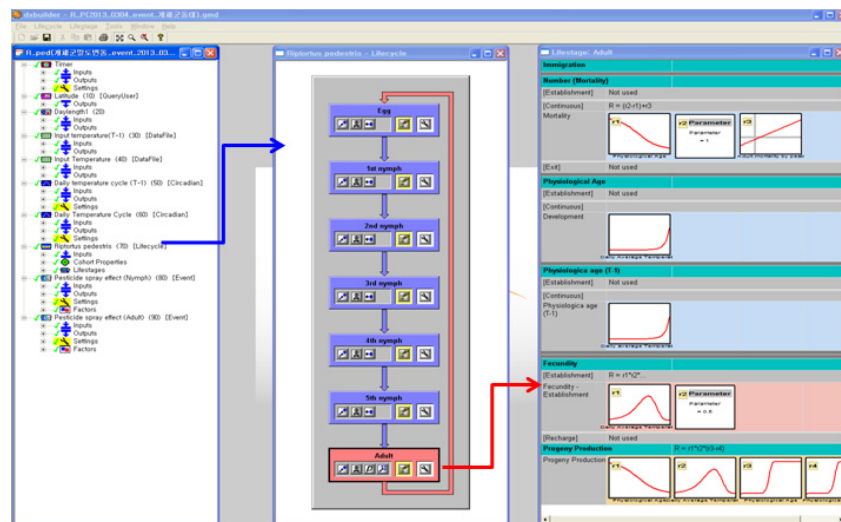


Fig. 1. Component (A), Lifecycle module (B) and Lifestage (C) windows of DYMEX Builder.

를 여러 번 추가하는 다중 투입(multi injection) 방법을 사용하였으며, 살충제 사용을 가정한 시뮬레이션에서는 초기 성충 입력 밀도를 포획 밀도의 20%로 높여 사용하였다. 살충제 처리에 의한 사망률의 적용은 성충의 경우 약제 살포일(첫번째 신성충 개체군 대상: 7월 1, 5, 10, 15일, 두 번째 신성충 개체군 대상: 8월 20, 25, 30, 25+30일)로부터 연속 3일간 매일 생존 성충수의 50%가 사망하도록 설정하였고, 약충의 경우에는 약제 살포일로부터 연속 5일간 사망률이 작용하도록 설정하였는데 1~3명은 매일 생존 개체수의 90%를, 4~5명은 70%가 사망하도록 임의로 설정하였다.

결과

성충 발육율 함수

선발된 톱다리개미허리노린재 성충의 발육율 함수는 온도가 증가함에 따라 성충 발육율의 변화를 유의하게 보여주고 있다($r_{adj}=0.94$, $F_{1,4} = 106.58$, $P<0.001$). 17.5도부터 31도까지는 온도가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 이후에는 급격히 빨라지고 있으며 선발된 함수의 파라미터 a는 -6.747, b는 0.00012로 각각 추정되었다(Table 2, Fig. 2).

개체군 밀도 변동 예측 모델 평가

충청남도 예산 지역에서 집합페로몬 트랩을 이용하여 3년간 톱다리개미허리노린재의 시기별 포획 밀도 변동을 조사한 결과 2010년은 4회(5월 20일, 7월 8일, 8월 20일, 10월 15일), 2011년은 4회(5월 11일, 6월 29일, 8월 24일, 10월 12~26일),

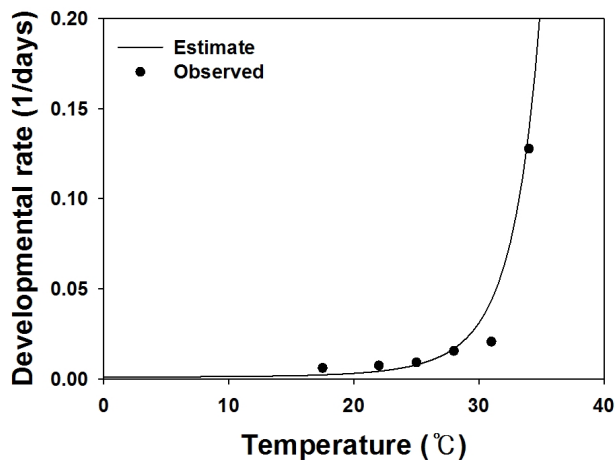


Fig. 2. Adult development model for temperature-dependent rates of *Riptortus pedestris*. $r(T) = e^{(a+bT^3)}$, $F_{1,4} = 106.58$, $P<0.001$.

2012년은 5회(5월 3일, 6월 21일 8월 2~16일, 9월 6일, 10월 10~25일)의 성충 포획 최성기가 관찰되었다(Table 4, Fig. 3). 개발된 모델을 이용하여 월동성충의 포획시기를 시작점으로 시뮬레이션 한 결과 2010년은 3회(7월 17일, 8월 22일, 9월 28일), 2011년은 4회(7월 15일, 8월 23일, 9월 19~29일, 11월 11

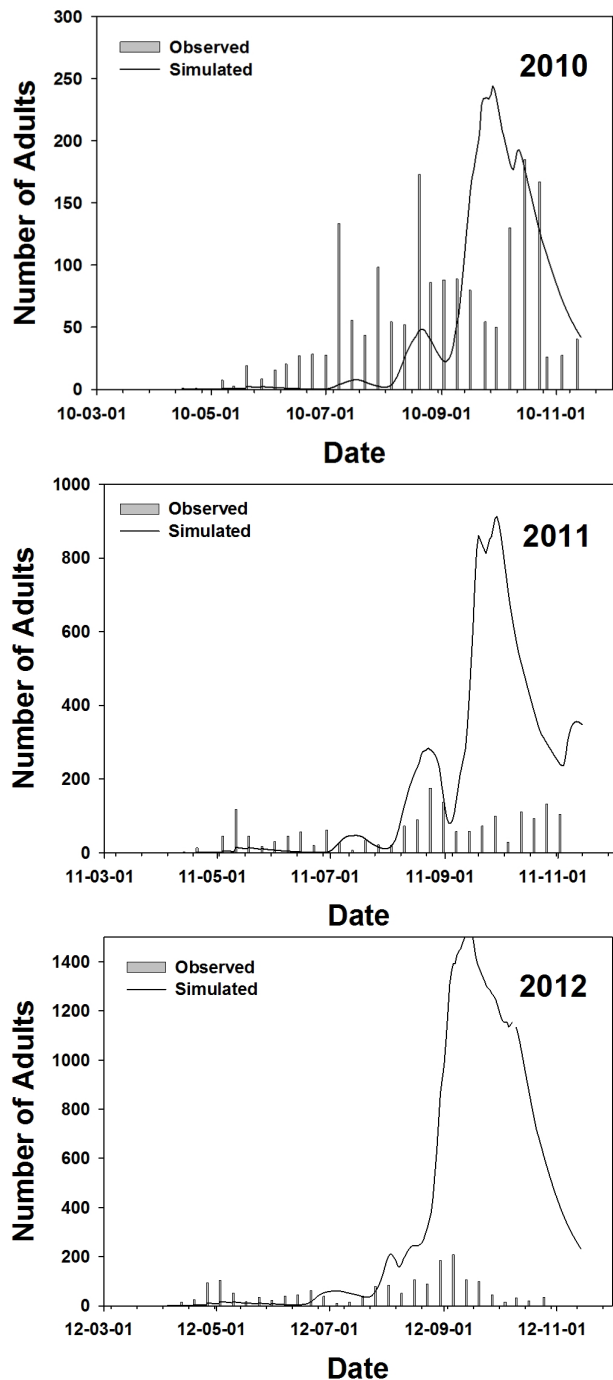


Fig. 3. Pheromone trap catch data and simulated seasonal occurrence of adult *Riptortus pedestris*.

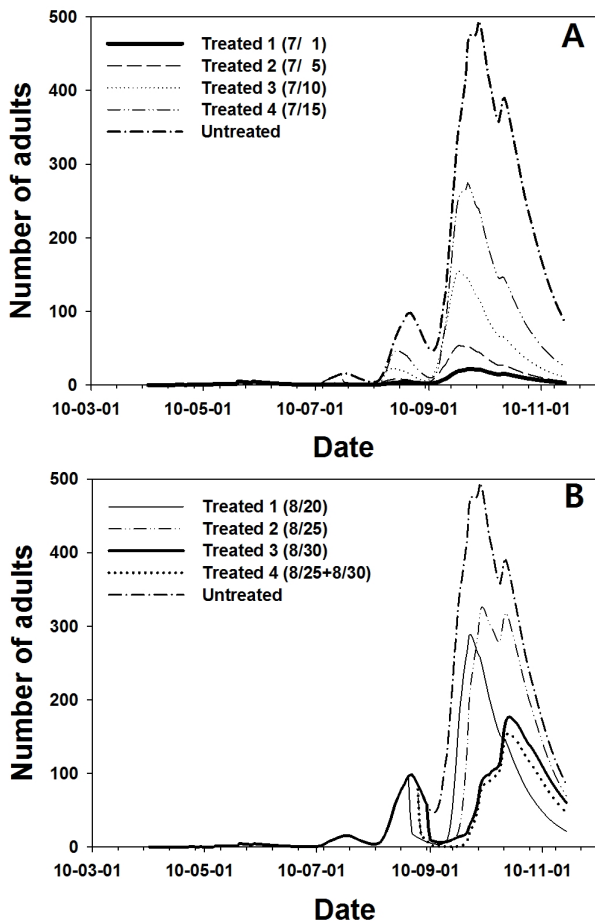


Fig. 4. Pheromone trap catch data and comparison of simulated results of pesticide treatment (A: on the first peak, B: on the second peak) effect for the adult population density of *Riptortus pedestris*.

일), 2012년은 4회(7월 5일, 8월 3~17일, 9월 6~15일, 10월 8일) 성충 밀도 피크 발생을 보여, 일년에 3~4번의 신 성충 발생이 가능함을 보였다(Table 4, Fig. 3). 시뮬레이션 결과 발생 최성기 횡수에 있어서는 집합페로몬 트랩 조사 결과와 유사하였으나 발생 최성일 및 밀도는 다소 차이가 있었다. 살충제 처리시기가 다음 세대 밀도 변동에 미치는 영향을 시뮬레이션 한 결과 첫 번째 신성충을 대상으로 한 경우 성충 발생 초기일수록 밀도 억제 효과가 컸다. 즉 7월 1일에 살충제를 처리하였을 경우 7월 15일에 처리한 경우의 10%, 무처리의 3% 정도로 현저하게 낮은 두 번째 신성충 밀도가 형성되었다(Fig. 4A). 그러나 두 번째 신성충을 대상으로 한 경우 위의 결과와는 다소 달랐다. 즉 성충 발생 최성기가 아닌 최성기에서 10일 가량 뒤인 8월 30일에 살충제를 처리한 경우 다음세대 최고 성충 밀도가 8월 20일에 처리한 경우의 50%, 무처리 25% 정도 밖에는 되지 않았으며, 최고 밀도를 보인 시기도 무처리에 비해 2주 이상 늦게 형성되었다(Fig. 4B).

고찰

우리나라에서 톱다리개미허리노린재의 발생 세대수와 각 세대의 발생 최성기 예측정보를 알아내는 것은 콩 재배 포장에서 이들의 밀도를 관리하기 위한 가장 중요한 요소일 것이다. 지금까지 많은 연구자들이 집합페로몬 트랩 포획 정보와 난소 발육 정보 등을 통하여 발생 세대수를 추정한 결과들을 보고하였으나(Natsuhara, 1985; Kono, 1989b; Huh et al., 2005; Tabuchi et al., 2005; Endo et al., 2011; Shin et al., 2012) 온도에 따른 발육 및 산란에 관한 수리적 모델을 기반으로 세대수 및 밀도 변동을 예측한 자료를 보고한 예는 없었다. 지금까지 갈색거저리(Koo et al., 2013) 등 다양한 해충을 대상으로 온도에 따른 발육 및 산란에 관한 모델들이 십여편 이상 한국응용곤충학회지에 게재 되었으나 발육과 산란을 결합하여 여러 세대에 걸쳐 연속적인 밀도 변동을 예측한 모델은 아메리카잎굴파리(Park et al., 2012)를 대상으로 한 경우 이외에는 찾아보기 어려웠다. 본 논문에서는 상기 논문과는 다소 다르게 노지 해충을 대상으로 7개월 이상의 장기적인 밀도 변동을 예측하였다는 점과 구체적인 DYMEX 프로그램 구축 모듈 정보 등을 제시하였다는 점에서 보다 진전된 결과를 보여주고 있다 하겠다.

톱다리개미허리노린재는 지역에 따라 다소 차이가 있으나 일반적으로 전년도 마지막 성충 세대가 월동한 후 이듬해 3월 하순경부터 활동을 시작한 후 7월 상순경에 첫 번째 신성충이 발생하는데(Huh et al., 2005), 두과 식물의 야생기주를 먹이로 1~2세대를 경과한 후 가을에 콩 포장으로 침입해 들어오는 전형적인 서식처 이동 해충이다(Mizutani et al., 2011). 본 연구에서는 충청남도 예산 지역에서 집합페로몬 트랩을 이용하여 3년간 톱다리개미허리노린재의 시기별 포획 밀도 변동을 조사한 결과 2010년과 2011년은 4회 2012년은 5회의 성충 포획 밀도 최성기가 관찰되었다(Fig. 3). 2010년과 2011년의 경우 첫 번째 성충 포획밀도 피크는 Julian date 131일부터 140일까지(5월 중순부터 5월 하순까지) 포획되는 개체들로 이들은 월동을 마치고 생존한 월동 성충으로 추정된다. 두 번째 성충 포획 밀도 피크는 Julian date 190일(7월 상순) 부근으로 이는 주로 월동 성충이 산란하여 발육된 첫 번째 신성충이 대부분을 차지하였을 것으로 추론된다. 세 번째 성충 포획밀도 피크는 Julian date 230~240(8월 하순부터 9월 상순까지)일 부근으로 이는 두 번째 신성충, 네 번째 성충 포획밀도 피크는 Julian date 288일(10월 하순이후) 이후로 이는 세 번째 신성충의 집중적인 포획으로 인하여 발생한 피크로 추정할 수 있었다. 이상의 결과들은 여러 연구자들의 결과와 부분적으로 일치하며, Huh et al. (2005)이 추정한 결과와 상당히 유사하였다. 다만 경상남도 진주지역

은 충청남도 예산지역보다 지리적으로 남쪽에 위치해 있어 모든 성충 피크에서 본 연구 보다는 1주일 정도 일찍 포획 밀도 최성기가 형성된 것으로 판단된다. 한편 2012년의 결과는 이전의 2년과는 다소 다른 발생 패턴을 보여주고 있는데, 월동세대의 최초 포획 밀도 최성기가 5월 3일(4월 26일부터 포획 밀도가 급격히 증가함)로 2011년 보다는 일주일 이상, 2010년 보다는 17일 이상 빨랐다. 이 후 세 번의 포획 최성기들도 앞선 연도들에 비하여 작게는 1주 많게는 3주 이상 빠르게 형성된 것을 볼 수 있었고 결과적으로 이전 연도와는 다르게 다섯 번의 성충 포획 최성기가 관찰되어 해에 따라 네 번의 신 성충이 발생할 가능성을 보여주고 있다(Fig. 3).

수리 모델을 이용한 톱다리개미허리노린재의 연중 발생 밀도 변동을 예측하기 위하여 상용 소프트웨어인 DYMEX를 이용하여 개체군 밀도 변동 모델을 구축한 후 연중 밀도 변동 양상을 예측하였다. 월동성충의 포획시기를 이용하여 연간 발생 양상을 시뮬레이션 한 결과 2010년은 3회(7월 17일, 8월 22일, 9월 28일), 2011년은 4회(7월 15일, 8월 23일, 9월 19~29일, 11월 11일), 2012년은 4회(7월 5일, 8월 3~17일, 9월 6~15일, 10월 8일) 성충 밀도 피크 시기가 있어 일장에 따른 생식휴면을 고려하지 않는 경우 연 3~4회의 신 성충 발생이 가능하였다(Fig. 3). 시뮬레이션 결과 성충 발생 최성기의 횟수는 집합페로몬 트랩 조사 결과와 유사하였으나 성충 발생 밀도 최성기 및 밀도는 다소 차이가 있었다. 즉 첫 번째 신 성충의 포획 최성기는 발생 밀도 최성일 예측치보다 9일(2010년)에서 16일(2011년) 빠르게 관측되었고, 월동처로 이동하는 마지막 세대의 포획 최성기는 17일(2010, 2012년)에서 23일(2011년) 느리게 관측되었다. 반면 두 번째 신성충의 포획 최성기는 예측된 발생 밀도 최성일과 비교한 결과 3년 모두에서 1~2일 차이로 크게 다르지 않았다(Table 4, Fig. 3). 이러한 결과는 우리나라에서 콩 포장으로 침입해 들어오는 주 개체군이 8월 하순경부터 시작되는 두 번째 신성충인 것을 감안할 때 본 모델을 이용한 예측 결과를 해충 방제 전략 수립에 응용 수 있다는 점에서 의미가 크다 하겠다. 한편 페로몬 트랩으로 관측된 첫 번째 신 성충 발생 최성기가 예측된 발생 최성일 보다 평균 2주 정도 빨랐던 이유로는 여러 가지가 있을 수 있을 것으로 생각되나, 가장 먼저 생각되는 이유는 모델에서 계산된 각 층태들의 발육율이 온도 효과를 과소평가했기 때문이었을 것이라는 것이다. 본 모델에 사용된 매개변수들은 항온 조건에서 조사, 추정된 자료로 최저온도와 최고온도의 차이가 큰 봄에는 특히 변온부위 중 고온 부위를 과소평가할 가능성이 있어 발육율이 실제보다 낮게 추정될 가능성이 있다. 다음으로는 시기에 따른 페로몬 트랩 포획력 차이 때문에 발생한 문제로 생각해 볼 수 있을 것이다. 즉 첫 번째 신성

충 발생 초기에는 주변의 성충 밀도가 낮고 이로 인해 보다 집중적으로 페로몬 트랩에 유인되어 포획밀도가 높았던 반면 첫 번째 신성충 발생 최성기에는 발생될 주변 성충 밀도가 높고 이들에 의한 분산 작용으로 페로몬 트랩에 유인되는 성충의 밀도가 상대적으로 적었던 것이 아닐까라고 추론해 볼 수 있을 것이다. 실제 모델을 이용하여 예측한 첫 번째 신성충의 우화 시작 시기가 2010년은 6월 29일, 2011년은 6월 26일, 2012년은 6월 13일이었으며 이는 페로몬 트랩으로 조사된 성충 발생 최성기로부터 3일에서 9일 정도 빨랐으며, 페로몬 트랩 포획 최성기 이후에도 1~2주간 비교적 높은 밀도로 성충이 포획되어 이러한 추론을 뒷받침 하고 있다. 이상의 결과를 볼 때 모델을 이용하여 예측된 첫 번째 신성충 발생 최성일과 페로몬 트랩 조사 자료가 정확하게 일치하지는 않았지만, 페로몬 트랩으로 조사된 월동 후 첫 번째 신성충 포획 밀도 최성기(6월 하순~7월 상순)가 주로 새로 우화한 성충 밀도의 증가와 관련이 있다는 해석은 충분히 가능할 것으로 판단된다. 한편 마지막 세대의 경우 예측 최성일(9월 19일~10월 8일)과 포획 최성기(10월 12~10월 25일)의 불일치는 페로몬 트랩에 포획된 최성기가 월동처로 이동하는 시기와 관련되어 있기 때문이었을 것으로 추측된다. 즉 마지막 세대는 산란을 위해 새로운 서식처를 찾아 이동하는 세대가 아니므로 성충으로 발육이 완료(발생 최성일)된 포장에서 월동에 필요한 충분한 영양분을 섭취하는 동안 머물렀을 것이고 페로몬 트랩에 포획된 시기(포획 최성기)는 월동처로 이동하는 시점에서 발생하였을 것이기 때문에 차이가 발생하였을 것으로 판단된다.

톱다리개미허리노린재는 콩의 잎, 줄기, 꼬투리, 종실을 가해하여 피해를 발생시킨다(Ha et al., 1998; Son et al., 2000; Lee et al., 2004). 콩의 경우 착형기(R3~R4)에 가해할 때 수량 감소가 가장 큰데(Kono, 1989a; Boethel et al., 2000; Jung et al., 2005) 이를 막기 위해서는 R4시기부터 연속으로 살충제를 3회 방제하여야만 90% 이상의 방제가를 얻을 수 있다고 보고 되어 있다(Lee et al., 2004). 본 연구에서는 구축된 모델을 이용하여 농경지 주변부에서 증식된 것으로 추측되는 첫 번째 신성충 세대와 콩 포장내로 침입해 들어온 두 번째 신성충 및 그로부터 발생되는 약충을 대상으로 약제 방제를 실시하였을 경우 밀도 경감 효과를 예측하였다. 6월 하순부터 7월 중순경에 새롭게 우화하는 첫 번째 신성충의 경우 정확한 보고 자료는 없으나 주로 농경지와 인접한 산림지역 기슭에서 발육, 우화할 것으로 추정된다. 첫 번째 신성충을 표적으로 한 약제방제는 표적지가 농경지가 아니라는 점, 정확한 방제 지역을 설정하기 어렵다는 점 및 비 표적 생물들에 대한 환경적인 영향을 파악하기 어렵다는 점 등 때문에 현실적으로 농가에서 직접 사용하기에는 쉽지

않아 보인다. 그러나 첫 번째 신성충 개체군은 비교적 밀도가 낮고, 두과 작물의 종실이 있어야 발육이 완성되는 톱다리개미허리노린재의 특성상(Kim et al., 2014) 특정 지역에 집중적으로 분포할 가능성도 있어 이 세대를 대상으로 한 살충제 사용 효과가 다음 세대들의 밀도를 억제하는데 효율적일 수도 있을 것으로 추론된다. 따라서 첫 번째 신성충을 대상으로 한 살충제 사용이 당장은 광범위한 지역에서 보편적으로 적용하기는 어렵더라도 직접 농경지에 살충제 살포가 불가능한 친환경 재배 지역 및 고립된 지역 등과 같은 곳에서는 콩 포장으로 침입하는 주변 개체군 밀도를 낮추는 효율적인 수단으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 개발된 모델을 이용한 시뮬레이션 결과 첫 번째 신성충 발생 초기일수록 살충제 처리 밀도 억제효과도 커졌다. 즉 7월 1일에 살충제를 처리하였을 경우 7월 15일에 처리한 경우의 10%, 무처리의 3% 정도로 현저하게 낮은 두 번째 성충 밀도 형성을 볼 수 있었다(Fig. 4A). 이러한 결과는 추후 친환경 재배 지역이나, 고립된 지역을 대상으로 새로운 해충관리 전략을 수립할 경우 의미 있는 정보가 될 수 있을 것으로 판단된다. 다음으로는 8월 하순부터 직접 포장으로 침입하여 산란, 발육하게 되는 두 번째 신성충 개체군에 대한 살충제 사용 시기에 따른 밀도 억제 효과를 추정하였다. 시뮬레이션 결과 첫 번째 신성충을 대상으로 한 경우와는 달리 두 번째 신성충을 대상으로 한 경우 성충 밀도 최성기에서 10일 이후에 살충제를 처리하였을 경우 높은 밀도 억제 효과를 볼 수 있었다. 즉 8월 30일에 살충제를 처리한 경우 다음세대의 최고 성충 밀도가 8월 20일에 처리한 경우의 50%, 무처리의 25% 정도로 줄었으며, 이러한 결과를 보인 주요 원인은 살충제 처리에 의한 약충들의 높은 사망률에 기인하고 있었다. 또한 8월 30일에 살충제를 처리하였을 경우 최고 밀도를 보인 시기도 무처리에 비해 2주 이상 늦어 노령 약충과 성충들에 의한 수량 감소를 피할 수 있을 것으로 판단되었다(Fig. 4B).

이상의 연구 결과들을 고려할 때 페로몬 트랩을 이용하여 톱다리개미허리노린재 월동 세대의 포획 밀도 변화를 조사한다면 다음 세대들의 발생 최성기 및 밀도를 추정할 수 있고, 콩 포장으로 침입해 들어오는 시기 및 상대 밀도 또한 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 살충제 사용 시기에 대한 밀도 억제 효과와 피해와의 관계가 추가로 연구된다면 본 모델을 이용한 약제 방제 시기의 결정이나, 포장에서 톱다리개미허리노린재 개체군 밀도 최성기를 회피하기 위한 파종 시기의 변경과 같은 경종적 방법을 사용한 피해 경감 전략 수립에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 시험연구사업 “분자생물학적 기법을 이용한 해충관리 기술 개발”(과제번호: PJ008946호)의 지원에 의하여 연구가 수행되었습니다.

Literature Cited

- Boethel, D.J., Russin, J.S., Wier, A.T., Layton, M.B., Mink, J.S., Boyd, M.L., 2000. Delayed maturity associated with southern green stink bug (Heteroptera: Pentatomidae) injury at various soybean phenological stages. *J. Econ. Entomol.* 93, 707-712.
- Endo, N., Wada, T., Sasaki, R., 2011. Seasonal synchrony between pheromone trap catches of the bean bug, *Riptortus pedestris* (Heteroptera: Alydidae) and the timing of invasion of soybean fields. *Appl. Entomol. Zool.* 46, 477-482.
- Ha, K.S., Heo, N.K., Kim, J.R., Song, S.H., 1998. Effect of different seeding times and soybean varieties on damages and occurrence of hemiptera insects. *RDA. J. Crop. Prot.* 40, 32-36.
- Huh, H.S., Huh, W., Bae, S.D., Park, C.G., 2005. Seasonal occurrence and ovarian development of bean bug *Riptortus clavatus*. *Korean J. Appl. Entomol.* 44, 199-205.
- Jung, J.K., Youn, J.T., Im, D.J., Park, J.H., Kim, U.H., 2005. Soybean seed injury by the bean bug, *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Hemiptera: Alydidae) at reproductive stage of soybean (*Glycine max* Linnaeus). *Korean J. Appl. Entomol.* 44, 299-306.
- Kikuhara, Y., 2005. The Japanese species of the genus *Riptortus* (Heteroptera, Alydidae) with description of a new species. *Jpn. J. Syst. Ent.* 11, 299-311.
- Kim, E. Park, C.G., Lim, U.T., 2014. Evaluation of three plant seeds as potential pre-season diets for *Riptortus pedestris*. *J. Asia Pac. Entomol.* 17, 521-524.
- Kim, H., Baek, S., Kim, S., Lee, S.Y., Lee, J.H., 2009. Temperature-dependent development and oviposition models of *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Hemiptera: Alydidae). *Applied Entomology and Zoology.* 44, 515-523.
- Kono, S., 1989a. Analysis of soybean seed injuries caused by three species of stink bug. *Jpn. J. Appl. Ent. Zool.* 33, 128-133.
- Kono, S., 1989b. Number of annual generations of the bean bug, *Riptortus clavatus* Thunberg (Heteroptera: Alydidae) estimated by physiological characteristic. *Jpn. J. Appl. Ent. Zool.* 33, 198-203.
- Koo, H.Y., Kim, S.G., Oh, H.K., Kim, J.E., Choi, D.S., Kim, D.I., Kim, I., 2013. Temperature-dependent development model of larvae of mealworm beetle, *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *Korean J. Appl. Entomol.* 52, 387-394.
- Lee, G.H., Paik, C.H., Choi, M.Y., Oh, Y.J., Kim, D.H., Na, S.Y., 2004. Seasonal occurrence, soybean damages and control efficacy of bean bug, *Riptortus clavatus* Thunberg (Hemiptera: Alydidae) at

- soybean field in Honam province. Korean J. Appl. Entomol. 43, 249-255.
- Lee, S.G., Yoo, J.K., Hwang, C.Y., Choi, B.R., Lee, J.O., 1997. Effect of temperature on the development of the bean bug, *Riptortus clavatus* Thunberg (Hemiptera: Alydidae). RDA J. Crop. Protec. 39, 25-27.
- Maharjan, R., Jung, C., 2009. Flight behavior of the bean bug, *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Hemiptera: Alydidae), relative to adult age, sex and season. J. Asia Pac. Entomol. 12, 145-150.
- Maywald, G.F., Bottomley, W., Sutherst, R.W., 2007a. DYMEX Model simulator, version3 user's guide. Hearne Scientific Software Pty Ltd, Melbourne 3000, Australia.
- Maywald, G.F., Kriticos, D.J., Sutherst, R.W., Bottomley, W., 2007b. DYMEX Model builder, version3 user's guide. Hearne Scientific Software Pty Ltd, Melbourne 3000, Australia.
- Mizutani, N., Moriya, S., Yamaguchi, T., Ito, K., Tabuchi, K., Tsunoda, T., Iwai, H., 2011. Seasonal abundance of the bean bug, *Riptortus pedestris* (Heteroptera: Alydidae) in some leguminous plants. Jpn. J. Appl. Entomol. Zool. 55, 163-170.
- Moriya, S., 2005. Searching for overwintering sites of *Riptortus clavatus* (Thunberg) and *Piezodorus hybneri* (Gmelin) by re-analyzing litter samples originally collected at coppice forest floors for other kinds of stink bugs to estimate their overwintering densities. Ann. Rept. Kanto-Tosan Pl. Prot. Soc. 52, 73-76.
- Natsuhara, Y., 1985. Migration and oviposition in the bean bug *Riptortus clavatus* Thunberg (Heteroptera). Plant Prot. 39, 153-156. (in Japanese)
- Park, J.J., Mo, H.H., Lee, D.H., Shin K.I., Cho, K., 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.
- Shin, Y.H., Yun, S.H., Park, Y.U., An, J.J., Yoon, C.M., Youn, Y.N., Kim, G.H., 2012. Seasonal fluctuation of *Riptortus pedestris* (Hemiptera: Alydidae) in Chungbuk province. Korean. J. Appl. Entomol. 51, 99-109.
- Son, C.K., Park, S.G., Hwang, Y.H., Choi, B.S., 2000. Field occurrence of stink bug and its damage in soybean. Korean J. Crop Sci. 45, 405-410.
- SYSTAT software inc., 2002. TableCurve 2D Automated curve fitting analysis: version 5.01. Systat software. inc. San Jose, CA.
- Tabuchi, K., Ito, K., 2004. Preference of overwintering site of the bean bug, *Riptortus clavatus* (Thunberg). Ann. Rept. Kanto-Tosan Pl. Prot. Soc. 51, 115-118.
- Tabuchi, K., Moriya, S., Mizutani, N., 2005. Seasonal catches of the bean bug, *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Heteroptera: Alydidae), in water-pan traps with synthetic attractants. Jpn. J. Appl. Entomol. Zool. 49, 99-104.