한국응용곤충학회지
Korean J. Appl. Entomol. 58(4): 347-354 (2019)
DOI: https://doi.org/10.5656/KSAE.2019.10.0.041

ⓒ The Korean Society of Applied Entomology
pISSN 1225-0171, eISSN 2287-545X

벼에서 애멸구(*Laodelphax striatellus* Fallén) 개체군 밀도 변동 예측 모델 구축

권덕호 · 정인홍[2] · 서보윤[2] · 김혜경[1] · 박창규[1]*
한국농수산대학 채소학과, [1]한국농수산대학 산업곤충학과, [2]국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과

Modelling The Population Dynamics of *Laodelphax striatellus* Fallén on Rice

Deok Ho Kwon, In-Hong Jeong[2], Bo Yoon Seo[2], Hey-Kyung Kim[1] and Chang-Gyu Park[1]*
Department of Vegetable Crops, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea
[1]Department of Industrial Entomology, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea
[2]Crop protection Division, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

ABSTRACT: Temperature-dependent traits of *Laodelphax striatellus*, rice stripe virus vector, were investigated at 10 constant temperatures (12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0, 27.5, 30.0, 32.5, and 35.0 ± 1℃) under a fixed photoperiod (14/10-hr light/dark cycle). Unit functions for the oviposition model were estimated and implemented into a population dynamics model using DYMEX. The longevity of *L. striatellus* adults decreased with increasing temperature (56.0 days at 15.0℃ and 17.7 days at 35.0℃). The highest total fecundity (515.9 eggs/female) was observed at 22.5℃, while the lowest (18.6 eggs/female) was observed at 35.0℃. Adult developmental rates, temperature-dependent fecundity, age-specific mortality rates, and age-specific cumulative oviposition rates were estimated. All unit equations described adult performances of *L. striatellus* accurately (r^2=0.94~0.97). After inoculating adults, the constructed model was tested under pot and field conditions using the rice-plant hopper system. The model output and observed data were similar up to 30 days after inoculation; however, there were large discrepancies between observed and estimated population density after 30 days, especially for 1st and 2nd instar nymph densities. Model estimates were one or two nymphal stages faster than was observed. Further refinement of the model created in this study could provide realistic forecasting of this important rice pest.

Key words: *Laodelphax striatellus*, Rice, Temperature, Population dynamics model, Simulation

초 록: 벼에 줄무늬잎마름병을 유발하는 애멸구(*Laodelphax striatellus*)의 온도에 따른 산란 등 성충 활동 특성을 12.5~35.0℃ 10개 항온조건 광주기 14L:10D에서 조사하였다. 산란모델을 만들기 위한 단위 함수를 개발하고 DYMEX를 이용하여 개체군 밀도 변동 모델을 구축하였다. 성충 수명은 15.0℃에서 56.0일로 가장 길었고, 35.0℃에서 17.7일로 가장 짧았으며 온도가 올라감에 따라 수명도 짧아지는 경향을 보였다. 암컷 한 마리당 총산란수는 22.5℃에서 515.9개로 가장 많았으며, 35℃에서 18.6개로 가장 적었다. 산란 모델 개발을 위해 성충발육율, 총산란수, 성충사망율 및 누적산란율 단위모델을 추정한 결과, 단위모델 모두에서 높은 수준의 모델 적합성을 보였다(r^2=0.94~0.97). 개체군 밀도 변동 모델은 포트와 포장 실험을 통하여 예측 정확도를 평가하였다. 포트 및 포장 실험 결과 접종 후 30일까지는 각 조사 시점에서 밀도 및 영기 분포 비율의 예측 정확도가 비교적 높았으나 이후에는 1, 2령의 조사 밀도와 예측 밀도 간에 큰 차이가 발생하였고, 영기 분포 변화의 경우도 모델에서 실제 조사 자료보다 1~2단계의 발육 영기가 빠르게 추정되는 경향을 보였다.

검색어: 애멸구, 벼, 온도, 개체군 밀도변동 모델, 시뮬레이션

애멸구(*Laodelphax striatellus* Fallén)는 우리나라, 일본, 중국, 대만 등지에 분포하며 벼, 보리, 조, 옥수수 등의 화본과 작물을 흡즙하는 해충으로 벼 줄무늬잎마름병(Rice stripe virus, RSV)의 매개충으로 잘 알려져 있다(Chung, 1974). 우리나라에서 애멸구는 주로 4령 약충의 형태로 논둑이나 휴반에서 월동한 후 성충이 되어 1세대를 맥류에서 증식한 후 벼로 이동하여 3-4세대를 경과 한다 (Hyun et al., 1977). 애멸구에 의한 피해는 흡

***Corresponding author:** changgpark@korea.kr
Received September 26 2019; **Revised** October 29 2019
Accepted November 22 2019

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

즙에 의한 생육저해나 고사 등과 같은 직접 피해보다는 줄무늬잎마름병 매개로 인한 간접 피해가 벼의 생육과 생산에 영향을 미친다(Chung, 1974; Hibino, 1996). 벼 줄무늬잎마름병의 경우 과거 영남지방 및 남해안을 중심으로 피해가 발생하였던 양상과는 달리 2000년 이후에는 주로 서해안을 중심으로 대발생하였다(Lee et al., 2012; Park et al., 2009). 이러한 지역별 발생양상 변화 이유 중 하나로 벼의 생육 초기에 중국으로부터 우리나라 서해안으로 비래하는 다량의 애멸구 개체군에 의한 영향이 주목되고 있다. Otuka et al. (2012)에 의한 동아시아의 애멸구 비래 연구 결과에 의하면 애멸구는 5월 하순부터 6월 상순사이에 기류를 타고 중국 남동부에서 우리나라 서남해안으로 이동한다고 보고한 바 있다. 다만 비래 애멸구의 양과 바이러스 보독충율 등이 벼 줄무늬잎마름병 발병에 미치는 직접적이고, 구체적인 연구 결과가 없어 상관관계를 단정하기는 어려운 것이 현실이나, 유묘기일수록, 애멸구의 서식밀도와 발생량이 많을수록 바이러스병의 발병율이 높다는 결과(Bae and Kim, 1994)는 비래 애멸구 성충과 그로부터 발생한 약충의 높은 밀도가 벼 줄무늬잎마름병 발생과 관련이 있을 것이라는 추론을 가능케 한다. 따라서 비래 후 애멸구 성충의 산란 및 개체군 밀도의 경시적 변화 예측은 대량 비래 시 벼 줄무늬잎마름병 발병 억제를 위한 예방적 또는 발생 초기 밀도 억제를 위한 방제의사 결정 등에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 벼에서 애멸구 산란 및 밀도 변동 모델을 구축, 평가하기 위해 첫째, 다양한 항온 조건에서 애멸구의 총 산란수, 성충 수명 등의 산란 특성을 조사하였고 둘째, 산란 모델 구축에 필요한 성충 발육율, 총 산란수, 산란 완료율, 사망률 함수들의 매개변수들을 추정하였으며, 셋째, 동일 연령집단 기반의 개체군 밀도 변동 모델을 상용프로그램인 DYMEX(Mayward et al., 2007a)를 이용하여 구축하고 개발된 모델의 예측 정확성을 포트 및 포장에서 평가하였으며 이에 그 결과를 보고하고자 한다.

재료 및 방법

온도별 성충 수명, 산란 실험 및 자료 분석

실험 곤충의 사육

국립농업과학원 작물보호과 해충 사육실(25 ± 2℃, 40~60% RH, L:D=12:12)에서 2-3엽기 추청벼 유묘를 사각 스테인레스 용기(가로 35 cm, 세로 31 cm, 높이 5.5 cm)에 넣어 먹이로 제공하면서 아크릴 사육 상자(가로 30 cm, 세로 25.5 cm, 높이 20.5 cm)를 씌워 누대 사육하였다.

온도별 산란 실험

일별 산란수 조사를 위한 실험 성충은 누대 사육하던 약충 개체군을 매일 조사하여 우화한지 24시간을 경과하지 않은 개체들을 채집하여 사용하였다. 우화한 성충 암, 수 1쌍을 Agar로 고정한 유묘 2본이 들어있는 바이엘(직경 2.5 cm, 높이 5.5 cm)에 접종한 후 다단실 항온기(NK system) 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0, 27.5, 30.0, 32.5, 35.0℃ 10개 항온, 광조건 L:D=14:10에 각각 20쌍을 처리하였다. 매일 유묘를 교체 하였으며, 교체시 성충의 사망 여부를 조사하여 수컷 성충이 사망하였을 경우 새로운 수컷을 보충하였고 암컷 성충이 모두 사망하였을 때 실험을 종료하였다. 교체된 유묘는 사육실(25 ± 3℃)에 별도로 보관하며 매일 부화 알 수를 조사하였다.

산란 자료의 분석

온도별 성충의 수명 및 총산란수의 처리 온도별 차이는 SAS의 PROC GLM (SAS Institute, 2002) 과정을 사용하여 분석하였고, 통계적 차이가 인정된 경우 Tukey's Studentized Range Test(HSD)를 이용하여 평균간 비교 (P = 0.05)를 실시하였다.

산란 모델의 개발

온도에 따른 성충 발육율 함수 및 성충의 생리적 연령

온도(T)와 성충 발육율(r, 1/성충수명)과의 관계는 Tablecurve 5.01 (SYSTAT, 2002)의 비선형 함수 라이브러리로부터 선택된 가장 적합성이 높은 함수를 사용하였다.

$$r(T) = \frac{1}{A + B \times T^{2.5}} \quad (1)$$

위 수식 1에서 A, B는 추정된 매개 변수이며, T는 섭씨온도이다. 성충의 누적 산란완료 함수, 사망률 함수 등을 온도에 독립적인 방식으로 적용시키기 위해서는 독립 변수를 성충의 생리적 연령으로 환산하면 되는데 이를 구하기 위하여 성충의 우화 후 n일째 생리적 연령 (x_n)은 아래의 수식 2와 같이 정의하였다.

$$x_n = \sum_{i=1}^{n} (r(T_i)) \quad (2)$$

여기서 $r(T_i)$는 성충 우화 후 경험하게 되는 해당일의 온도(℃)에서 성충의 하루 발육율을 의미 한다(수식 1로부터 계산).

온도별 총산란수 함수

온도(T)에 따른 총 산란수 함수는 각 온도에서 암컷 성충이 생존기간 동안에 낳은 알의 총수를 의미하며 Tablecurve 5.01 (SYSTAT, 2002)의 비선형 함수 라이브러리로부터 선택된 가장 적합성이 높은 비선형 함수를 사용하였다.

$$f(T) = a + \frac{b}{1+((T-c)/d)^2} \tag{3}$$

수식 3에서 T는 암컷이 경험하는 온도(℃)이며 매개변수 a, b, c, d는 Tablecurve 5.01 (SYSTAT, 2002)를 사용하여 추정하였다.

생리적 연령별 누적 산란율 함수

성충의 생리적 연령 변화에 따른 누적 산란율 변화는 2-parameter Weibull 모델(Wagner et al., 1984) (수식 4)을 사용하였다.

$$P(x_n) = 1 - \exp[-(x_n/\eta)^\beta] \tag{4}$$

위 식에서 $P(x_n)$은 동일한 연령집단이 생리적 연령 x_n까지 산란한 알 수의 총 산란수에 대한 비율이며 η와 β는 Tablecurve 5.01 (SYSTAT, 2002)를 사용하여 추정된 매개변수들이다.

생리적 연령별 사망율 함수

성충의 생리적 연령에 따른 사망율 함수는 성충의 생리적 연령별 누적 산란율 함수와 같은 2-parameter Weibull 모델(Wagner et al., 1984) (수식 5)을 사용하였다.

$$M(x_n) = 1 - \exp[-(x_n/\eta)^\beta] \tag{5}$$

위 식에서 $M(x_n)$은 생리적연령 x_n까지 사망한 성충의 비율이며 η와 β는 Tablecurve 5.01 (SYSTAT, 2002)를 사용하여 추정된 매개변수들이다.

개체군 밀도 변동 모델의 구축 및 평가

온도에 따른 약충 발육 및 발육완료 모델

개체군 밀도 변동 모델 구축에 사용된 성충 전 발육태별 온도에 다른 발육율 함수, 성충전 발육완료 함수의 매개변수들은 Park et al. (2011)이 발표한 논문의 자료 중 Poikilotherm rate 모델의 매개변수와 two-parameter Weibull 모델의 매개변수 중 가까운 홀수 정수를 사용하였다(Table. 1).

Table 1. Parameters of the temperature-dependent developmental model (Poikilothermal rate function) and stage emergence model (2-parameter weibul function) for the immature stages of *Laodelphax striatellus* that were used in the population dynamics model. Values were obtained from Park et al. (2011)

Stages	Parameters							
	Temperature-dependent developmental rate equation[a]						Stage emergence equation[b]	
	RH025	HA	HL	TL	HH	TH	β	η
Egg	0.1516	18300.1	-43252	284.59	37202.9	306.11	13	0.9927
1st nymph	0.9675	29685.4	-4753.9	260.43	32092.6	294.30	5	0.9775
2nd nymph	0.3844	17673.7	-69471	285.35	75461.3	305.44	5	0.9525
3rd nymph	0.8568	-20030	-55253	298.51	273391	308.40	5	0.9577
4th nymph	0.3972	22049.9	-108395	285.63	81218.5	302.29	3	0.9653
5th nymph	0.2445	19811	-138713	286.22	109722	302.15	3	0.9631

[a] $r(T_c) = \dfrac{RH025\frac{T}{298.15} \cdot \exp[\frac{HA}{R}(\frac{1}{298.15}-\frac{1}{T})]}{1+\exp[\frac{HL}{R}(\frac{1}{TL}-\frac{1}{T})]+\exp[\frac{HH}{R}(\frac{1}{TH}-\frac{1}{T})]}$

[b] $F(x) = 1 - \exp[-(x/\eta)^\beta]$

모델의 구축

애멸구 개체군 밀도 변동 모델 프로그래밍 및 평가에 사용된 프로그램은 호주 CSIRO 에서 개발하여 상용화된 DYMEX® (version 3.0) Builder(Maywald et al., 2007a) 와 Simulator (Maywald et al., 2007b)를 사용하였다. DYMEX®는 동일 연령 집단(cohort)을 기반으로 개체군의 발육 및 다음 발육 단계로의 전이 등을 프로그래밍 할 수 있는 상용프로그램으로, 프로그래밍 언어를 모르는 연구자도 라이브러리에 포함되어 있는 모듈들을 이용하여 프로그램을 구축할 수 있다. 애멸구 개체군 밀도 변동 모델 프로그램은 Park et al. (2015)이 보고한 논문의 프로그램에서 살충제 적용 모듈을 제외한 총 8개의 모듈로 구축하였다. Lifecycle모듈은 여섯개의 성충전 발육 단계(알, 1령, 2령, 3령, 4령, 5령)와 하나의 생식 발육 단계(성충)로 구성되게 프로그래밍 하였다. 프로그래밍에 사용된 성충 전 발육태별 온도에 다른 발육율 함수, 성충전 발육완료 함수의 매개변수들은 Park et al. (2011)이 발표한 논문의 자료 중 Poikilotherm rate 모델의 매개변수와 two-parameter Weibull 모델의 매개변수 중 가까운 홀수 정수를 사용하였으며(Table. 1), 성충 산란 모델에 사용된 함수들의 매개변수들은 본 연구에서 추정된 매개변수들을 사용하였다.

모델의 평가

개발된 애멸구 개체군 밀도 변동 모델의 예측력을 벼의 포트 재배 방식으로 평가하기 위한 자료 수집을 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다. 2011년 6월 16일에 45일묘 (추청벼)를 포트에 이앙하고 철제 프레임을 이용하여 망사를 씌워 재배하였다. 2011년 7월 6일에 우화한지 24시간이 경과하지 않은 성충 암, 수 3쌍을 각 포트별로 접종하였으며, 시바타 미니펌프(Sibata MP-2N)를 이용하여 각 포트에서 발육 중인 모든 개체들을 총 4회(7월 21일, 8월 5일, 8월 12일, 8월 19일) 흡충하여 70% 알코올에 보관하였다. 포장 조건에서 모델의 예측력을 평가하기 위해서 다음과 같이 실험을 수행하였다. 경기도 이천시 국립농업과학원 작물보호과 소속의 이천시험지 벼 포장에서 2012년 5월 16일에 이앙한 추청벼에 철제 프레임을 이용해 1주씩 망사를 씌워 외부로부터 애멸구 및 천적의 유입을 차단하였다. 2012년 6월 7일에 작물보호과 사육실에서 누대 사육하던 약충 개체군 중 우화한지 24시간을 경과하지 않은 성충 암, 수 2쌍을 각 주에 접종하였다. 시기별 증식 밀도 조사는 6~8일 간격으로 총 8회에 걸쳐 해당 주를 기부에서부터 완전히 제거하여 망사에 담아 실험실 냉동고로 옮겨 얼린 후 망사 내에 존재하는 모든 애멸구 개체를 붓으로 수거하여 70% 알코올에 보관하였다. 포트 및 포장 실험은 조사일별 3반복으로 수행되었으며, 약충의 영기 구분은 현미경하에서 시아의 발육정도로 판별하였다. 2011과 2012년의 포트 및 포장 평가에 사용된 일 최저, 최고 기온 자료는 소형 태양광 차단장치(Radiation shield, Passive #7714 by Davis instruments)에 온습도 데이터 로거 (Hobo H8 Pro Series by Onset)를 이용하여 수집하였다.

결과 및 고찰

온도별 산란 특성 및 산란 모델

애멸구는 12.5℃ 부터 35.0℃ 사이에 설정된 10개 항온조건에서 모두 산란이 가능하였다. 총산란수는 온도별로 유의한 차

Table 2. Adult fecundity and longevity (mean±SE) of *Laodelphax striatellus* at 10 constant temperatures

Temperature (℃)	No. adults examined	Fecundity (eggs/female)	Logevity (days ± SD)
12.5	20	59.4 ± 37.04ab[a]	53.6 ± 26.60de
15.0	20	196.4 ± 88.47bc	56.0 ± 25.24e
17.5	20	251.6 ± 160.74c	44.0 ± 22.25cde
20.0	20	330.6 ± 169.34cd	37.5 ± 17.88bcd
22.5	20	515.9 ± 187.30e	44.1 ± 18.04cde
25.0	20	492.1 ± 190.63e	35.7 ± 11.26abcd
27.5	20	422.1 ± 238.35de	29.7 ± 14.95abc
30.0	20	246.7 ± 50.45c	32.1 ± 13.82abc
32.5	20	210.6 ± 73.29c	25.6 ± 9.88ab
35.0	20	18.6 ± 23.40a	17.7 ± 6.04a

[a]Means followed by the same letter within a column are not significantly different (P>0.05, Tukey's test).

Table 3. Parameter estimates for adult developmental rate and oviposition component equations for *Laodelphax striatellus* adults

Function name	Function	Parameter	Estimated value±SE	r^2
Adult developmental rate	$r(T)=\frac{1}{A+B\times T^{2.5}}$	A B	50.44 ± 2.659 -0.0015 ± 0.0004	0.94
Total fecundity	$f(T)=a+\frac{b}{1+((T-c)/d)^2}$	a b c d	-205.11 ± 175.760 710.60 ± 161.720 297.10 ± 0.370 8.79 ± 2.524	0.95
Mortality rate	$M(x_n)=1-\exp[-(x_n/\eta)^\beta]$	η β	1.16 ± 0.004 2.33 ± 0.029	0.97
Cumulative ovipostion rate	$P(x_n)=1-\exp[-(x_n/\eta)^\beta]$	η β	0.54 ± 0.004 1.64 ± 0.027	0.97

이를 보였으며($F_{9,190}$ = 28.364, P < 0.001), 22.5℃ 에서 515.9개로 가장 많았으며 35.0℃ 에서 18.6개로 가장 적었다. 온도 변화에 따른 총 산란수 특성을 보면 실험 조건 중 가장 낮은 온도인 12.5℃ 에서도 59개 이상의 알을 산란하였으며 15.0~32.5℃ 의 넓은 온도 범위에서는 최소 196개 이상의 많은 알을 산란하여 낮은 온도를 포함한 넓은 온도 범위에서 산란 적응성이 뛰어난 해충으로 판단된다(Table 2). 성충의 수명은 15.0℃ 에서 56일로 가장 길었고 35.0℃ 에서 가장 짧아 17.7일 생존하였으며 통계적으로 유의한 차이가 있었다($F_{9,190}$ = 9.242, P < 0.001). 총 산란수와 마찬가지로 35.0℃ 를 제외한 전 온도의 범위에서 25일 이상 생존하였다(Table 2).

성충 산란 모델을 구축하기 위해서는 온도에 따른 성충 발육율 함수, 총 산란수 함수, 성충의 생리적 연령에 따른 누적 산란율 함수 및 사망율 함수가 필요하다. 성충의 생리적 연령은 온도에 따른 일별 성충 발육율의 누적 값을 사용하였으며 이들 함수들의 종류와 매개변수들은 Table 3에서 보여주고 있다. 각 함수들의 결정계수(r^2) 값이 성충 발육율 함수 0.94, 총 산란수 함수는 0.95, 사망률 함수와 누적 산란율 함수는 0.97로 높은 모형 적합성을 보여주고 있어 개체군 밀도 변동 예측 모델 구축에 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.

개체군 밀도 변동 모델의 구축 및 평가

2011년에는 포트 조건에서 밀도 변동 예측 능력을 평가하였다. 우화한지 24시간이 경과하지 않은 애멸구 성충 암, 수 3쌍을 포트에 접종하여 시기별로 증식 밀도를 조사한 결과, 접종 후 15일 후에는 211.7마리, 30일 후인 8월 5일에는 372.5마리, 44일 후인 8월 19일에는 400.3마리로 증가되었다. 접종 후 새로운 성충의 밀도는 접종 1개월 후 조사 시점에서 현저히 증가하였고 그로부터 1주일 후인 8월 12일 조사 시에는 1, 2령 약충 밀도의 급격한 증가를 관찰할 수 있어 정상적인 밀도 증식이 이루어졌음을 알 수 있었다(Table 4). 애멸구 개체군 밀도 변동 모델을 DYMEX를 이용하여 구축한 후 시기별 밀도 변동을 시뮬레이션 하였다. 밀도 변동 추정 결과 15일 후에는 442.4마리, 30일 후에는 246.7마리, 37일 후에는 2,135.3마리, 44일 후에는 15,086.8마리로 증가하는 것으로 추정되었다 (Table 4).

애멸구 개체군의 시기별 관찰 밀도와 예측 밀도와의 차이를 보면, 접종 15일 후인 7월 21일에는 예측 밀도는 관찰 밀도보다 약 2배 많았는데 이는 실제 조사시 1령 약충을 효과적으로 발견, 수거하지 못하였기 때문으로 추정된다. 접종 약 1개월 후인 8월 5일의 경우 충태별 예측 밀도와 관찰 밀도가 유사한 경향을 보여주고 있으나, 총 밀도의 경우 예측된 밀도가 관찰 밀도보다 100마리 이상 적었다. 이후 8월 12일에는 예측 밀도가 관찰 밀도보다 약 8배, 44일 후인 8월 19일에는 약 38배 많았으며, 8월 12일 이후의 예측 밀도와 관찰 밀도의 현저한 차이는 1, 2령 약충의 밀도가 높은 상황에서 이를 효과적으로 조사하지 못했기 때문으로 판단된다(Table 4, Fig. 1). 또한 모델의 경우 환경저항의 고려 없이 최대 능력으로 성충들의 산란이 이루어진 반면 실제 포트에서는 먹이 및 공간의 환경저항으로 산란수가 현저하게 줄어들고 알, 1, 2령 약충들의 사망률이 높아졌기 때문으로 추론해 볼 수 있다.

한편, 시기별로 주축 영기와 충태의 상대적 비율 변화를 보면, 7월 21일부터 1, 2령이, 8월 5일에는 5령이, 8월 12일 이후에는 다시 1, 2령이 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 모든 조사 시기에서 영기별로 관찰된 밀도 비율은 예측된 밀도 비율과 유사한 결과를 보여주고 있어(Fig. 1), 모델을 이용하여 개체군을 구성하는 주축 영기의 변화를 예측하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

Table 4. Comparison between observed and estimated population density (number of individuals/pot) of Laodelphax striatellus according to investigation dates (Pot experiment, 2011)

Date	Days after inoculation	Nymphal stage								Adult		Total	
		1st+2nd		3rd		4th		5th					
		Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.
Jul. 21st	15	133.0	432.1	68.3	7.9	8.3	0	0	0	2.0	2.4	211.7	442.4
Aug. 5th	30	22.7	2.6	25.3	0.6	86.3	16.4	139.0	154.9	99.3	72.2	372.7	246.7
Aug. 12th	37	115.3	1966.7	29.0	11.2	15.3	0.3	29.0	8.4	87.3	148.3	276.0	2135.3
Aug. 19th	44	172.0.	13132.0	105.0	1492.2	13.3	304.1	31.3	32.5	78.7	125.9	400.3	15086.8

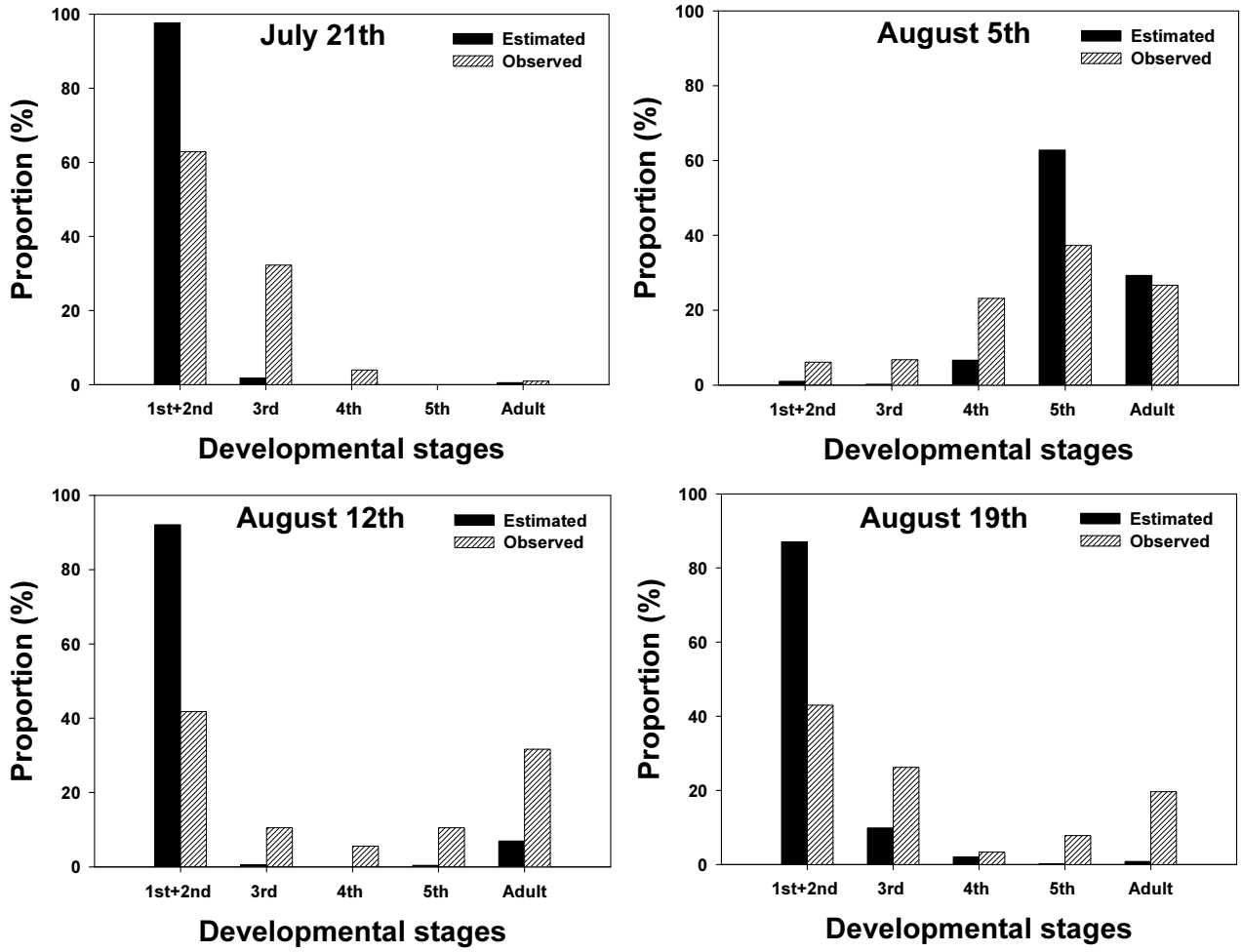

Fig. 1. Comparison between observed and estimated stage distribution of *Laodelphax striatellus* population after adult inoculation in potted rice (Pot experiment, 2011).

2012년에는 실제 벼 포장 조건에서 밀도 변동 예측 능력을 평가하였다. 시험포장에서 우화한지 24시간이 경과하지 않은 애멸구 성충 암, 수 2쌍을 접종하여 시기별로 증식 밀도를 조사한 결과 접종 15일 후인 6월 22일에는 67.7마리, 30일 후인 7월 7일에는 131.0마리로 증가하였다가 50일 후인 7월 27일에는 101.0마리, 57일 후인 8월 3일에는 104.0마리로 다소 감소하였다. 모델을 이용한 밀도 변동 예측 결과 7월 7일 150.5마리로 밀도가 증가하였다가 7월 12일 138마리로 감소한 후 8월 3일에는 808.5마리로 급격히 밀도가 증가하였다(Table 5). 포장 실험 결과 접종 후 43일 후인 7월 20일까지는 포장 관찰 밀도와 예측 밀

Table 5. Comparison between observed and estimated population density (number of individuals/hill) of *Laodelphax striatellus* according to investigation dates (Field experiment, 2012).

Date	Days after inoculation	Nymphal stage								Adult		Total	
		1st+2nd		3rd		4th		5th					
		Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.
Jun. 15th	8	0.7	0.2	1.7	0	0.7	0	0	0	2.3	2.8	5.3	3.0
Jun. 22nd	15	22.0	53.7	43.0	0.8	0	0	0	0	2.6	1.5	67.7	56.0
Jun. 28th	21	30.0	80.2	29.0	26.1	5.0	9.7	0	0.7	0.7	0.6	64.7	117.3
Jul. 7th	30	28.0	41.9	20.0	27.3	35.0	30.5	43.0	37.0	5.0	13.8	131.0	150.5
Jul. 12th	35	32.5	11.4	25.5	18.0	23.0	25.2	41.0	42.6	35.5	40.9	157.5	138.0
Jul. 20th	43	7.0	61.4	15.0	2.4	38.0	4.0	70.0	20.0	50.0	79.2	180.0	167.0
Jul. 27th	50	16.3	168.1	5.7	43.9	9.0	21.4	24.3	5.1	45.7	63.0	101.0	301.5
Aug. 3rd	57	25.3	573.1	9.3	92.4	9.0	59.4	3.3	46.6	57.0	37.0	104.0	808.5

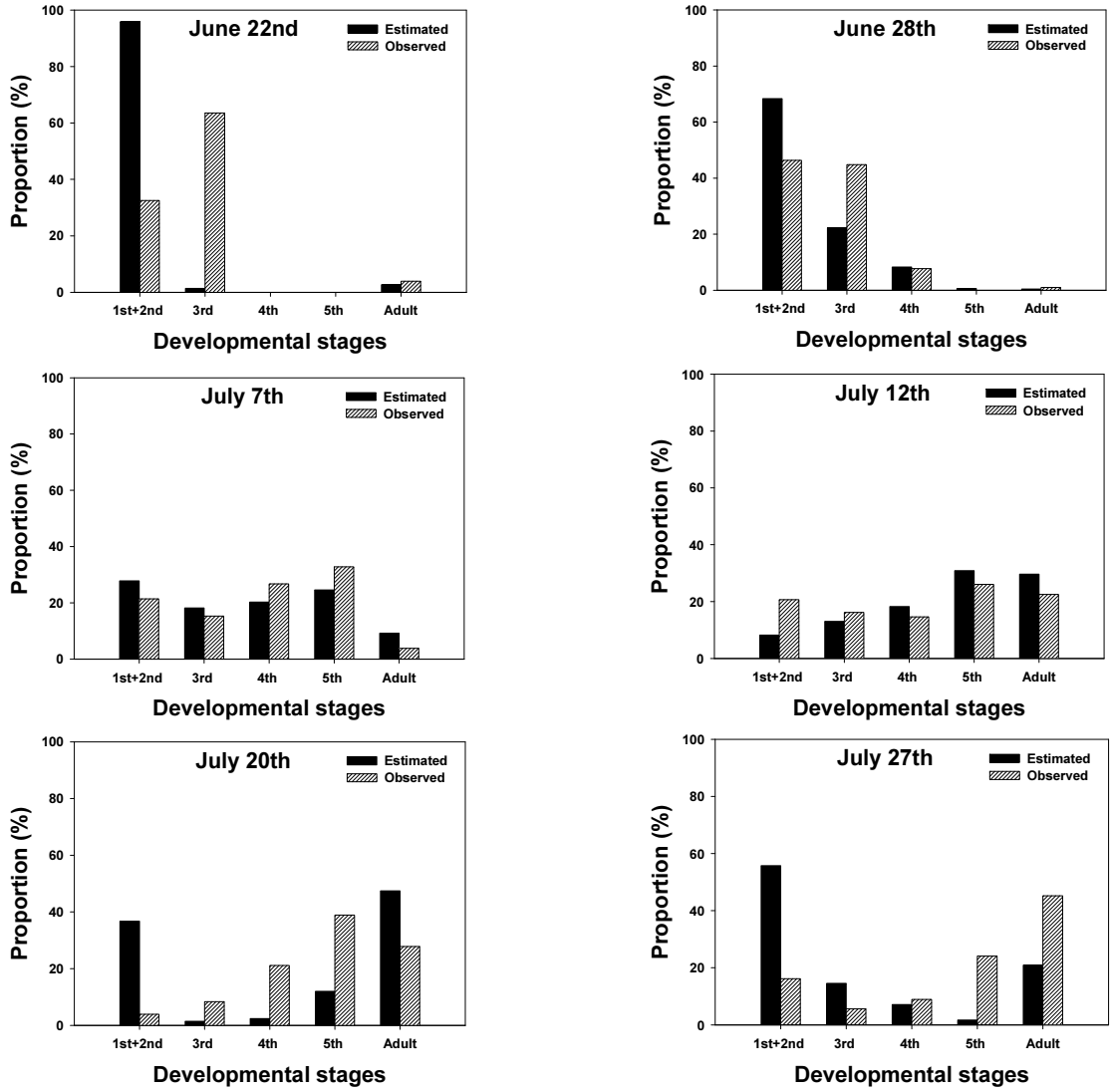

Fig. 2. Comparison between observed and estimated stage distribution of *Laodelphax striatellus* after adult inoculation in the rice paddy field (Field experiment, 2012).

도가 비슷한 경향을 보였으나 7월 27일의 예측 밀도는 포장 관찰밀도의 3배, 8월 3일에는 약 8배 높게 예측되었다. 7월 27일 이후의 예측 밀도와 관찰밀도의 차이는 포트 실험에서와 같이 1, 2령의 밀도 차이였다. 7월 27일의 경우 특히 1, 2령의 예측 밀도는 210마리 이상 이었으나 관찰된 밀도는 22마리로 예측된 밀도의 10%를 약간 웃돌았다. 이러한 결과를 보인 이유로는 앞에서 언급하였던 것과 같이 환경 저항에 의한 것으로 보인다. 특히 포장 조건에서는 망을 씌워 거미 등 천적의 침입을 억제하였지만 조사당일 상당히 높은 밀도의 애접시거미류와 같은 조망성 거미류가 발견되었으며 이들에 의한 포식 작용으로 어린 약충들의 사망률이 높아져 실제 포장 밀도가 낮아진 것으로 추정되어 진다. 한편 영기별 밀도 비율은 6월 28일부터 7월 12일까지는 관찰 자료와 예측 자료가 비슷하였으나 7월 20일이 되면 주력 영기가 예측 자료의 경우 성충과 1,2령 약충인 반면 관찰된 자료는 5령과 성충으로 약간 빠르게 발육을 예측한 것을 알 수 있었다 (Fig. 2).

이상의 결과를 종합해 볼 때 본 연구에서 개발된 모델을 사용할 경우 실제 야외 포장에서도 비교적 높은 밀도 변동 예측 능력을 발휘할 수 있을 것으로 판단되나 영기변화의 경우 한, 두 영기의 발육단계가 빠르게 예측되는 경향이 있었다. 따라서 특정 시기의 영기 분포와 관련된 정보의 예측 정확성을 높이기 위해서는 미기상 및 천적에 의한 발육단계별 사망률 등의 개체군 밀도에 강하게 영향을 줄 수 있는 추가적인 정보의 제공 및 분석이 필요할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ010821)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

Literature Cited

Bae, S.D., Kim D.K. 1994. Occurrence of small brown planthopper (*Laodelphax striatellus* Fallen) and incidence of rice virus disease by different seeding date in dry seeded rice. Koeran J. Appl. Entomol. 33, 173-177.

Chung, B.J., 1974. Studies on the occurrence, host range, transmission, and control of rice stripe disease in Korea. Kor. J. Plant Prot. 13, 181-204.

Hibino, H., 1996. Biology and epidemiology of rice viruses. Annu. Rev. Phytopathol. 34, 249-274.

Hyun, J.S., Woo, K.S., Ryoo, M.I., 1977. Studies on the seasonal increase of the population of the smaller brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Fallén). Kor. J. Plant. Prot. 16: 13-19.

Lee, B.C., Cho, S-.Y., Yoon, Y-.N., Kang, I.J., Lee, J.H., Kwak, D.Y., Shin, D.B., Kang, H-.W., 2012. Change in occurrence of rice stripe virus disease. Res. Plant Dis. 18, 402-405.

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.

Otuka, A., Zhou, Y., Lee, G. S., Matsumura, M., Zhu, Y., Park, H.H., Liu, Z., Sanada-morimura, S., 2012, Prediction of overseas migration of the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Hemiptera: Delphacidae) in East Asia. Appl. Entomol. Zool. 47, 379-388.

Park, C.-G., Park, H.-H., Kim, K.-H., 2011. Temperature-dependent development model and forecasting of adult emergence of overwintered small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* Fallén, population. Korean J. Appl. Entomol. 50, 343-352.

Park, C.-G., Yum K.-H., Lee, S.-K., Lee, S.-G., 2015. Construction and evaluation of cohort based model for predicting population dynamics of *Riptortus pedestris* (Fabricius)(Hemiptera: Alydidae) using DYMEX. Korean J. Appl. Entomol. 54, 73-81.

Park, J.W., Jin, T.S., Choi, H.S.,, Lee, S.H., Shin,, D.B., Oh, I.S., Lee, S.G., Lee, M.H., Choi, B.R., Bae, S.D., Kim, J.Y., Han, K.S., Noh, T.H., Ko,, S.J. Park, J.D., Lee, B.C., Kim, T.S., Chung, B.K., Hong, S.J., Kim, C.H., Park, H.M., Lee, K.W., 2009. Incidence of rice stripe virus during 2002 to 2004 in Korea and chemical control of small brown planthopper. Korean J. Pestic. Sci. 13, 309-314.

SAS Institute, 2002. SAS User's Guide; Statistics Version 9.1ed. SAS Institute. Cary NC.

SYSTAT software inc., 2002. TableCurve 2D Automated curve fitting analysis: version 5.01. Systat software. inc. San Jose, CA.

Wagner, T.L., Wu, H., Sharpe, P.J.H., Coulson, R.N., 1984. Modeling distribution of insect development time: a literature review and application of the Weibull function. Ann. Entomol. Soc. Am. 77, 475-487.