

항온과 변온조건에서 복숭아혹진딧물의 발육비교 및 온도 발육모형

김도익* · 최덕수 · 고숙주 · 강범용 · 박창규¹ · 김선곤 · 박종대 · 김상수²

전남농업기술원 연구개발국, ¹국립농업과학원 농업생물부 ²순천대학교 원예생물의학부

Comparison of Development times of *Myzus persicae* (Hemiptera:Aphididae) between the Constant and Variable Temperatures and its Temperature-dependent Development Models

Do-Ik Kim*, Duck-Soo Choi, Suk-Ju Ko, Beom-Ryong Kang, Chang-Gyu Park¹, Seon-Gon Kim, Jong-Dae Park and Sang-Soo Kim²

Jeollanamdo Agricultural Research & Extension Services, Naju 520-715 Korea

¹Crop Protection Division, Department of Agricultural biology, National Academy of Agricultural Science, Suwon 441-853 Korea

²Division of Horticulture and Plant Medicine, Suncheon National University, Suncheon 540-742 Korea

ABSTRACT: The developmental time of the nymphs of *Myzus persicae* was studied in the laboratory (six constant temperatures from 15 to 30°C with 50~60% RH, and a photoperiod of 14L:10D) and in a green-pepper plastic house. Mortality of *M. persicae* in laboratory was high in the first(6.7~13.3%) and second instar nymphs(6.7%) at low temperatures and high in the third (17.8%) and fourth instar nymphs(17.8%) at high temperatures. Mortality was 66.7% at 33°C in laboratory and 26.7°C in plastic house. The total developmental time was the longest at 14.6°C (14.4 days) and shortest at 26.7°C (6.0 days) in plastic house. The lower threshold temperature of the total nymphal stage was 3.0°C in laboratory. The thermal constant required for nymphal stage was 111.1DD. The relationship between developmental rate and temperature was fitted nonlinear model by Logan-6 which has the lowest value on Akaike information criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC). The distribution of completion of each developmental stage was well described by the 3-parameter Weibull function ($r^2=0.95\sim0.97$). This model accurately described the predicted and observed occurrences. Thus the model is considered to be good for use in predicting the optimal spray time for *Myzus persicae*.

Key words: *Myzus persicae*, Developmental time, Developmental rate, Degree-day

초 록: 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae*)의 온도에 따른 발육시험을 실내 15, 18, 21, 24, 27, 30°C의 6개 항온, 광주기 14L:10D, 상대습도 50~60% 조건과 고추 비닐하우스에서 3월 23일부터 8월 20일까지 6회 집중하여 수행하였다. 실내사망률은 저온에서는 1~2령충의 사망률이 높았고 온도가 증가할수록 3~4령충의 사망률이 높았으며 고온에서는 66.7%까지 높아졌다. 실내와 포장조건 모두 온도가 증가할수록 발육기간이 짧아지는 경향을 보였으며 포장조건 8월 집중에서 6.03일로 가장 짧았다. 온도와 발육률과의 관계를 보기 위해 선형 및 3개의 비선형 모형(Briere 1, Lactin 2, Logan 6)을 이용하여 분석한 결과, 선형모형을 이용하여 전체약충의 발육영점온도는 3.0°C였으며 발육유효적산온도는 111.1DD였다. 3가지 비선형 모형중 Logan-6 모형이 전약충, 후약충 전체약충 단계에서 AIC와 BIC 값이 가장 적어 온도와 발육율과의 관계를 잘 설명하였으며, 발육단계별 발육완료분포는 3-parameter Weibull 함수를 사용하였으며 전약충, 후약충, 전체약충에서 r^2 값이 0.95~0.97로 높은 값을 보여 양호한 모형 적합성을 보였으며 정식시기별 성충 발생 예측치와 포장 조사치가 일치하여 방제시기 추정에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

검색어: 복숭아혹진딧물, 발육기간, 발육율, 적산온도

복숭아혹진딧물(*Myzus persicae* Sulzer, green peach aphid)

은 전세계에 분포하고, 기주식물은 40과 이상 수백 종에 이른다. 온대지역에서는 알로 월동하고, 봄에 식물이 성장을 시작하면 알에서 부화하여 꽃, 어린 잎, 줄기 등을 흡즙한다. 가을 세대를 제외한 모든 세대는 단성이며, 알은 벚나무속(*Prunus*) 식물

*Corresponding author: doik1020@korea.kr

Received April 19 2012; Revised October 23 2012

Accepted November 13 2012

에 낱고, 알의 크기는 0.6, 0.3 mm이다(Capinera, 2000). 케일 재배지에서는 작물 생육기간동안 계속해서 발생하는 해충으로 년 2회(6월 하순과 9월 상순) 최성기를 보인다(Choi et al., 1996). 피해로는 어린 식물에 높은 밀도로 존재하고, 물에 대한 스트레스, 잎의 위축, 성장률의 둔화 및 수확량의 감소 등의 피해를 준다(Petitt and Smilowitz, 1982). 또한 진딧물의 감로에 의한 그을음병과 바이러스의 매개원이 되고 있다(Kennedy et al., 1962). 그러나 잦은 약제 살포로 약제저항성을 가지며, 천적의 제거로 진딧물의 피해가 증가하고 있다(King and Phillips, 1989; Slosser et al., 1989).

온도는 곤충의 발생시기, 발생밀도, 분포 등 개체군 기초 생태에 영향을 미치는 가장 중요한 물리적 요인이며, 해충의 방제 전략수립과 밀도 변동을 예측하기 위한 기본적 요소로서 곤충 발육과 온도와의 관계를 해석하고자 많은 시도가 이루어져 왔다(Campbell et al., 1974; Lactin et al., 1995; Logan et al., 1976; Schoolfield et al., 1981; Briere and Pracros, 1998; Briere et al., 1999). 현재까지 곤충발생예찰은 유효적산온도를 이용한 방법이 폭넓게 이용되고 있으며 실제로 좋은 예측결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(Eckenrode and Chapman, 1972; Ali Niazee, 1976; Butts and McEwen, 1981). 그러나 유효적산 온도 방법은 발육영점온도를 직선회귀식에 의해 추정하기 때문에 저온이나 고온부근에서 오차가 발생하는 단점이 있어(Howe, 1967; Scopes and Biggerstaff, 1977), 이러한 문제점을 보완하는 발육속도 개념에 근거한 발육률을 적산하여 예측하는 방법이 개발되고 있으며(Wagner et al., 1984a, b), Schoolfield et al.(1981)이 변형한 비선형 모형은 적산온도를 이용한 모형보다 좋은 적중도를 보이는 것으로 보고되고 있다(Han et al., 1993; Kim et al., 2001; Kim and Lee, 2003; Park et al., 2010a, b). 이들 비선형 모형중에서 적절한 모형을 선택하기 위해 변수 선택(variable selection), 통계적 검정(hypothesis testing), 정보 기준(information criteria) 등을 이용한 다양한 방법이 있으며(Lee, 2010) 그중에서 많이 쓰이는 기준으로 아카이케정보기준(Akaike Information Criterion : AIC) 과 베이지안정보기준(Bayesian Information Criterion : BIC)이 보고되어 있다(Burnham and Anderson, 2004; Shi and Ge, 2010). 복숭아진딧물에서도 이러한 연구들이 이루어져 온도에 의한 약충 발육기간(Kocourek and Beraniova, 1989; Lykouressis, 1985)과 성충의 과 출산 약충수(MacGillivray and Anderson, 1958)등의 연구와 함께 실내 조건에서 온도 의존적인 발육모형에 관한 연구가 이루어져, 복숭아혹진딧물의 밀도 변화 예측과 방제이용 가능성을 보여준바 있다(Kim and Kim, 2004). 본 연구는 시설 재배지에서 피해를 주고 있는 복숭아혹진딧물의 온도 발육 특성

을 파악하고 개체군 밀도 변동을 구성하는 온도 의존적 발육모형을 개발하여, 변온 상태의 비닐하우스에서 고추 정식시기별로 성충 발생 상황과 개발된 발육모형이 얼마나 적합한지 검증하여 적기 방제 시기를 포착하기 위한 기초자료로 활용코자 실시하였다.

재료 및 방법

진딧물 사육

복숭아혹진딧물은 전남농업기술원 친환경연구소 내에서 누대 사육하고 있는 것을 사용하였다. 진딧물의 사육은 직경 7 cm, 높이 7 cm의 플라스틱 화분에 고추(*Capsicum annum* L., 독자청청)를 파종하고, 30일이 경과하여 본엽이 5장 나온 고추에 복숭아혹진딧물을 접종하였다. 25℃ 항온조건의 사육실에서 35×25×30 cm 사육상에 5~8개의 플라스틱 화분을 넣어 증식하였다. 비닐하우스에서 시기별 접종을 하기 위해서 접종 15일전에 성충이 접종된 고추포트를 비닐하우스에 놓아 포장 온도에 적응시킨 후 사용하였다.

약충의 온도별 사망률 및 발육기간

복숭아혹진딧물의 실내발육시험은 고추화분에 복숭아혹진딧물을 접종하여 6시간 동안 산자를 받았다. 직경 5 cm, 높이 7 mm의 펠트리디쉬에 직경 2.5 cm의 고추 잎을 뒷면이 위로 향하도록 놓고 산자를 각각 한 마리씩 접종하여 다단실향온기(NK-system TG-100-ADCT, ±1.0℃, RH 50~60%, L:D=14:10)에 넣었다. 온도는 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33℃ 6개 항온조건으로 12시간 간격으로 발육상태를 조사하였다. 각 온도별로 15마리를 1반복으로 총 45마리를 접종하였다.

온도발육 모형 및 발육 완료 분포 모형

선형 모형

온도와 발육과의 관계를 나타낸 선형 모형은 최소자승법(Campbell et al., 1974)을 사용하여 구하였으며(식 (1)), 발육률(발육속도)은 온도에 따라 발육단계별 평균 발육기간의 역수로 표현하였다.

$$r(T_c) = aT_c + b \quad (1)$$

식 (1)에서 $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육률이며, T_c 는 온도

(°C), a는 직선회귀식의 기울기이며, b는 0°C에서 발육률이 다. 직선회귀의 분석은 15~30°C까지 5온도별 발육률을 사용하였으며, 매개변수의 추정에는 SAS의 PROC REG(SAS Institute, 1999)를 사용하였다. 각 발육단계별 발육영점온도는 회귀직선식의 X절편(-b/a)값이 되고, 발육단계별 발육 완료에 필요한 유효적산온도(Degree-day)는 기울기의 역수(1/a) 값이 된다.

비선형 모형

온도와 발육율과의 관계를 분석하기 위해 사용된 비선형 모형은 Briere 1(Briere et al., 1999) (식 (2)), Lactin 2(Lactin et al., 1995) (식 (3)), Logan 6(Logan et al., 1976) (식 (4)) 모형을 사용하였다.

$$r(T_c) = a T_c (T_c - T_0) (T_L - T_c)^{1/2} \quad (2)$$

식 (2)에서 $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율, T_c 는 온도(°C), a는 매개변수, T_0 는 발육영점온도, T_L 는 치사 상한온도 의미한다.

$$r(T_c) = e^{(pT_c)} - e^{(pT_L) - (T_L - T_c)/\Delta T} + \lambda \quad (3)$$

식 (3)에서 $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율, T_c 는 온도(°C), p는 최적온도에서 발육율 상수, T_L 은 치사 상한온도, ΔT 는 고온부 분 경계지역의 온도 범위로서 생리적인 장애가 최우선 영향이 되는 온도 범위를 의미하며, λ 는 이 식에서 음의 y절편 값을 가지게 만듦으로써 발육영점온도를 추정할 수 있도록 해주는 값이다.

$$r(T_c) = \Psi(e^{(pT_c)} - e^{(pT_L - (T_L - T_c)/\Delta T)}) \quad (4)$$

식 (4)에서는 $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율, Ψ 는 최대발육율, T_c 는 온도(°C), p는 최적온도에서 발육율 상수, T_L 은 치사 상한온도, ΔT 는 고온부 분 경계지역의 온도 범위로서 생리적인 장애가 최우선 영향이 되는 온도 범위를 의미한다. 분석에서 사용된 모든 비선형 모형의 매개변수 추정을 위해서 윈도우용 TableCurve 2D ver. 5.01(SYSTAT, 2002)의 사용자 정의 비선형 모형 분석을 사용하였다.

발육모형 선택

발육모형으로 사용된 Briere 1, Lactin 2, Logan 6 모형 중에 적절한 모형을 선택하기 위해 아카이케정보기준(Akaike Information Criterion: AIC)(식 (5)) 과 베이지안정보기준(Bayesian Information Criterion : BIC)(식 (6))을 이용하였다.

$$AIC = -2((-N/2) * \ln(RSS/N)) + 2K \quad (5)$$

$$BIC = -2((-N/2) * \ln(RSS/N)) + K * \ln(N) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 N은 표본크기, RSS는 잔차제곱합, K는 에러를 포함한 파라메타 개수이다.

유충 발육완료 분포 모형

각 발육단계별 발육완료 분포 모형을 구하기 위하여 3-parameter Weibull 모형을 사용하였다(Wagner et al., 1984b) (식 (7)).

$$F(x) = 1 - \exp[-((x - \gamma)/\eta)^\beta] \quad (7)$$

식 (7)에서 F(x)는 표준화된 시간 χ (발육기간/평균발육기간)에서 동일한 연령집단의 개체들 중에 다음 연령단계로 발육이 완료된 누적 개체수들의 비율을 의미한다. γ , η , β 는 비선형 회귀식의 매개변수이며, 이들이 추정하기 위하여 윈도우용 TableCurve 2D ver. 5.01(SYSTAT, 2002)의 사용자 정의 비선형 모형 분석 모듈을 사용하였다.

발육모형 포장평가

포장발육실험은 전남농업기술원 친환경연구소 무가온 1층 비닐하우스에서 2011년 3월 3일부터 15일 간격으로 10회에 걸쳐 1령을 접종하였는데, 3월 15일까지 접종한 개체는 전부 사망하였다. 3월 23일부터 성충을 파종 6주된 고추에 접종 후 5~6시간 동안 받은 1령 약충을 준비된 오이에 한 마리씩 접종하고 12시간 간격으로 조사하였다. 1령 접종 후 진딧물의 이동을 방지하기 위해 clip cage(36.5×25.4×9.5 mm, BioQuip)를 씌워 주었다. 접종 시기별 처리는 1반복당 15마리씩 45마리였다. 이 시기의 온도는 데이터로거(WatchDog model 450)를 이용하여 매시간 온도가 기록되게 하여 3개월 단위로 수집하였다. 이 온도를 이용하여 접종시기별 성충 발육완료 곡선과 접종시기별로 얻은 성충 누적 빈도 곡선과 비교하여 포장 적합성을 검증하였는데, 온도는 매일의 평균온도 값을 이용하였다. 각 정식시기의 평균온도와 편차는 12.6±10.3°C(3월 23일 ~ 4월 15일), 14.4±8.3°C(4월 3일 ~ 4월 28일), 17.6±6.8°C(4월 19일 ~ 5월 14일), 20.2±6.2°C(5월 3일 ~ 5월 24일), 21.5±5.9°C(5월 16일 ~ 6월 2일), 28.5±3.8°C(8월 3일 ~ 8월 20일)로 저온일수록 온도 편차가 크게 나타났다.

결과 및 고찰

복숭아혹진딧물의 실내사망률은 저온에서는 1~2령층의 사망률이 6.7~13.3%로 3~4령의 0% 보다 높았고 온도가 증가할수록 3~4령층의 사망률이 높아졌으며, 33°C 에서 사망률이 66.7%까지 올라갔다(Table 1). 비닐하우스에서의 사망률은 저온에서 1~2령층의 사망률이 높았으며 온도가 올라가는 5월 이후 사망률은 높아 8월에는 각영기 모두 사망하였다. Kim and Kim(2004)도 복숭아혹진딧물이 15°C 부터 사망률이 20% 이며 30°C 이상에서는 32.5~90.0%까지 올라가며 특히 32.5°C 에서 4령층은 52.5%까지 사망하여 성충이 되지 못하고 사망한다고 하였으며, 또한 Barlow(1962)와 Liu and Meng(1999)는 30°C 이상의 온도에서는 성충이 우화하지 않는다고 하여 복숭아혹진딧물은 고온 적응성이 약한 종으로 판단된다. 반대로 목화진딧물은 32.5°C 에서 36%의 사망률을 나타내(Kim et al., 2004), 종에 따라 차이가 있어 발육모델이나 발생예찰시 참고할 수 있을 것으로 보인다.

복숭아혹진딧물의 실내 항온조건에서 발육기간은 30°C 에서 4.62일로 가장 짧았다(Table 2). 15°C 에서 발육기간이 가장 길었으며 온도가 올라갈수록 기간은 짧아졌으나 24°C 와 27°C 그리고 27°C 와 30°C 의 기간은 유의성이 인정되지 않았다. 본 실험에서 각 영기별 약충과 전체약충 모두 P값이 0.001보다 작아 5% 유의성이 인정된다(1st nymph $F = 279.23$, $df = 5$, $P = 0.001$, 2nd $F = 43.79$, $df = 5$, $P = 0.001$, 3rd $F = 35.22$, $df = 5$, $P = 0.001$, 4th $F = 45.22$, $df = 5$, $P = 0.001$). 비닐하우스 조건에

서 저온인 14.6°C 일때 14.43일로 가장 길었으며 고온기인 8월에는 6.03일로 가장 짧았다. 평균온도로 볼 때 14.6°C 부터 20.5°C 까지는 발육기간이 차이가 있었으며, 고온기인 8월의 26.7°C 와는 발육기간에 차이가 있었다(1st nymph $F = 25.64$, $df = 5$, $P = 0.001$; 2nd $F = 28.39$, $df = 5$, $P = 0.001$; 3rd $F = 72.45$, $df = 5$, $P = 0.001$; 4th $F = 22.48$, $df = 5$, $P = 0.001$). Kim and Kim (2004)은 15°C 에서 12.4일, 30°C 에서 5.0일로 본 실험의 기간보다 더 길었으나, Barlow(1962)는 15°C 에서 6.3일, Liu and Meng(1999)은 14.3°C 에서 14.3일이라고 하여 Kim et al.(2004)의 결과와 더 유사함을 알 수 있었다. 또한 실내조건보다는 포장조건에서 발육기간이 더 길게 나타났는데 3월에는 저온에 8월에는 고온에 더 많이 노출된 원인 때문으로 판단된다.

온도와 발육률의 관계를 직선회귀식에 의해 분석한 결과는 Table 3이며 직선을 포함한 비선형회귀는 Fig. 1과 같다. 실내에서 각 영기별 발육영점온도는 각각 10.8, 2.9, 6.7, 4.8 °C 였으며 전약충은 7.1°C, 후약충은 5.7°C, 전체약충은 3.0°C 였다. 유효적산온도는 전약충, 후약충, 전체약충이 각각 50.0, 76.9, 111.1일도이었다. Barlow(1962)는 복숭아혹진딧물의 발육영점온도에 대해 5.0°C 이하, Liu and Meng(1999)은 4.3°C, Kocourek and Beraniova(1989)는 6°C (유효적산온도 116.3일도), Whalon and Smilowitz(1979)는 4°C (유효적산온도 129일도), Kim and Kim(2004)은 4.9°C (116.5일도)라고 하여, 본실험의 실내조건 결과와는 다르게 나타났으며 포장조건에서 4.4°C (142.9일도)의 결과와 Liu and Meng(1999), Whalon and Smilowitz (1979) 보고와 가장 유사하였다.

Table 1. Age-specific mortality of *Myzus persicae* at various temperatures in the laboratory and plastic house

Place	Temperature (°C)	Nymphal mortality (%)				
		1st	2nd	3rd	4th	Total
Laboratory	15	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
	18	6.7	6.7	0.0	0.0	13.3
	21	13.3	0.0	0.0	0.0	13.3
	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	27	0.0	6.7	0.0	0.0	6.7
	30	0.0	13.3	13.3	0.0	26.7
	33	0.0	6.7	26.7	33.3	66.7
Plastic house	12.6±10.3 (23 Mar.~15 Apr.)	10.0	3.3	0.0	0.0	13.3
	14.4±8.3 (3 Apr.~28 Apr.)	17.8	8.9	4.4	2.2	33.3
	17.6±6.8 (19 Apr.~14 May)	11.1	6.7	6.7	0.0	24.5
	20.2±6.2 (3 May~24 May)	13.3	17.8	4.4	0.0	35.5
	21.5±5.9 (16 May~2 Jun.)	20.0	2.22	0.0	0.0	22.22
	28.5±3.8 (3 Aug.~20 Aug.)	17.8	13.3	17.8	17.8	66.7

Table 2. Development period(day, mean±SE) for the nymph stages of *Myzus persicae* at various temperatures

Place	Temperature (°C)	Developmental periods (days ± SE)				
		1st	2nd	3rd	4th	Total
Laboratory	15	3.85±0.41a	2.17±0.70a	2.07±0.59a	1.98±0.61a	10.07±2.25a
	18	3.25±0.65b	2.08±0.52ab	1.56±0.41bc	1.28±0.25c	8.16±1.76b
	21	2.62±0.18c	1.33±0.28c	1.64±0.32b	1.64±0.32b	6.93±1.04c
	24	1.09±0.32d	1.38±0.31c	1.38±0.29c	1.17±0.24d	5.02±1.06d
	27	1.61±0.57e	1.17±0.27c	1.06±0.25d	0.96±0.27e	4.79±1.32de
	30	0.99±0.39e	1.24±0.21c	1.28±0.22c	1.11±0.32d	4.62±1.09e
Plastic house	12.6±10.3 (23 Mar.~15 Apr.)	3.89±0.65a	3.65±0.43a	3.47±0.17a	3.43±0.52a	14.43±0.80a
	14.4±8.3 (3 Apr.~28 Apr.)	2.18±0.09bc	2.97±0.10b	2.94±0.10b	2.87±0.11a	10.97±0.23b
	17.6±6.8 (19 Apr.~14 May)	1.83±0.23bc	2.52±0.14c	2.66±0.13c	2.32±0.35b	9.32±0.97c
	20.2±6.2 (3 May~24 May)	1.74±0.16bc	2.27±0.24c	2.25±0.18d	2.15±0.17b	8.41±0.57d
	21.5±5.9 (16 May~2 Jun.)	1.75±0.00bc	2.14±0.04cd	2.23±0.04d	1.86±0.13b	7.97±0.15cd
	28.5±3.8 (3 Aug.~20 Aug.)	1.59±0.16c	1.78±0.09d	1.45±0.17e	1.22±0.20c	6.03±0.25e

^{a)} values followed by the same letter within a column are not significantly different ($P > 0.05$, DMRT).

Table 3. Lower threshold temperatures and thermal requirements estimated by linear regression for *Myzus persicae*

Place	Stage	Intercept	Slope	r ²	Lower threshold temperature ^{a)}	Degree Day (DD) ^{b)}
Laboratory	1st	-0.539	0.05	0.76	10.8	20.0
	2nd	-0.077	0.027	0.80	2.9	37.0
	3rd	-0.160	0.024	0.72	6.7	41.7
	4th	-0.138	0.029	0.66	4.8	34.5
	Pre-nymph	-0.142	0.02	0.89	7.1	50.0
	Post-nymph	-0.074	0.013	0.70	5.7	76.9
	Total	-0.027	0.009	0.94	3.0	111.1

^{a)} Lower threshold temperature = | intercept/slope | .

^{b)} Degree Day = 1/slope.

선형과 3가지 비선형 모형(Logan 6)을 이용하여 온도와 발육률과의 관계를 분석한 결과(Table 4), Logan-6 모형은 직선식과 거의 일치한 회귀식을 보여, Logan 6 모형이 유충 발육단계별 온도에 따른 발육률의 변화를 잘 설명하였다. 정보기준으로 평가할 때(Table 5) Briere 1, Lactin 2, Logan 6의 AIC 값은 전체약충에서 -150.6, 153.5, -156.4로 수치가 작을수록 더 적합한 모형으로 판단했을 때 Logan 6 모형이 가장 적절하였다. 또한 BIC 역시 Briere 1, Lactin 2, Logan 6의 값이 -147.8, 150.0, 152.1로 나타나 이들 값의 절대치 차이가 0과 2사이면 작은 차이, 2와 6사이면 보통차이, 6에서 10사이면 큰 차이, 10 이상이면 매우 큰 차이가 난다는 Raftery(1995)의 기준으로 보았을 때 Logan 6 모형이 Briere 1과 4.3, Lactin 2와는 2.1의 차이로 보통차이가 나는 것으로 나타나 Logan 6 모형이 더 적합

한 것으로 판단된다. Park et al.(2010a)도 흑다리긴노린재의 약충 발육단계에서 비선형 모형 중 Logan-6 모형이 온도와 발육률과의 관계를 가장 잘 설명된다고 한바 있다. 또한 Kim et al. (2004)도 직선회귀에서는 조사온도 범위에 따라 조사결과를 누락할 경우도 있어 비선형회귀식이 복숭아혹진딧물의 온도별 발육모형에 더 적합하다고 하였다.

실내와 포장조건에서 각각의 온도에서 개체들의 발육기간을 평균발육기간으로 나누는 방법으로 발육기간을 정규화시킨 후 3-parameter Weibull 함수에 적용시켜 동일한 발육단계와 연령집단의 발육완료를 추정하였다(Table 5). 각 발육단계별로 모형의 적합성을 나타내는 r² 값이 차이가 있어 실내에서 1령충이 0.89로 가장 낮았으며 그 외에는 모든 영기에서 0.94 이상을 나타내 각 온도별 발육시기의 누적 발육률을 잘 나타내고

Table 4. Parameter estimates of the three non-linear models describing the relationship between the development rate of nymphal stage of *Myzus persicae* and temperature

Model	Parameter	Nymphal stage				Pre-nymph	Post-nymph	Total nymph
		1st	2nd	3rd	4th			
Briere 1	a	0.00031	0.00037	0.00027	0.00030	0.00015	0.00017	0.00009
	T_0	6.878	-2.437	-9.972	-10.148	2.977	3.665	0.616
	T_L	50.35	35.22	36.23	36.97	43.64	40.30	37.35
Lactin 2	ρ	0.064	0.131	0.165	0.165	0.156	0.125	0.150
	T_L	56.71	35.36	33.74	34.03	36.60	38.46	35.44
	ΔT	13.43	7.50	6.02	6.02	6.39	7.93	6.64
	λ	-0.7107	0.0381	0.2632	0.2886	0.0156	-0.0559	0.0191
Logan 6	ψ	0.0855	0.1485	0.2278	0.2484	0.0360	0.0560	0.0391
	ρ	0.1473	0.1076	0.0510	0.0521	0.0971	0.1346	0.1264
	T_L	38.96	35.59	30.23	30.29	34.92	37.04	36.17
	ΔT	6.11	6.62	0.17	0.20	6.42	6.42	6.76

Table 5. Goodness-of-fit evaluation of *Myzus persicae* at the nymphal stage

Model	Parameter	Nymphal stage				Pre-nymph	Post-nymph	Total nymph
		1st	2nd	3rd	4th			
Briere 1	r^2	0.7579	0.8889	0.7795	0.7037	0.9758	0.9045	0.9688
	AIC	-63.8	-94.9	-86.5	-75.4	-128.5	-116.8	-150.6
	BIC	-60.9	-92.1	-83.7	-72.5	-125.7	-113.9	-147.1
Lactin 2	r^2	0.7570	0.8926	0.8326	0.7393	0.9845	0.9492	0.9775
	AIC	-61.7	-93.6	-88.6	-72.9	-133.2	-124.2	-153.5
	BIC	-58.2	-90.1	-85.1	-69.4	-129.7	-120.7	-150.0
Logan 6	r^2	0.7516	0.8926	0.9007	0.784	0.8973	0.8542	0.9771
	AIC	-59.4	-91.4	-94.5	-76.1	-132.2	-139.2	-156.4
	BIC	-55.1	-87.2	-90.2	-71.9	-128.0	-134.9	-152.1

Table 6. Estimated parameters of Weibull function for the development completion of the nymphs of *Myzus persicae*

Life stage	η	β	γ	SEM	r^2
1st	41.696	176.558	-40.716	0.104	0.8950
2nd	0.892	3.721	0.089	0.086	0.9367
3rd	2.510	11.116	-1.505	0.066	0.9615
4th	1.226	5.280	-0.249	0.083	0.9454
Pre-nymph	0.697	3.296	0.320	0.071	0.9518
Post-nymph	1.430	6.391	-0.400	0.064	0.9596
Total	0.833	3.932	0.210	0.051	0.9728

있었다. 또한 전약충, 후약충, 전체약충에서도 r^2 값이 0.95~0.97로 높게 나타나 각 영기별로 누적발육률을 평가하기 보다는 전약충과 후약충으로 나누어 평가하는 것이 바람직 할 것으로 보

이며, 이같은 결과는 Kim et al.(2004)의 결과와 유사하였다.

변온인 비닐하우스에 복숭아혹진딧물을 정식시기별로 1령충을 접종하여 성충이 되는 날의 비율을 누적한 조사값과 각 정식시기의 비닐하우스 온도를 바탕으로 성충 발육을 예측한 값을 비교한 결과(Fig. 1), 매일의 평균값으로 성충발육을 예측하였을 때 가장 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 저온에서 실제 조사값은 예측값보다 더 늦게 성충이 나타났으나 온도가 올라가는 4월 중순이후 5월까지의 예측값 보다 더 빠르게 성충이 나타났다. 이러한 결과는 Park et al.(2011)도 애벌레의 월동개체군의 발육모델에 의한 성충 우화비율의 예측결과가 실측치보다 늦게 나타난다고 보고한바 있으며 이러한 원인으로 휴면타파 전후의 생리적 발육의 차이, 생태종의 존재(Chon et al., 1975) 등에 의해 차이 날수 있는 조건 때문으로 판단된다.

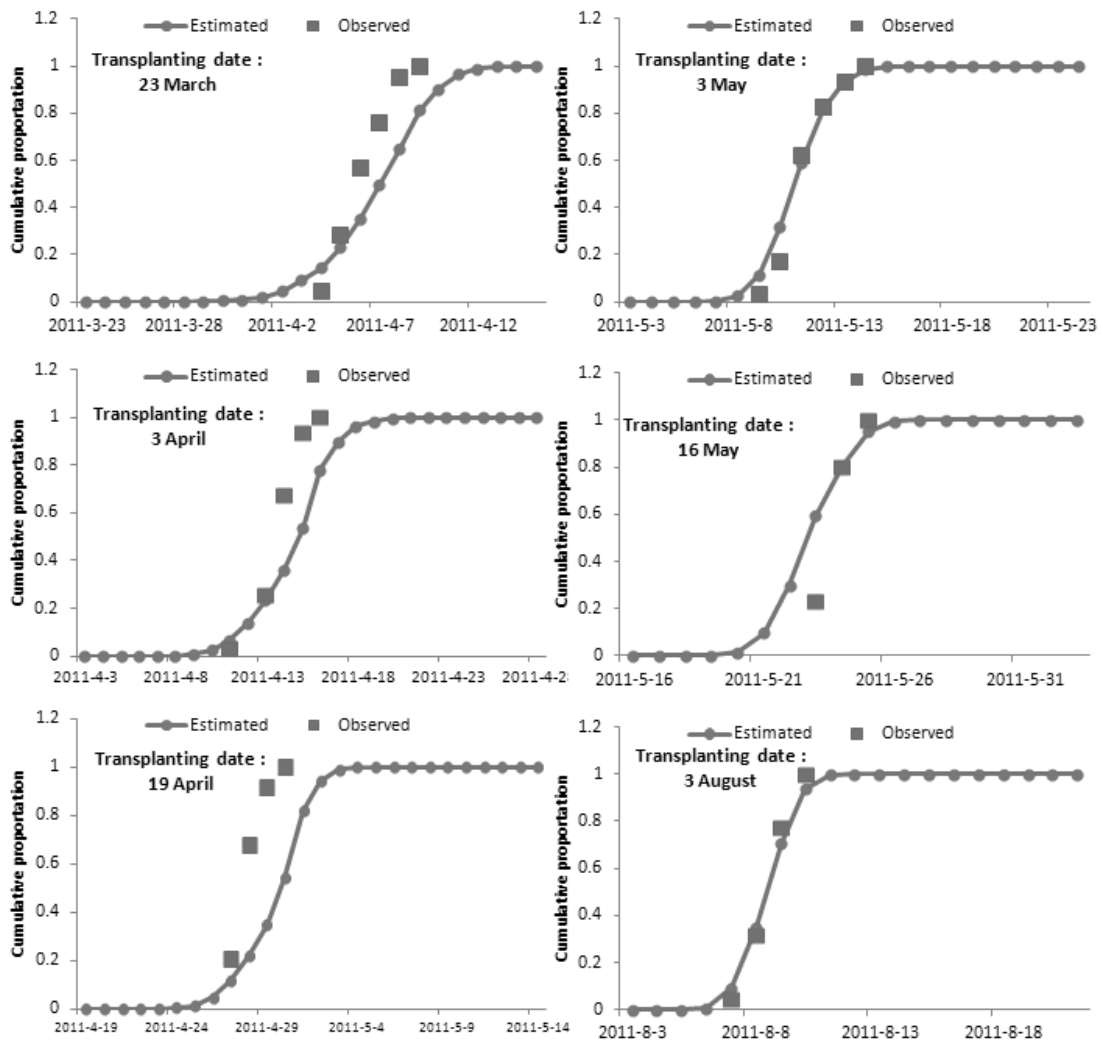


Fig. 1. Comparison of predicted cumulative curves and observed proportion on each transplanting date of *Myzus persicae*.

사 사

본 연구는 농촌진흥청의 ‘진딧물 개체군 동태 모델 및 방제 의사결정 체계 개발(과제번호: PJ007395092012)’ 과제의 지원에 의해 수행되었음.

Literature Cited

- Ali Niaze, M.T., 1976. Thermal unit requirements for determining adult emergence of the western cherry fruit fly in the Willamette Valley of Oregon. *Environ. Entomol.* 5, 397-401.
- Barlow, C.A., 1962. The influence of temperature on the growth of experimental populations of *Myzus persicae* (Sulzer) and *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas) (Aphididae). *Can. J. Zool.* 40, 145-156.
- Briere, J.F., Pracros, P., 1998. Comparison of temperature-dependent growth models with the development of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Environ. Entomol.* 27, 94-101.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, A.Y., Pierre, J.S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28, 22-29.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2004. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociol. Methods Res.* 33, 261-304.
- Butts, R.A., McEwen, F.L., 1981. Seasonal populations of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae), in relation to day-degree accumulation. *Can. Entomol.* 113, 127-131.
- Campbell, A., Frazer, B.D., Gilbert, N., Gutierrez, A.P., Markauer, M., 1974. Temperature requirements of some aphids and their parasites. *J. Appl. Ecol.* 11, 431-438.

- Capinera, J.L., 2000. www. Creatures. Ifas.ufl.edu/veg/aphid/melon_aphid.htm.
- Choi, J.S., Hwang, C.Y., Goh, H.G., Kim, I.S., Lee, S.G., 1996. Insect pests fauna and their spatial distribution pattern on Kale (*Brassica oleracea* L. var. *Acephala* DC). Korean J. Appl. Entomol. 38, 489-494.
- Chon, T.S., Hyun, J.S., Park, C.S., 1975. A study on the population dynamics of overwintered small brown plat hopper, *Laodelphax striatellus* (Fallen). Kor. J. Entomol. 5, 21-23.
- Eckenrode, C.K., Chapman, R.K., 1972. Seasonal adult cabbage maggot populations in the field in relation to thermal unit accumulations. Annals of the Entomological Society of America 65, 151-156.
- Han, M.W., Lee, J.H., Lee, M.H., 1993. Effects of temperature on development of oriental tobacco budworm, *Helioverpa assulta* Guenee. Kor. J. Appl. Entomol. 32, 236-244.
- Howe, R.W., 1967. Temperature effects on embryonic development in insects. Annu. Rev. Entomol. 10, 15-42.
- Kennedy, J.S., Day, M.F., Eastop, V.F., 1962. A conspectus of aphids as vectors of plant viruses. Commonwealth Institute of Entomology, London. pp. 114.
- Kim, D.S., Lee, J.H., 2003. Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera : Carposinidae). Ecol. model. 162, 145-153.
- Kim, D.S., Lee, J.H., Yiem, M.S., 2001. Temperature-dependent development of *Carposina sasakii* (Lepidoptera : Carposinidae) and its emergence models. Environ. Entomol. 30, 298-305.
- Kim, J.S., Kim, T.H., 2004. Development time and development model of green peach aphid, *Myzus persicae*. Kor. J. Appl. Entomol. 43, 305-310.
- Kim, J.S., Kim, Y.H., Kim, T.H., Kim, J.H., Byeon, Y.W., Kim, K.H., 2004. Temperature-dependent development and its model of the melon aphid, *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphididae). Kor. J. Appl. Entomol. 43, 111-116.
- King, E.G., Phillips, J.R., 1989. The 42nd annual conference report on cotton insect research and control. in: Proc. Beltwide Cotton Production Research Conference, Memphis, Tennessee, USA. pp. 180-191.
- Kocourek, F., Beraniova, J., 1989. Temperature requirements for development and population growth of the green peach aphid *Myzus persicae* on sugar beet. Acta Entomol. Bohemoslov. 86, 349-355.
- Lactin, D.J., Holliday, N.J., Johnson, D.I., Craigen, R., 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. Environ. Entomol. 24, 68-75.
- Lee, Y.H., 2010. Simulation study on model selection based on AIC under unbalanced design in linear mixed effect models. Kor. J. A. Stat. 23, 1169-1178.
- Liu, S.S., Meng, X.D., 1999. Modelling development time of *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) at constant and natural temperatures. Bull. Entomol. Res. 89, 53-63.
- Logan, J.A., Wolkind, D.J., Hoyt, S.C., Tanigoshi, L.K., 1976. An analytical model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. Environ. Entomol. 5, 1133-1140.
- Lykouressis, D.R., 1985. Temperature requirements of *Sitobion avenae* (F.) necessary for ecological studies, by assessing methods for the estimation of instar duration. Z. Ang. Entomol. 100, 479-493.
- MacGillivray, M.E., Anderson, G.B., 1958. Development of four species of aphids (Homoptera) on potato. Can. Entomol. 90, 148-155.
- Park C.G., Park, H.H., Uhm, K.B., Lee, J.H., 2010a. Temperature-dependent development model of *Paromius exiguus* (Distant) (Heteroptera: Lygaeidae). Kor. J. Appl. Entomol. 49, 305-312.
- 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* Fallen, population. Kor. J. Appl. Entomol. 50, 343-352.
- Park, C.G., Kim, H.Y., Lee, J.H., 2010b. Parameter estimation for a temperature-dependent development model of *Thrips palmi* Karny (Thysanoptera: Thripidae). J. Asia Pac. Entomol. 13, 145-149.
- Petitt, F.L., Smilowitz, Z., 1982. Green peach aphid feeding damage to potato in various plant growth stages. J. Econ. Entomol. 75, 431-435.
- Raftery, A.E., 1995. Bayesian model selection in social research. Sociol. methodol. 25, 111-163.
- Schoolfield, R.M., Sharpe, P.J.H., Mugnison, C.E., 1981. Nonlinear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory. J. Theor. Biol. 66, 21-38.
- Scopes, N.E.A., Biggerstaff, S.B., 1977. The use of a temperature integrator predict the developmental period of the parasite *Aphidius matricariae*. J. Appl. Ecol. 14, 799-802.
- Shi, P., Ge, F., 2010. A comparison of different thermal performance functions describing temperature-dependent development rates. J. Thermal Biol. 35, 225-231.
- Slosser, J.E., Pinchak, W.E., Rummel, D.E., 1989. A review on known and potential factors affecting the population dynamics of the cotton aphid. Southwestern Entomologist 14, 302-313.
- SYSTAT software inc. 2002. TableCurve 2D Automated curve fitting analysis: Ver. 5.01. Systat software. inc. San jose. CA.
- Wagner, T.L., Wu, H., Sharpe, P.J.H., Coulson, R.N., 1984a. Modeling distribution of insect development time: A literature review and application of Weibull function. Ann. Entomol. Soc. Am. 77, 475-487.
- Wagner, T.L., Wu, H., Sharpe, P.J.H., Schoolfield, R.M., Coulson, R.N., 1984b. Modeling insect development rate: A literature review and application of a biophysical model. Ann. Entomol. Soc. Am. 77, 208-225.
- Whalon, M.E., Smilowitz, Z., 1979. Temperature-dependent model for predicting field populations of green peach aphid *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). Can. Entomol. 111, 1025-1032.