

갯끈동부콩에서 아카시아진딧물 [*Aphis craccivora* Koch (Hemiptera: Aphididae)]의 온도발육, 성충 수명과 산란 및 생명표분석

조점래 · 김정환 · 최병렬¹ · 서보윤 · 김광호 · 지창우 · 박창규² · 안정준^{3*}

농촌진흥청 국립농업과학원 작물보호과, ¹농림축산검역본부 식물검역부 위험관리과, ²국립한국농수산대학 산업곤충학과, ³농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소

Thermal Effects on the Development, Fecundity and Life Table Parameters of *Aphis craccivora* Koch (Hemiptera: Aphididae) on Yardlong Bean (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* (L.))

Jum Rae Cho, Jeong-Hwan Kim, Byeong-Ryeol Choi¹, Bo-Yoon Seo, Kwang-Ho Kim, Ji Chang Woo, Chang-Gyu Park² and Jeong Joon Ahn^{3*}

Crop Protection Division, Department of Crop Life Safety, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

¹Risk Management Division, Department of Plant Quarantine, Animal and Plant Quarantine Agency, Gimcheon 39660, Korea

²Department of Industrial Entomology, Korea National College of Agricultural and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

³Research Institute of Climate Change and Agriculture, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Jeju 63240, Korea

ABSTRACT: The cowpea aphid *Aphis craccivora* Koch (Hemiptera: Aphididae) is a polyphagous species with a worldwide distribution. We investigated the temperature effects on development periods of nymphs, and the longevity and fecundity of apterous female of *A. craccivora*. The study was conducted at six constant temperatures of 10.0, 15.0, 20.0, 25, 30.0, and 32.5°C. *A. craccivora* developed successfully from nymph to adult stage at all temperatures subjected. The developmental rate of *A. craccivora* increased as temperature increased. The lower developmental threshold (LT) and thermal constant (K) of *A. craccivora* nymph stage were estimated by linear regression as 5.3°C and 128.4 degree-days (DD), respectively. Lower and higher threshold temperatures (TL, TH and TH-TL, respectively) were calculated by the Sharpe_Schoolfield_Ikemoto (SSI) model as 17.0°C, 34.6°C and 17.5°C. Developmental completion of nymph stages was described using a three-parameter Weibull function. Life table parameters were estimated. The intrinsic rate of increase was highest at 25°C, while the net reproductive rate was highest at 20°C. Biological characteristics of *A. craccivora* populations from different geographic areas were discussed.

Key words: *Aphis craccivora*, Temperature, Nonlinear function, Adult longevity, Life table analysis

초록: 아카시아진딧물은 다양한 기주식물을 먹이로 하는 곤충으로 전 세계적으로 분포하고 있다. 본 연구는 아카시아진딧물 약충의 발육기간, 무시성충의 수명과 번식능력을 조사하기 위하여 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 32.5°C 정온조건에서 실험을 실시하였다. 조사된 모든 항온조건에서 아카시아진딧물은 성공적으로 성충으로 발육하였고 발육율은 온도가 상승할수록 증가하였다. 아카시아진딧물 약충시기별 발육영점온도와 유효적산일은 선형회귀분석 방법을 이용하여 계산하였다. SSI모형을 이용하여 발육최저, 최고한계를 추정하였다. 아카시아진딧물 전체약충기간의 발육영점온도와 유효적산일은 각각 5.3°C 과 128.4DD였다. SSI모형을 이용한 아카시아진딧물의 발육최저, 최고온도는 17.0°C 과 34.6°C 였으며 이들간의 차이는 17.5°C 였다. 전체약충기간의 발육완료분포모형은 3-매개변수 Weibull함수를 이용하여 나타내었다. 온도와 관련된 아카시아진딧물의 생물적 특성을 생명표분석을 통해 나타내었다. 내적자연증가율은 25°C 에서, 개체군순증가율은 20°C 에서 가장 높았다. 다른 지역에 서식하는 아카시아진딧물의 생물적 특성을 비교 분석하였다.

검색어: 아카시아진딧물, 온도, 비선형함수, 성충수명, 생명표분석

*Corresponding author: j2ahn33@korea.kr

Received June 19 2018; Revised August 6 2018

Accepted September 18 2018

아카시아진딧물(*Aphis craccivora* Koch)은 전 세계적으로 분포하는 종으로 다양한 기주 식물- 자귀풀, 등나무, 차풀, 개나리, 땀싸리, 박하나팔꽃, 붉나무 등-을 먹이로 하고 있으며 콩과 식물- 개자리속(*Medicago*), *Melilotus*속, 토끼풀속(*Trifolium*), 살갈퀴속(*Vicia*), 골담초속(*Caragana*), 꽃아카시아속(*Robinia*), 냥이(*Capsella bursa-pastoris* L.) 등-을 선호하는 것으로 알려져 있다(Chang and Youn, 1983; Borowiak-Sobkowiak et al., 2017). 아프리카와 파키스탄에서 땅콩(*Arachis hypogaea*), 호주에서는 땅속토끼풀(*Trifolium subterraneum*), *Lupinus angustifolius*, *Medicago polymorpha*와 같은 목초, 전 세계적으로는 동부콩(*Vigna unguiculata* (L.)), 완두, 알팔파, 루핀(*lupine*)의 생장에 심각한 피해를 주어 경제적인 손실을 주는 것으로 알려져 있다(Gutierrez et al., 1971; Nair et al., 2003; Berberet et al., 2009; Machacha et al., 2012; Javed et al., 2014).

아카시아진딧물은 직접적으로 식물체의 잎, 꽃, 콩꼬투리의 수액 흡즙을 통해, 간접적으로는 주요한 식물바이러스- Groundnut rosette virus (GRV), Subterranean clover stunt virus (SCSV), Bean common mosaic virus (BCMV), Cowpea mosaic virus (CMV), Cucumber mosaic virus (CMV) - 를 포함한 50가지 이상의 식물 바이러스를 매개함으로써 작물 성장 및 콩 생산에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Stoetzel and Miller, 2001; Laamari et al., 2008; Sainsbury et al., 2010; Agunbiade et al., 2013).

근충의 발육은 그들이 노출되어 있는 물리적(온도, 습도, 광주기 등) 생물적(기주식물, 먹이시슬) 환경에 영향을 받는다. 특히 온도는 변온생물인 진딧물과 이들의 기주식물에 생존, 생식, 개체군 성장에 지대한 영향을 미친다(Gutierrez et al., 1971; Campbell et al., 1974; Park et al., 2017b). 생명표분석은 물리적 환경과 먹이 조건 등이 개체군 성장에 어떻게 영향을 미치는지를 이해하는데 유용한 방법으로 매개변수 추정을 통해 개체군 증감과 해충관리전략을 수립하는데 도움이 되는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2017a; Saska et al., 2017; Sugawara et al., 2017).

아카시아진딧물의 생물학적 특성과 발육에 영향을 주는 변온조건에 대한 기록들은 있지만(Obopile and Ositile, 2010; Soffan and Aldawood, 2014) 신뢰할 수 있는 온도 범위에서 온도발육모형과 해충관리전략을 구축하는데 이용될 수 있는 생명표 분석을 위한 충분한 자료가 제시된 바가 없는 상태이다. 본 연구의 목적은 아카시아진딧물 약충 발육, 성충 수명 및 산란, 생명표 매개변수에 미치는 온도의 영향과 전체약충기간의 온도발육모형을 작성하여 아카시아진딧물 개체군 모형 작성에 기본이 되는 자료를 제공하는 것이다.

재료 및 방법

아카시아진딧물의 채집 및 사육

아카시아진딧물(*Aphis craccivora*)는 2012년 6월 충남 공주시 사곡면 월오길 34-19 (엔젤농장) (36°56'N)에 있는 갯끈동부(*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*)에서 채집하였다. 아카시아진딧물의 기주 식물로 이용하기 위해 갯끈동부를 포트(직경 17 cm × 높이 12 cm)에 파종하여 국립농업과학원내 온실에 재배하였다. 실험에 이용하기 위한 아카시아진딧물은 온도 25 ± 2°C, 상대습도 60 ± 10%, 광주조건 16L : 8D인 사육실에서 아크릴케이지(가로 55 cm × 세로 50 cm × 폭 30 cm)에 갯끈동부콩이 20 cm 이상 자란 포트를 넣어 먹이로 제공하여 유지하였다.

약충 발육에 관한 실험

새롭게 태어난 간모(<12시간 이내)를 빛을 이용하여 한 마리씩 페트리디쉬(SPL Co. 제품, 직경 5.5 cm × 높이 2 cm, 뚜껑에는 직경 1.3 cm의 구멍에 극미세 망사가 붙어있어서 공기가 자유롭게 순환하도록 함)로 옮겨 실험을 실시하였다. 각 페트리디쉬는 0.8 cm 높이의 1.7% 한천배지를 넣어 습도를 유지하였다. 신선한 갯끈동부 잎을 약충의 먹이로 공급하였다.

아카시아진딧물 간모에서 무시성충 출현까지의 발육기간은 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 32.5°C로 설정한 항온기(NK System, Bio Multi Incubator JP/LH-30-8CT, Nippon Medical & Chemical Instrument Co. LTD)에서 조사하였다. 온도정밀도는 설정한 온도의 ±1°C 범위였다. 페트리디쉬 내의 온도는 항온기에 설정한 온도와 같았다. 위의 각 온도로 설정된 항온기에 45마리 이상을 반복으로 하여 24시간 간격으로 약충 탈피각을 확인하여 각 약충의 영기를 구분하였다.

성충수명 및 산자수 실험

약충 발육과 연결된 실험으로 약충과 무시성충의 구분이 어려운 성충의 출현시기를 출산 날부터 역산하여 마지막 탈피한 날을 성충으로 구분하였다. 산자수와 수명의 조사는 매일 동일한 시간에 산자수를 확인 한 후 태어난 약충은 다음 조사 시 혼동을 없게 하기 위하여 제거 하였고, 성충이 죽은 날을 기록하였다. 먹이의 공급은 조사과정에서 시들거나 부패한 식물체는 제거하고 새로운 잎과 줄기를 공급하였다 실험에 사용한 페트리디쉬는 약충실험에 사용한 용기를 그대로 사용하였고, 처리 온도도 약충실험과 동일하다.

자료 분석

아카시아진딧물 각 약층의 발육기간, 성충의 수명, 산자수는 SAS에있는 일반화선형모형(PROC GLM)을 이용하여 분석하였다(SAS Institute, 2002). 실험에 이용된 온도간 약층의 발육기간, 성충의 수명, 산자수의 통계적 차이가 있으면 Tukey의 평균간 다중비교를 이용하여 처리온도간의 평균값을 비교하였다. 선형 및 비선형함수의 매개변수들은 TableCurve 2D (Jandel Scientific, 1994) 혹은 R statistics (2015)를 이용하여 구하였다.

발육모형 매개변수 추정

온도와 발육율(발육기간의 역수)은 선형과 비선형함수를 이용하여 분석하였다. 선형함수($y = aT + b$: 여기서 $y =$ 발육률, $T =$ 실험온도)에서 얻어진 결과를 이용하여 발육영점온도($-\frac{b}{a}$)와 유효적산일($\frac{1}{a}$)을 계산하였다(Campbell et al., 1974). 비선형함수는 Ikemoto (2005)가 제시한 Sharpe-Schoolfield-Ikemoto (SSI)모형을 이용하여 매개변수를 추정하였다.

$$r(T) = \frac{\rho_{\phi} \frac{T}{T_{\phi}} \exp\left[\frac{\Delta HA}{R} \left(\frac{1}{T_{\phi}} - \frac{1}{T}\right)\right]}{1 + \exp\left[\frac{\Delta HL}{R} \left(\frac{1}{TL} - \frac{1}{T}\right)\right] + \exp\left[\frac{\Delta HH}{R} \left(\frac{1}{TH} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (1)$$

Eq. (1)은 SSI모형(Sharpe and DeMichele, 1977; Schoolfield et al., 1981; Ikemoto, 2005)로 이들의 매개변수들은 Shi et al. (2017)이 개발한 R프로그램을 이용하였다. 이 모델에서 $r(T)$ 는 절대온도($^{\circ}K$)에서의 발육률 ΔHA , ΔHL , ΔHH 는 엔탈피의 변화($Jmol^{-1}$); R 은 기체상수($1.987 \text{ cal degree}^{-1} \text{ mole}^{-1}$); ρ_{ϕ} 는 T_{ϕ} 에서 발육률; TL 과 TH 는 발육조절효소의 활성과 비활성이 같은 확률을 보이는 최저, 최고 온도; T_{ϕ} 는 최적공통온도이다 (Kim et al., 2017). T_{ϕ} 는 발육조절효소의 활성이 최적인 온도를 의미한다(Sharpe and DeMichele, 1977).

$$P_2(T) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{\Delta HL}{R} \left(\frac{1}{TL} - \frac{1}{T}\right)\right] + \exp\left[\frac{\Delta HH}{R} \left(\frac{1}{TH} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (2)$$

Eq. (2)는 활성화 상태에 있는 발육조절효소의 확률을 나타낸다. $P_2(T)$ 의 최고 확률은 T_{ϕ} 에서 볼 수 있다.

아카시아진딧물의 발육단계별 발육완료 분포모형을 설명하기 위해 3개의 매개변수를 갖는 Weibull함수를 이용하였다 (Weibull, 1951; Wagner et al., 1984):

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (3)$$

$F(t)$ 는 정규화된 시간(각 개체의 발육기간 / 평균발육기간), γ , α , β 는 Weibull함수의 매개변수들이다.

정온조건에서 아카시아진딧물 무시성충이 출현하는 빈도를 비선형함수와 발육완료분포모형을 이용하여 추정하였다.

$$F(x, T) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{xr(T) - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (4)$$

$F(x, T)$ 는 시간 x 와 온도 $T(^{\circ}C)$ 에서 아카시아진딧물 무시성충이 출현하는 빈도로서 $r(T)$ 는 온도와 발육률간의 관계를 설명하는 비선형함수, γ , α , β 는 발육완료분포모형에서 얻은 매개변수들이다. $F(x, T)$ 의 결과는 x_{t+1} 과 x_t 결과의 차이를 나타낸다.

생명표 분석

아카시아진딧물 무시성충의 생명표분석을 위한 성충의 성비는 1.0으로 설정하였다. 개체군순증가율(R_0), 평균세대기간(T), 개체군 배가시간(DT), 기간증가율(λ), 내적자연증가율(r_m) 등의 생명표 매개변수들은 Maia et al. (2000)이 제시한 SAS 프로그램을 이용하여 계산하였다(SAS Institute, 2002). 각 온도별 매개변수들의 통계적 차이는 Student's t-test를 이용하여 검정하였다(Meyer et al., 1986).

결과

약층온도발육

아카시아진딧물은 조사된 모든 항온온도조건에서 약층에서 성충으로 발육이 가능하였다(Table 1). 발육단계별 약층의 발육기간과 성충출현기간은 온도에 영향을 많이 받았다(1령 약층: $F_{5, 333} = 135.14$, $P < 0.0001$, 2령 약층: $F_{5, 325} = 76.41$, $P < 0.0001$, 3령 약층: $F_{5, 297} = 120.05$, $P < 0.0001$, 4령 약층: $F_{5, 238} = 98.57$, $P < 0.0001$, 전체약층기간: $F_{5, 237} = 641.29$, $P < 0.0001$). 성충이 출현하는데 필요한 시간은 실험온도가 증가할수록 감소하였다. 1령 약층에서 성충이 출현하는데 필요한 시간은 $10^{\circ}C$ 에서 27.4일, $32.5^{\circ}C$ 에서 4.56일 이었다. 아카시아진딧물 약층 발육단계별 발육영점온도와 유효적산일(degree-days, DD)은 선형회귀분석을 이용하여 추정하였다(Table 2). 1령부터 4령 약층까지 발육영점온도는 $4.9^{\circ}C$, $2.7^{\circ}C$, $4.6^{\circ}C$, $7.6^{\circ}C$ 이었다.

Table 1. Development time (days) for *Aphis craccivora* using Yardlong bean as a food at six different constant temperatures

Temperature (°C)	Life stage				
	1st	2nd	3rd	4th	Total
10.0	6.08 ± 0.35a	5.69 ± 0.40a	6.47 ± 0.35a	10.03 ± 0.62a	27.41 ± 0.75a
15.0	2.82 ± 0.18b	3.13 ± 0.19b	3.33 ± 0.19b	4.81 ± 0.25b	13.39 ± 0.29b
20.0	2.14 ± 0.09c	2.02 ± 0.11c	2.26 ± 0.13c	3.58 ± 0.19b	9.52 ± 0.16c
25.0	1.05 ± 0.02d	1.50 ± 0.07cd	1.36 ± 0.06d	1.73 ± 0.10c	5.67 ± 0.12d
30.0	1.30 ± 0.09d	1.60 ± 0.10cd	1.47 ± 0.13d	1.75 ± 0.43c	5.82 ± 0.20d
32.5	1.01 ± 0.09d	1.19 ± 0.05d	1.17 ± 0.04d	1.28 ± 0.05c	4.56 ± 0.06d

Means followed by the same letter within a column are not significantly different ($P < 0.05$, Tukey studentized range test). 1st nymph stage: $F_{5,333} = 135.14$, $P < 0.0001$, 2nd nymph stage: $F_{5,325} = 76.41$, $P < 0.0001$, 3rd nymph stage: $F_{5,297} = 120.05$, $P < 0.0001$, 4th nymph stage: $F_{5,238} = 98.57$, $P < 0.0001$, Total nymph period: $F_{5,237} = 641.29$, $P < 0.0001$.

Table 2. Lower developmental threshold (°C) and thermal constant (DD) estimated from the linear regression for *Aphis craccivora*

Life stage	Regression equation	r^2	LDT	K
1st	0.0497T - 0.3848 (0.0114) (0.2106)	0.90	4.92	27.88
2nd	0.0330T - 0.1633 (0.0010) (0.0187)	0.99	2.73	37.20
3rd	0.0376T - 0.2515 (0.0051) (0.0944)	0.96	4.66	33.04
4th	0.0301T - 0.2365 (0.0071) (0.1307)	0.90	7.68	34.31
Total nymph	0.0089T - 0.0584 (0.0012) (0.0232)	0.96	5.30	128.43

LDT is lower developmental threshold. K means thermal constant. Numbers in the parentheses are SEM at each developmental stage. 1st nymph stage: $F_{1,2} = 18.83$, $P < 0.0492$, 2nd nymph stage: $F_{1,2} = 1048.09$, $P < 0.0009$, 3rd nymph stage: $F_{1,2} = 53.65$, $P < 0.0181$, 4th nymph stage: $F_{1,2} = 17.97$, $P < 0.0513$, Total period of nymph: $F_{1,2} = 50.19$, $P < 0.0193$. The linear regression analysis was for the ranges of 10~32.5°C.

Table 3. Parameter estimates of nonlinear developmental rate model for *Aphis craccivora*

Parameters	Life stage				
	1st	2nd	3rd	4th	Total
ρ_ϕ	1.1989	0.8458	0.8999	0.9231	0.2298
T_ϕ	309.4183	305.8506	306.7041	307.7296	306.5828
ΔHA	17.4891	3780.996	10.0000	3563.549	2197.139
ΔHL	-29835.87	-33772.38	-28582.37	-23290.26	-27452.36
ΔHH	10401.69	10212.09	999998.1	991194.5	999977.3
TL	292.7756	285.8291	291.7429	293.1496	290.1909
TH	344.0913	364.3137	307.8221	308.8050	307.7340
χ^2	0.0024	0.0072	0.0082	0.013	0.0038
r^2	0.93	0.96	0.97	0.96	0.97

ρ_ϕ is the developmental rate at T_ϕ ; T_ϕ is the intrinsic optimum temperature; ΔHA , ΔHA , and ΔHA are enthalpy changes (Jmol^{-1}); and TL and TH are temperatures at which the control enzyme has equal probability to be active or inactive by low or high temperature inactivation.

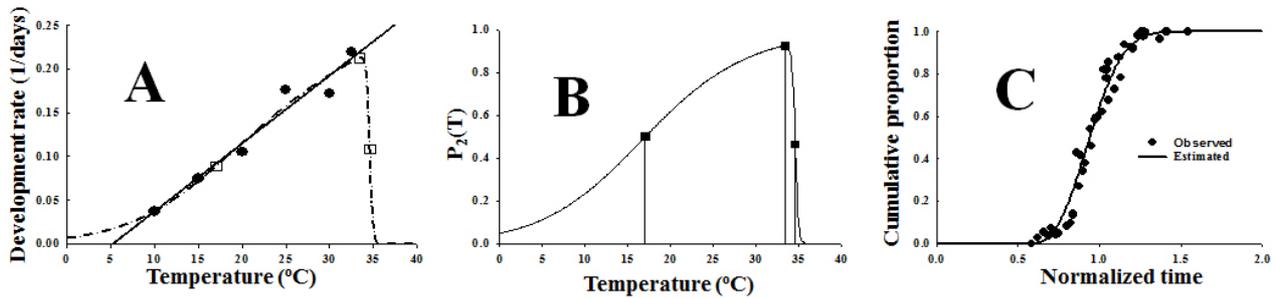


Fig. 1. A: Linear and nonlinear functions fitted to the data of developmental rate (day⁻¹) for total nymph period of *Aphis craccivora*. B: $P_2(T)$ is the probability that rate-controlling enzyme is in the active stage. The closed three squares from left to right represent the development rates at T_L , T_ϕ and T_H . T_L and T_H which are temperatures at which the control enzyme has equal probability to be active or inactive by low or high temperature inactivation, and T_ϕ is the intrinsic optimum temperature. C: Cumulative proportions of development completion for total nymph period of *A. craccivora*.

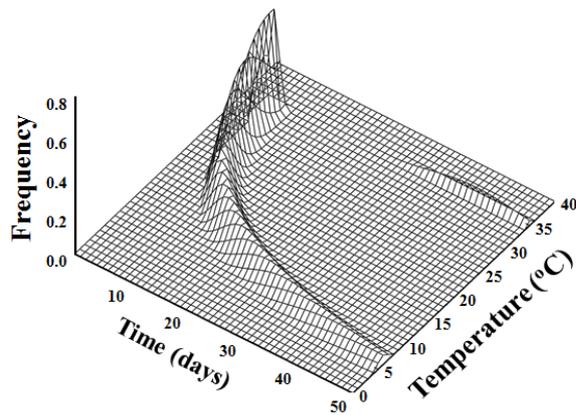


Fig. 2. Simulated temperature-dependent adult emergence of *Aphis craccivora* using nonlinear function.

1령부터 4령약충까지 유효적산온도는 27.8, 37.2, 33.0, 34.3DD였다.

온도와 전체약충기간 및 각 약충발육단계의 발육률간의 관계를 SSI함수를 이용하여 분석하였다(Table 3). SSI함수를 이용한 아카시아진딧물 전체약충기간의 T_L , T_ϕ , T_H 는 17.04, 33.43, 34.58°C였다. 1령부터 4령약충까지 최적공통온도는 36.2, 32.7,

33.5, 34.5°C였다. 아카시아진딧물의 발육적정온도범위 즉 T_L 과 T_H 의 차이는 17.5°C였다.

3-매개변수 Weibull함수는 아카시아진딧물 약충의 발육완료분포와 정규화된 시간과의 관계를 잘 설명해주었다(Fig. 1C) ($\gamma = 0.5838$, $\alpha = 0.4106$, $\beta = 2.5508$, $F_{2,41} = 680.99$, $P < 0.0001$, $r^2 = 0.97$). 0~40°C의 정온조건에서 아카시아진딧물 전체약충기간의 온도발육모형과 발육완료분포모형의 매개변수들을 이용하여 아카시아진딧물 무시성충출현빈도를 시뮬레이션하였다(Fig. 2). 33°C에서 성충 출현빈도가 가장 높았다.

온도별 성충의 수명 및 산자수

아카시아진딧물 무시성충은 조사된 모든 항온온도조건에서 생존하였다. 아카시아진딧물 무시성충의 수명, 암컷당 산자수, 산자기간은 온도에 영향을 많이 받았다(Longevity: $F_{5,205} = 41.63$, $P < 0.0001$, Total egg per female: $F_{5,205} = 21.93$, $P < 0.0001$, Oviposition period: $F_{5,205} = 28.83$, $P < 0.0001$). 무시성충의 평균수명은 15.0°C (22.6일)에서 가장 길었으며 32.5°C (3.8일)에서 가장 짧았다(Table 4). 암컷당 평균 산자수는 20.0°C

Table 4. The longevity (mean \pm SE) and fecundity (mean \pm SE) of adult female *Aphis craccivora* at six different constant temperatures

Temperature (°C)	Pre-oviposition	Oviposition	Post-oviposition	Longevity	Total nymphs/female
10.0	8.26 \pm 0.70a	9.64 \pm 1.26b	2.97 \pm 0.36a	19.88 \pm 1.21a	8.82 \pm 1.25d
15.0	2.55 \pm 0.24b	18.36 \pm 1.79a	2.71 \pm 0.46a	22.63 \pm 1.86a	28.52 \pm 2.35bc
20.0	1.36 \pm 0.14bc	19.17 \pm 1.21a	2.83 \pm 0.32a	22.36 \pm 1.27a	44.72 \pm 3.45a
25.0	0.65 \pm 0.09c	9.73 \pm 0.77b	1.11 \pm 0.06b	10.52 \pm 0.81b	37.19 \pm 3.27ab
30.0	0.94 \pm 0.19c	4.17 \pm 0.82c	1.00 \pm 0.17b	5.28 \pm 0.81bc	13.67 \pm 3.04d
32.5	0.50 \pm 0.11c	3.432 \pm 0.34c	0.82 \pm 0.10b	3.86 \pm 0.37c	20.40 \pm 2.83c

Pre-Oviposition: $F_{5,205} = 87.49$, $P < 0.0001$, Oviposition: $F_{5,205} = 28.83$, $P < 0.0001$, Post-Oviposition: $F_{5,205} = 10.53$, $P < 0.0001$, Longevity: $F_{5,205} = 41.63$, $P < 0.0001$, Total egg / female: $F_{5,205} = 21.93$, $P < 0.0001$.

(44.7)에서 가장 많았으며 10.0°C (8.8)에서 가장 적었다. Fig. 3은 온도별 아카시아진딧물 무시암컷성충의 일별 생존율 및 산자수의 변화를 보여주고 있다. 생존율은 10°C에서 13일 이후, 15°C에서 11일 이후, 20°C에서 10일 이후, 25°C에서 4일 이후, 30와 32.5°C는 2일 이후에 급속히 감소하였다(Fig. 3).

생명표분석

아카시아진딧물의 온도에 따른 생명표 매개변수의 분석결과는 Table 5와 같다. 순증가율(R_0)은 20 (34.4)과 25°C (30.9)에서 높았으며 10°C (4.5)에서 가장 낮았다. 현 세대의 출생에서부터 다음 세대의 출생까지 걸리는 시간을 나타내는 평균 세

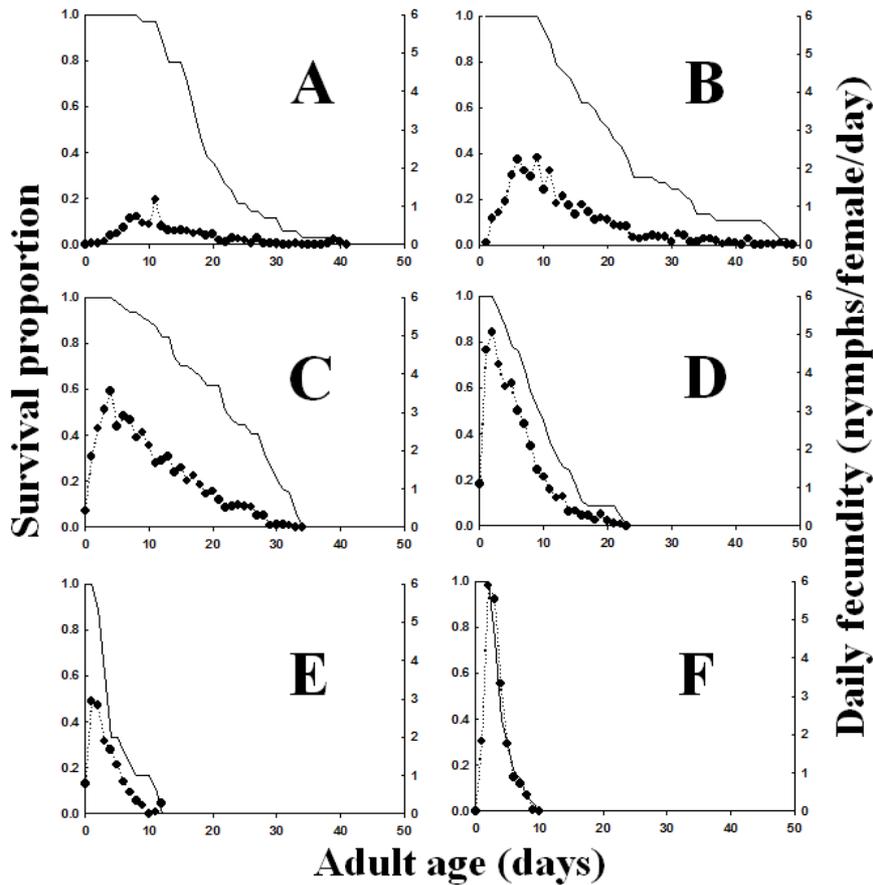


Fig. 3. The proportional survivorship and daily fecundity (nymphs/female/day) of *Aphis craccivora* at six different constant temperatures. A: 10.0°C, B: 15.0°C, C: 20.0°C, D: 25.0°C, E: 30.0°C, and F: 32.5°C.

Table 5. Life table parameters of *Aphis craccivora* at six different constant temperatures

Temperature (°C)	Parameters (mean ± SD)				
	R_0	T (day)	DT (day)	λ	r_m
10.0	4.54 ± 1.37c	33.75 ± 1.06a	15.18 ± 3.12a	1.05 ± 0.009e	0.04 ± 0.008e
15.0	17.99 ± 2.97b	21.74 ± 1.41b	5.21 ± 0.19b	1.14 ± 0.005d	0.13 ± 0.005d
20.0	34.40 ± 5.29a	17.16 ± 0.67c	3.36 ± 0.16c	1.23 ± 0.012c	0.21 ± 0.009c
25.0	30.99 ± 5.43a	10.11 ± 0.65d	2.04 ± 0.08e	1.41 ± 0.021a	0.34 ± 0.014a
30.0	9.11 ± 4.16d	8.45 ± 0.92e	2.60 ± 0.55d	1.30 ± 0.067b	0.26 ± 0.052b
32.5	9.61 ± 2.73d	6.53 ± 0.45f	1.99 ± 0.18e	1.41 ± 0.044a	0.34 ± 0.031a

Means followed by the same letter in a column are not significantly different using Student's t-test for pairwise group comparison at $P < 0.05$. R_0 : net reproductive rate, T: Mean generation time, DT: Doubling time, λ : Finite rate of increase, r_m : Intrinsic rate of increase.

대기간(T)는 32.5°C (6.5일)에서 가장 짧았으며 온도가 내려갈수록 길어지는 경향을 보였다. 개체군밀도가 두 배로 증가하는데 걸리는 시간(DT)도 32.5°C (1.9일)에서 가장 짧았으며 온도가 내려갈수록 더 많은 시간이 필요하였다. 기간증가율과 내적 자연증가율은 25와 32.5°C에서 다른 온도조건보다 높은 값을 보여주어 이 온도범위가 개체군밀도 증가에 유리한 조건임을 나타내었다.

고찰

본 연구를 통해 갯끈동부에서 아카시아진딧물 약충의 온도 발육과 온도발육모형, 발육완료분포모형, 성충의 수명과 산자수 및 생명표 매개변수를 확인하였다. 약충의 발육기간과 성충의 수명은 온도가 증가할수록 짧아지는 경향을 보였는데 Kuo and Chen (2004)의 결과와 유사하였다(Tables 1 and 6). Kuo and Chen (2004)은 35°C에서 약충의 발육기간이 다시 길어지고 있음을 보여주었는데 본 연구 결과도 유사하였다. 25°C에서 Jalalipour et al. (2017)의 약충발육기간(7.8일)과 성충수명(16.4일)은 본 실험의 결과(5.6일과 10.5일)보다 길었다. 이러한 결과는 Kuo and Chen (2004)은 우리와 같은 *V. sesquipedalis*를 기주로 사용하였고 Jalalipour et al. (2017)은 *Robinia pseudoacacia* L.을 기주로 실험을 실시하였기 때문에 다른 결과를 얻은 것으로 사료된다. 일반적으로 곤충의 수명은 저온에서 상대적으로 길다고 알려졌지만 본 연구의 결과와 Kuo and Chen (2004)의 경우 10°C에서 성충의 수명이 15와 20°C에서

보다 짧았다. 이러한 결과는 Park et al. (2016)이 발표한 기장테두리진딧물에서도 찾아볼 수 있다. Berberet et al. (2009)의 경우 실험 온도가 8.3~29.4°C 범위에서 온도가 증가할수록 성충 수명이 짧아지는 경향을 보여주었다. 같은 종이라도 섭취한 기주식물과 지역적인 개체군의 차이에 따라 다른 결과를 보여줄 수 있다. Park et al. (2016)은 옥수수를 Park et al. (2017b)은 보리를 먹이로 하여 기장테두리진딧물의 온도발육 특성을 조사하였다. 보리를 먹이로 한 기장테두리진딧물은 같은 실험온도 조건에서 유충발육기간은 짧았고 성충 수명은 길었으며 암컷당 산자수는 많았다. 싸리수염진딧물의 경우 기주 식물: 콩, 팥, 가지, 회향에 따라 약충의 발육기간이 차이가 있음을 보여주었다(Kim et al., 1991; Jandricic et al., 2010). 아카시아진딧물 약충발육단계별 직선선형회귀를 이용한 발육영점온도의 범위는 2.73~7.68°C였다(Table 2). Kuo and Chen (2004)이 제시한 대만 개체군의 발육영점온도 범위는 5.7~7.8°C였다. 직선회귀식을 이용하여 Kuo and Chen (2004)와 Berberet et al. (2009)이 제시한 전체약충발육기간의 발육영점온도는 각각 7.4°C와 7.1°C로 우리의 결과(5.3°C)보다 높았다. 이러한 결과는 실험에 이용된 아카시아진딧물 개체군이 서식했던 지역적인 특성 즉 Kuo and Chen (2004)은 대만 국립중흥대학(24°11'N) 주변에서 서식하고 있었던 개체군을 이용하였으며 Berberet et al. (2009)은 미국 오클라호마주 페인 카운티 알팔파재배지역(36°08'N)에서 채집한 아카시아진딧물을 이용하여 알팔파(*Medicago sativa* L.)를 먹이로 실험을 실시하였기 때문인 것으로 사료된다. 선형함수가 가지고 있는 해석상의 한계를 극복

Table 6. Temperature-dependent development data of *Aphis craccivora* and source references in previous studies

Temperature (°C)	Developmental periods of nymphs	Adult longevity	Adult fecundity	Host plant	Country	Reference
10	28.1	20.5	6.0	Asparagus bean	Taiwan	Kuo and Chen (2004)
12.8	17.4	38.4	63.1	Alfalfa	United States	Berberet et al. (2009)
15	13.2	42.2	86.4	Asparagus bean	Taiwan	Kuo and Chen (2004)
18.3	8.8	32.2	82.7	Alfalfa	United States	Berberet et al. (2009)
20	9.0	23.6	82.2	Asparagus bean	Taiwan	Kuo and Chen (2004)
23.9	5.9	19.3	82.1	Alfalfa	United States	Berberet et al. (2009)
25	5.3	16.4	97.1	Asparagus bean	Taiwan	Kuo and Chen (2004)
25	7.8	16.4	21.0	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Iran (Lab)	Jalalipour et al. (2017)
16-32	8.7	12.6	13.6	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Iran (Field)	Jalalipour et al. (2017)
29.4	4.4	14.7	70.7	Alfalfa	United States	Berberet et al. (2009)
30	4.2	10.8	62.7	Asparagus bean	Taiwan	Kuo and Chen (2004)
35	4.7	6.2	5.7	Asparagus bean	Taiwan	Kuo and Chen (2004)

하기 위해 비선형함수 SSI를 이용하였다. SSI함수를 이용하여 얻은 TL과 TH값의 차이를 이용하여 아카시아진딧물의 서식 가능 온도범위를 추정하였는데 대만 개체군의 범위(28.8℃)가 본 결과(17.5℃)보다 넓음을 보여주었다. 이는 대만 개체군이 저온 및 고온조건에 내성이 높음을 나타내는 것으로 추정된다.

아카시아진딧물 성충의 산자수는 20℃에서 가장 높았는데 (44.7) 이러한 결과는 Berberet et al. (2009)의 온도별 산자수 경향과 유사하였으나 암컷당 산자수에는 차이가 있었다. Kuo and Chen (2004)은 25℃에서 가장 많은 산자수(97.1)를 생산하는 것으로 보고하였다. 같은 온도조건에서 산자수의 차이는 이들이 섭취한 먹이식물의 영양소 차이에서 오는 결과로 추정되는데 특히 질소성분의 영향을 추후 연구에서는 조사할 필요가 있다(Barnes et al., 2008).

순증가율은 다음 세대에 암컷 한 마리당 남길 수 있는 자손 수를 의미하는 것으로 제한된 환경조건에서 개체군의 수용능력을 표시한다. 본 결과에서는 20℃에서 가장 높은 값(34.4)을 보여 주었는데 Kuo and Chen (2004)은 25℃에서 가장 높은 개체군순증가율(97.1)을 보여주었다. 한편, Jalalipour et al. (2017)는 25℃에서 21.03의 개체군순증가율을 보고하였다. Kuo and Chen (2004)은 20℃에서 우리의 결과보다 높은 값(82.2)을 보고하였는데 같은 온도에서 대만 개체군의 증가율은 우리보다 2.4배 높은 것으로 해석되었다. 평균세대기간은 온도가 증가할수록 감소하였는데 Kuo and Chen (2004)도 같은 결과를 보고하였다. 본 결과에서 내적자연증가율은 온도가 15(에서 25℃)로 올라갈 때 0.13에서 0.34로 2.5배 이상 증가하였는데 Kuo and Chen (2004)의 결과도 유사하였다(15℃에서 0.17, 25℃에서 0.42). 한편, 25℃에서 Jalalipour et al. (2017)의 결과(0.23)는 본 결과보다 낮았다.

이 연구에서 제시한 생물적 자료와 수학적 모델들은 아카시아진딧물의 개체군동태와 관련된 개체군모형을 구축하고 생물계절학을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 본다. 이를 통해 야외조건에서 아카시아진딧물의 출현 시기를 예측하고, 개체군동태를 이해할 수 있을 뿐 아니라 아카시아진딧물 종합관리전략을 수립하는데 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 시험연구사업 “(PJ010945) 응애, 나방류 등 난방제 해충 방제용 토착 및 도입천적 자원탐색”, “(PJ012060) 기온 및 대기 중 이산화탄소 변화가 노린재류 해충에 미치는 영향 연구”의 지원에 의하여 수행되었다.

Literature Cited

- Agunbiade, T.A., Sun, W., Coates, B.S., Djouaka, R., Tamo, M., Ba, M.N., Binso-Dabire, C., Baoua, I., Olds, B.P., Pittendrigh, B.R., 2013. Development of reference transcriptomes for the major field insect pests of cowpea: A toolbox for insect pest management approaches in West Africa. PLoS ONE 8(11), e79929.
- Barnes, A.I., Wigby, S., Boone, J.M., Partridge, L., Chapman, T., 2008. Feeding, fecundity and lifespan in female *Drosophila melanogaster*. Proc. R. Soc. B. 275, 1675-1683.
- Berberet, R.C., Giles, K.L., Zarrabi, A.A., Payton, M.E., 2009. Development, reproduction and within-plant infestation patterns of *Aphis craccivora* (Homoptera: Aphididae) on Alfalfa. Environ. Entomol. 38(6), 1765-1771.
- Borowiak-Sobkowiak, B., Durak, R., Wilkaniec, B., 2017. Morphology, biology and behavioral aspects of *Aphis craccivora* (Hemiptera: Aphididae) on *Robinia pseudoacacia*. Acta. Sci. Pol. Hortorum Cultus. 16(1), 39-49.
- Campbell, A., Frazer, B.D., Gilbert, N., Gutierrez, A.P., Mackauer, M., 1974. Temperature requirements of some aphids and their parasites. J. Appl. Ecol. 11(2), 431-438.
- Chang, Y-D., Youn, Y-N., 1983. A study on the biology of primary parasites of the cow-pea aphid, *Aphis craccivora* Koch (Aphididae, Homo.) and its hyperparasites. Korean J. Plant Prot. 22(4), 237-243.
- Dixon, A.F.G., Honěk, A., Kell, P., Kotela, M.A.A., Šizling, A.L., Jarošik, V., 2009. Relationship between the minimum and maximum temperature thresholds for development in insects. Funct. Ecol. 23, 257-264.
- Gutierrez, A.P., Morgan, D.J., Havenstein, D.E., 1971. The ecology of *Aphis craccivora* Koch and subterranean clover stunt virus. I. The phenology of aphid populations and the epidemiology of virus in pastures in South-East Australia. J. Appl. Ecol. 8(3), 699-721.
- Ikemoto, T., 2005. Intrinsic optimum temperature for development of insects and mites. Environ. Entomol. 34(6), 1377-1387.
- Jalalipour, R., Sahragard, A., Madahi, Kh., Karimi-Malati, A., 2017. Comparative life table of *Aphis craccivora* (Hem.: Aphididae) on host plant, *Robinia pseudoacacia* under natural and laboratory conditions. J. Entomol. Soc. Iran 36(4), 249-257.
- Jandel Scientific, 1994. TableCurve User's Manual San Rafael, CA.
- Jandricic, S.E., Wraight, S.P., Bennett, K.C., Sanderson, J.P., 2010. Developmental times and life table statistics of *Aulacorthum solani* (Hemiptera: aphididae) at six constant temperatures, with recommendations on the application of temperature-dependent development models. Environ. Entomol. 39(5), 1631-1642.
- Javed, H., Iqbal, J., Mateen, Z., 2014. Response of different cultivars of groundnut, *Arachis hypogaea* L. (Fabaceae: Fabales) to Aphids, *Aphis craccivora* K. (Aphididae: Homoptera) in interaction with local weather factors. Pak. J. Zool. 46(1), 75-81.

- Kim, D-H., Lee, G-H., Park, J-W., Hwang, C-Y., 1991. Occurrence aspects and ecological characteristics of foxglove aphid, *Aulacorthum solani*, Kaltentbach (Homoptera: Aphididae) in soybean. Res. Rept. RDA (Crop Prot.) 33, 28-32.
- Kim, D-S., Ahn, J.J., Lee, J-H., 2017. A review for non-linear models describing temperature dependent development of insect populations: characteristics and developmental process of models. Korean J. Appl. Entomol. 56(1), 1-18.
- Kuo, M-H., Chen, C-Y., 2004. Development and population parameters of the cowpea aphid, *Aphis craccivora* Koch (Homoptera: Aphididae), at various constant temperatures. Formosan Entomol. 24, 305-315.
- Laamari, M., Khelfa, L., Coeur d'Acier, A., 2008. Resistance source to cowpea aphid (*Aphis craccivora* Koch) in broad bean (*Vicia faba* L.) Algerian landrace collection. Afr. J. Biotechnol. 7(14), 2486-2490.
- Machacha, M., Obopile, M., Tshogofatso, A.B.N., Tiroesele, B., Gwafila, C., Ramokapane, M., 2012. Demographic parameters of cowpea aphid *Aphis craccivora* (Homoptera: Aphididae) on different Botswana cowpea landraces. Int. J. Trop. Insect Sc. 32(4), 189-193.
- Maia, A.H.N., Luiz, A.J.B., Campanhola, C., 2000. Statistical inference on associated fertility life table parameters using Jackknife technique: computational aspects. J. Econ. Entomol. 93(2), 511-518.
- Meyer, J.S., Ingersoll, C.G., McDonald, L.L., Boyce, M.S., 1986. Estimating uncertainty in population growth rates: Jackknife vs. bootstrap techniques. Ecology 67(5), 1156-1166.
- Nair, R.M., Craig, A.D., Auricht, G.C., Edwards, O.R., Robinson, S.S., Otterspoor, M.J., Jones, J.A., 2003. Evaluating pasture legumes for resistance to aphids. Aust. J. Agric. Res. 43(11), 1345-1349.
- Obopile, M., Ositile, B., 2010. Life table and population parameters of cowpea aphid, *Aphis craccivora* Koch (Homoptera: Aphididae) on five cowpea *Vigna unguiculata* (L. Walp.) varieties. J. Pest Sci. 83(1), 9-14.
- Park, C-G., Choi, B-R., Cho, J.R., Kim, J-H., Ahn, J.J., 2017b. Thermal effects on the development, fecundity and life table parameters of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) (Hemiptera: Aphididae) on barley. J. Asia-Pacific Entomol. 20(3), 767-775.
- Park, C-G., Park, H-H., Seo, B.Y., 2017a. Temperature-dependent oviposition model and life table parameters of *Parominus exigus* (Distant) (Hemiptera: Lygaeidae) growing on rice. Korean J. Appl. Entomol. 56(4), 387-394.
- R Statistics, 2015. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria.
- Sainsbury, F., Canizares, M.C., Lomonosoff, G.P., 2010. Cowpea mosaic virus: the plant virus-based biotechnology workhorse. Annu. Rev. Phytopathol. 48, 437-455.
- SAS Institute, 2002. SAS user's guide; statistics version 9.1ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Saska, P., Skuhrovec, J., Lukas, J., Vlach, M., Chi, H., Tuan, S-J., Honek, A., 2017. Treating prey with glyphosate does not alter the demographic parameters and predation of the *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). J. Econ. Entomol. 110(2), 392-399.
- Schoolfield, R.M., Sharpe, P.J.H., Magnuson, C.E., 1981. Non-linear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory. J. Theor. Biol. 88(4), 719-731.
- Sharpe, P.J.H., DeMichele, D.W., 1977. Reaction kinetics of poikilotherm development. J. Theor. Biol. 64(4), 649-670.
- Shi, P-J., Reddy, G.V.P., Chen, L., Ge, F., 2017. Comparison of thermal performance equations in describing temperature-dependent developmental rates of insects: (II) two thermodynamic models. Ann. Entomol. Soc. Am. 110(1), 113-120.
- Soffan, A., Aldawood, A.S., 2014. Biology and demographic parameters of cowpea aphid (*Aphis craccivora*) on faba bean (*Vicia faba*) cultivars. J. Insect Sci. 14, 1-10.
- Stoetzel, M.B., Miller, G.L., 2001. Aerial feeding aphids of corn in the United States with reference to the root-feeding *Aphis maidiradicis* (Homoptera: Aphididae). Fla. Entomol. 84(1), 265-277.
- Sugawara, R., Ullah, M. S., Ho, C-C., Gokce, A., Chi, H., Gotoh, T., 2017. Temperature-dependent demography of two closely related predatory mites *Neoseiulus womersleyi* and *N. longispinosus* (Acari: Phytoseiidae). J. Econ. Entomol. 110(4), 1533-1546.
- Van der Have, T.M., 2002. A proximate model for thermal tolerance in ectotherms. Oikos 98(1), 141-155.
- Wagner, T.L., Wu, H.I., Sharpe, P.J.H., Schoolfield, R.M., Coulson, B.N., 1984. Modeling insect development rates: A literature review and application of a biophysical model. Ann. Entomol. Soc. Am. 77(2), 208-225.
- Weibull, W., 1951. A statistical distribution functions with wide applicability. J. Appl. Mech. 18, 293-297.