

열대거세미나방 발육에 미치는 온도의 영향

문형철* · 최민경 · 장수지 · 이장호 · 김주희 · 전형권

전라북도농업기술원 농업환경과

The Effect of Temperature on the Development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)

Hyung Cheol Moon*, Min Kyung Choi, Su Ji Jang, Jang Ho Lee, Ju Hee Kim and Hyong Gwon Chon

Agricultural Environment Division, Jeonbuk Agricultural Research and Extension Services, Iksan 54591, Korea

ABSTRACT: Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, is a invasive migratory pest of native to the tropical and sub-tropical regions that has recently invaded Korea with damage to cornfield. The study was conducted to investigate the development periods of *S. frugiperda* on artificial diet at six different temperatures. The developmental period from eggs to adult at 18, 21, 24, 27, 30 and 32°C was 79.8, 54.2, 34.3, 28.4, 24.6 and 24.0 days, respectively and decreased with increasing temperature. The pupal periods of females were shorter than males. Most of the larvae developed through six instar, but the ratio of 7 or more instar increased at low temperatures. The relationship between the development rate and temperature was fitted with by linear regression analysis. The lower development threshold for egg and larva development was 12.9°C and 11.3°C, respectively, 12.6°C for pupae and 11.8°C for egg-to-adult development. The effective accumulative temperature for the development of the respective life cycle stages were 37.0 DD for eggs, 286.3 DD for larvae, 132.2 DD for pupae and 456.8 DD egg-to-adult development.

Key words: *Spodoptera frugiperda*, Temperature, Development, Effective accumulative temperature

초 록: 열대 및 아열대성 비래해충으로 최근 국내에도 옥수수에 피해를 주고 있는 열대거세미나방의 온도별 발육특성을 인공먹이를 이용하여 사육하며 조사하였다. 18, 21, 24, 27, 30, 32°C 항온조건에서 알에서 성충까지의 발육하기까지 각각 79.8, 54.2, 34.3, 28.4, 24.6, 24.0일이 소요되어 온도가 증가할수록 발육기간이 짧아졌다. 암컷 번데기의 발육기간은 수컷보다 짧았다. 유충은 보통 6령까지 발육하였으나 저온에서 7령 이상의 비율이 증가하였다. 온도에 따른 발육은 직선회귀에 부합하였으며, 직선회귀식을 이용하여 각 발육단계별 발육영점온도와 유효적산온도를 분석한 결과, 알은 12.9°C와 37.0 DD, 유충은 11.3°C와 286.3 DD, 번데기는 12.6°C와 132.2 DD, 알에서 성충까지는 11.8°C와 456.8 DD 였다.

검색어: 열대거세미나방, 온도, 발육, 유효적산온도

열대거세미나방(*Spodoptera frugiperda*)(나비목: 밤나방과)은 아메리카 대륙의 열대 및 아열대 지역이 원산지로 알려진 해충으로 높은 비행능력을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데 (Goergen et al., 2016), 2016년에 아프리카로 전파되어 사하라 사막 이남의 30개국에서 발생이 보고되었으며, 2018년과 2019년에는 인도, 태국, 미얀마, 중국, 일본, 호주 등으로 빠르게 확산되고 있다(Du Plessis et al., 2020; Lee et al, 2020). 열대거세

미나방은 벼, 옥수수, 양배추, 콩, 양파, 토마토 등 76과 353종의 식물을 가해하는 광식성 해충으로 선호하는 기주식물에 따라 옥수수, 목화, 수수를 선호하는 옥수수 계통(corn strain)과 벼와 다양한 목초를 선호하는 벼 계통(rice strain)으로 구분된다 (Dumas et al., 2015). 이 해충은 주로 옥수수 등에 많은 피해를 주고 있는데(Lee et al., 2020), 영양생장기에는 주로 정단부 잎과 싹초 등을 갹아먹어 생육을 저해하고 생식생장기에는 수술과 옥수수 열매 등을 가해하여 생산량을 감소시킨다. 열대거세미나방이 다발생하고 있는 아프리카 대륙의 에디오피아와 케냐에서 각각 934 kg/ha와 1,381 kg/ha의 수량 감소가 예상되고

*Corresponding author: hch0808@korea.kr

Received February 11 2022; Revised April 6 2022

Accepted May 23 2022

Table 1. The composition of artificial diets used for rearing *Spodoptera frugiperda*

Ingredients	Chickpea	Wheat germ	Sunflower oil	Sorbic acid	Ascorbic acid	Yeast	Agar	Distilled water
Content	83 g	20 g	8 ml	1.6 g	5 g	21 g	25 g	700 ml

(Kumela et al., 2018), 가나, 잠비아, 짐바브웨에서는 옥수수 수량이 각각 45%, 40%, 11.57% 정도 감소할 것으로 예측되고 있어(Day et al., 2017; Baudron et al., 2019) 경제적으로 큰 문제가 되고 있다. 국내에서는 2019년 6월 13일 제주도 옥수수 포장에서 처음 발견되었으며 이후 제주, 전남, 전북, 경남 등의 옥수수 포장에서 발생하여 피해주율이 제주도에서는 약 5%, 전북 등 남부지역에서는 1% 이하이었다(Lee et al., 2020). 2020년에도 5월부터 비래하여 옥수수 포장을 중심으로 전국적으로 발생함에 따라, 해마다 비래에 의한 피해가 확산될 것으로 전망되고 있다. 이에따라 Seo et al. (2020)은 성페로몬을 이용한 성충 예찰효과를 분석하였으며, Jung et al. (2020)은 수원 지역에서 성페로몬트랩을 이용한 연중 밀도변동자료와 온도에 따른 발육과 생식 모델, 국내 유충 발생시기 등을 고려하여 연중 4회 성충이 발생할 수 있을 것으로 추정하였다.

온도는 곤충의 발생시기, 발생밀도, 분포, 행동, 생존, 발육, 계절적 출현 등에 영향을 미치는 중요한 비생물학적 요인으로 (Zhu et al., 2018; Huang et al., 2021), 최적 온도 이상 또는 그 이하의 온도는 이동을 제한하고 발육, 생식, 생존 등을 억제하는 등 다양한 부정적인 영향을 주기도 한다(Du Plessis et al., 2020). 또한 온도는 유충 령기별 발육기간 뿐만 아니라 유충의 탈피 횟수에도 영향을 주기도 한다(Aguilon and Velasco, 2015).

열대거세미나방은 국내에서 월동이 불가능할 것으로 추정됨에 따라 비래 이후의 온도 조건에 따라 첫 유충 출현시기 및 세대 증식속도가 달라진다. 비래해충의 경우 비래 후 시간에 따른 밀도변동과 총태의 변화를 정확하게 예측하는 중요한 정보가 되는데 이를 위해 많이 사용되는 방법은 유효적산온도를 이용하거나 온도에 따른 발육률 적산에 기초한 개체군 밀도변동 모델을 이용하는 것이다(Park et al., 2013). 따라서 본 연구는 비래해충인 열대거세미나방의 온도에 따른 각 태별 발육 기간을 조사하여 발육영점온도와 유효적산온도를 산출하여 방제를 위한 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험곤충 채집 및 증식

열대거세미나방은 2019년 6~9월에 전북 지역 옥수수 포장

에서 발생하고 있는 유충을 채집하여 전라북도농업기술원 곤충사육실(25±2°C, L:D=14:10)에서 인공먹이와 수수를 이용하여 누대 사육하며 시험에 이용하였다. 부화 유충을 원형페트리디쉬(Ø 10 x 4 cm)에서 20~30마리정도 집단사육하며 령기가 진행됨에 따라 페트리디쉬 당 사육 유충수를 조절하여 5령 이후에는 2~3마리 정도로 유지하였다. 유충 사육에 이용한 인공먹이는 ARC-RSA diet (Prasanna et al., 2018)를 기본으로 하여 조절하였으며, 냉장보관하며 작은 조각으로 잘라서 유충에게 공급하였다. 조성표는 Table 1과 같다.

각 태별 발육기간

온도에 따른 열대거세미나방의 각 태별 발육기간은 인공먹이를 이용하여 조사하였다. 알 발육기간을 조사하기 위하여 각 온도별로 원형사육통(Ø 10 × 8 cm)에 성충 1쌍을 접종한 후 24시간 간격으로 산란용기를 교체하여 주며 산란시켰고, 특별한 산란처는 제공하지 않았다. 부화 유무는 매일 아침 9시경에 조사하였다. 유충 기간은 부화 1일 이내의 어린 유충을 부드러운 붓으로 1마리씩 작은 원형페트리디쉬(Ø 4 × 1.5 cm)로 옮겨 4령까지 사육한 후 5령부터는 큰 원형페트리디쉬(Ø 10 × 4 cm)로 옮겨 용화할 때까지 인공먹이를 이용하여 사육하며 조사하였다. 먹이는 건조되지 않도록 매일 교체하여 주었다. 유충 령기는 탈피각의 유무를 매일 오전 10시경에 확인하여 조사하였다. 번데기는 원형페트리디쉬에 보관하며 우화여부를 매일 오전 10시경에 조사하였다. 실험은 18, 21, 24, 27, 30, 32±1°C와 광주기 14:10(L:D)으로 조절된 항온기(비전과학)에서 수행하였다.

발육영점온도 및 유효적산온도

각 발육단계별로 사육온도별 평균 발육기간을 발육속도(1/발육기간)로 변환한 후 온도와 발육속도와의 직선회귀식을 구한 다음 이 식으로부터 발육속도가 0이 되는 온도 값을 찾아 발육영점온도를 산출하였고, 기율기의 역수값을 유효적산온도로 계산하였다.

통계분석

온도와 각 태별 발육기간의 유의성 분석은 분산분석(ANOVA)을 실시하였고 평균간 비교는 Tukey 검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

각 태별 발육기간

온도에 따른 열대거세미나방의 알 기간을 조사한 결과(Table 2), 18°C에서 7.0일로 가장 길었고, 21°C에서 5.7일, 24~32°C에서 2~3일로 온도가 높을수록 발육기간이 짧아졌다(df = 5, F = 104.41, P < 0.0001). Du Plessis et al. (2020)는 열대거세미나방의 알 기간이 26~32°C 범위에서 2.0~3.0, 22°C에서 4.0일, 18°C에서 6.38일이라고 하였고, Huang et al. (2021)은 25~31°C에서 2~3일, 19°C에서 7.5일로 온도가 높을수록 발육기간이 짧아진다고 하였다. 또한 알 기간이 25°C에서 2~3일인 연구 보고가 많았는데(Montezano et al., 2019; Jung et al., 2020; He et al., 2021b) 본 결과도 같은 경향을 보였다. 파밤나방(*Spodoptera exigua*)의 알 기간이 20, 25, 30°C에서 각각 5.8일, 3.4일, 2.2일(Choi and Park, 2000), 담배거세미나방(*Spodoptera litura*)의 알 기간은 24, 28, 32°C에서 각각 4.4일, 3.9일, 3.0일(Bae et al., 1997)로 보고되어 열대거세미나방의 알 기간은 같은 속에 속하는 두 종과 비슷하거나 약간 짧았다.

인공먹이로 사육한 열대거세미나방의 유충 기간은(Table 2) 24°C에서 20.2일, 30~32°C에서 14.9일로 온도가 높을수록 발육기간이 짧았으며 18°C에서의 발육기간이 45.6일로 다른 온도에 비하여 현저하게 길었다(df = 5, F = 80.21, P < 0.0001). 옥수수를 먹이로 하여 사육한 열대거세미나방 유충 발육기간으로 Du Pless et al. (2020)는 18~32°C에서 34.4~10.5일, Huang

et al. (2021)은 19~31°C에서 11~40일 정도라고 보고하여 본 결과보다 발육기간이 짧았다. 그러나 20°C 이하의 온도에서 유충 발육기간이 다른 온도에 비하여 매우 길었다고 하여 본 조사 결과와 같은 경향이었다. Pantoja et al. (1987)은 인공먹이와 벼잎을 이용한 열대거세미나방 유충의 발육 기간 범위가 각각 14.9~16.7일, 17.5~19.1일, Murua et al. (2008)은 옥수수, 알팔파, 콩, 밀에서의 유충 발육기간이 각각 18.2일, 16.5일, 19.2일, 12.2일, He et al. (2021a)은 인공먹이, 옥수수, 수수, 밀에서 유충 발육기간이 각각 14.1일, 15.4일, 19.4일, 18.4일, Wu et al. (2021)은 옥수수, 토마토, 고추에서의 유충 발육기간이 각각 15.2일, 21.2일, 25.2일이라고 보고하여 먹이 조건에 따라 유충 발육기간이 달라짐을 알 수 있었다. 담배거세미나방 유충 발육기간은 24°C, 28°C 및 32°C에서 각각 23.6~30.4일, 18.6~22.3일, 14.5~18.9일(Bae et al., 1997), 파밤나방 유충 발육기간은 20°C, 25°C 및 30°C에서 각각 27.5~36.3일, 13.8~17.3일, 10.0~14.8일(Lee et al., 1991; Choi and Park, 2000; Lee and Park, 2021)로, 열대거세미나방 유충의 발육기간은 담배거세미나방에 비하여 짧고, 파밤나방보다는 25°C 이상의 온도에서 길어지는 경향이었다.

열대거세미나방의 번데기 기간은(Table 2) 27°C 이상의 온도에서 7.1~8.7일, 21°C에서 15.5일, 18°C에서 27.2일로 온도가 높을수록 짧아졌다(df = 5, F = 458.84, P < 0.0001). 열대거세미나방을 번데기 기간은 25°C에서 Wu et al. (2021)은 옥수수에서 10.1일, 토마토 10.5일, 고추 10.3일, He et al. (2021a)은 인공먹이에서 9.9일, 옥수수 9.8일, 수수 10.6일, Jung et al. (2020)은 인공먹이로 사육할 때 8.1~9.5일이라고 보고하여 본 조사 결과와 큰 차이는 없었다. 그러나 Du Pless et al. (2020)는 18~32°C에서 7.8~30.7일이라고 하여 본 결과보다 발육기간이 길었다. 담배거세미나방의 번데기 기간이 15, 20, 25, 30°C에서 각각 31.0일, 16.0일, 12.0일, 9.0일(Fand et al., 2015), 파밤

Table 2. Mean duration of developmental stages of *Spodoptera frugiperda* on artificial diets at six different temperature

Temp. (°C)	Development periods (days±SD)			
	Egg	Larvae	Pupae	Egg to adult
18	7.0±0.50(100) ¹ a ²	45.6±6.17(86)a	27.2±2.82(28)a	79.8
21	5.7±0.58(90)b	33.0±5.28(85)b	15.5±1.92(49)b	54.2
24	3.0±0.00(105)c	20.2±1.43(99)c	11.2±1.16(76)c	34.3
27	2.5±0.50(62)cd	17.2±1.65(57)cd	8.7±1.06(54)d	28.4
30	2.2±0.29(120)d	14.9±1.78(115)d	7.6±0.75(99)e	24.6
32	2.0±0.00(120)d	14.9±1.98(102)d	7.1±0.95(78)e	24.0

¹The values in parenthesis indicate sample size.

²Means followed by the same letter within a column are not significantly different (P > 0.05).

나방의 번데기 기간은 20, 25, 30°C에서 각각 15.9일, 6.1일, 5.3일(Lee and Park, 2021)으로 보고되어 열대거세미나방이 번데기 기간 역시 담배거세미나방보다 길고 파밤나방 보다 짧은 경향이였다.

암컷과 수컷의 발육기간을 조사한 결과(Table 3), 21, 24, 27°C에서 암컷 유충 발육기간이 수컷보다 약간 짧았으나 유의성은 없었다. 번데기기간은 모든 시험온도에서 암컷 발육기간이 수컷보다 짧았으나 24°C와 27°C에서만 통계적 유의성이 있었다. Jung et al. (2020)은 인공먹이를 이용하여 사육한 결과 암컷 유충 발육기간이 수컷보다 통계적으로 유의성은 없으나 약간 짧았고, 번데기기간은 암컷이 수컷보다 유의하게 짧다고 하였다. Huang et al. (2021)은 유충 기간의 경우 19°C를 제외하고 큰 차이가 없었으나 번데기 기간은 암컷이 수컷보다 짧다고 보고하였고, Montezano et al. (2019)는 암컷 유충의 5~6령 발육기간이 수컷보다 길었으나 번데기 발육기간은 수컷이 암컷보다 길어 총 발육기간은 암수 차이가 없다고 하여, 본 조사 결과와 유사한 경향이였다.

열대거세미나방의 용화율과 우화율을 조사한 결과(Fig. 1) 27°C이상의 온도에서는 92% 이상이 용화되었으나 18°C와 21°C에서 각각 66.2%와 76.6%만이 용화되었고, 우화율은 27°C에서 94.7%, 30°C에서 84.0%로 높았으나 21°C와 18°C에서는 각각 57.6%와 34.9%로 저온에서의 생존율이 낮았다. Jung et al. (2020)은 25°C와 28°C에서의 용화율은 97.8%와 68.9%, 우화율은 92.0%와 95.2%로 이었고, Montezano et al. (2019)는 25°C에서 유충과 번데기 생존율이 각각 98.3%와 97.9%로 높

았다고 하였으며 He et al. (2021a)은 25°C에서 유충 먹이 종류에 따른 용화율은 76.6~94.1%, 우화율은 86.3~95.3% 정도라고 하였다. Du Plessis et al. (2020)은 30°C와 26°C에서의 유충 사망률이 각각 4%와 15%로 낮았으나 18°C에서는 유충 사망률이 71%로 매우 높아 열대거세미나방 유충 발육에 부적합한 온도라고 하였고, Huang et al. (2021)은 19~31°C에서의 열대거세미나방 유충과 번데기의 생존율이 각각 90.4%와 76.6% 이상이었으며 19°C에서의 생존율이 다른 온도에 비하여 낮았다고 하였다. 본 조사 결과에서도 다른 시험온도보다 21°C이하의 온도에서 용화율과 우화율이 낮아 같은 경향이였다.

열대거세미나방 유충의 탈피 횟수를 조사한 결과(Table 4) 사육온도에 따라 5~8령까지 발육하였으나, 모든 시험온도에서 6령까지 발육하는 유충 비율이 높아 열대거세미나방 유충은 5

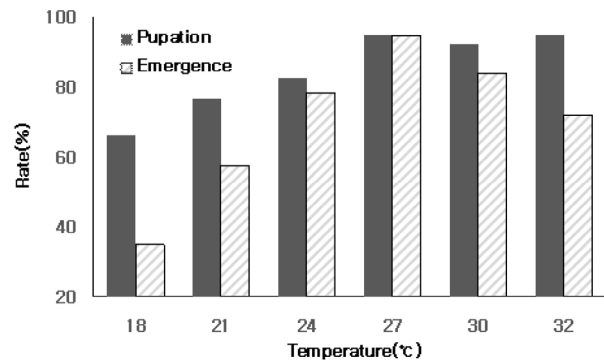


Fig. 1. Pupation rate and emergence rate of *Spodoptera frugiperda* reared on artificial diets at six different temperature.

Table 3. Mean duration of developmental stages of female and male *Spodoptera frugiperda* reared on artificial diets at six different temperature

Temp.(°C)	Sex	No. of larvae analyzed	Larvae (days±SD)	Pupae (days±SD)
18	Female	12	45.1±7.45ns ¹	25.8±2.56ns
	Male	16	45.1±7.04ns	28.3±2.55ns
21	Female	29	32.4±5.05ns	14.9±1.81ns
	Male	16	32.9±5.45ns	16.6±1.89ns
24	Female	44	20.0±1.48ns	10.6±0.87
	Male	27	20.3±1.35ns	12.0±0.65*
27	Female	24	17.0±1.46ns	7.9±0.61
	Male	30	17.4±1.79ns	9.3±0.92*
30	Female	48	14.6±1.53ns	7.3±0.68ns
	Male	51	14.6±1.59ns	7.9±0.71ns
32	Female	36	14.7±2.03ns	6.9±0.91ns
	Male	33	14.8±2.92ns	7.3±0.74ns

¹Two sample t-test was conducted: ns = not significant, * significant at p = 0.05 and ** significant at p = 0.01.

Table 4. Percentage of larval instar stages of *Spodoptera frugiperda* reared on artificial diets at six different temperature

Temp. (°C)	No. of tested	Percentage of larval instar stages			
		5th larva	6th larva	7th larva	8th larva
18	86	0.0	58.1	40.7	1.2
21	86	1.2	76.7	17.4	4.7
24	99	2.0	92.9	5.1	0.0
27	57	1.8	91.2	7.0	0.0
30	117	13.7	72.6	13.7	0.0
32	112	26.8	59.8	13.4	0.0

Table 5. Developmental periods of larval instars of *Spodoptera frugiperda* reared on artificial diets at six different temperature

Temp. (°C)	No. of larvae analyzed	Larval instars (days±SD)					
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
18	50	5.8±1.33bc ¹	4.7±1.23d	5.3±0.86cd	5.7±1.38bcd	6.4±1.17b	14.1±1.59a
21	66	4.3±1.16bc	3.8±0.63c	3.6±0.63c	3.4±0.68c	4.8±1.23b	8.9±1.24a
24	92	3.3±0.48b	2.6±0.49cd	2.3±0.50d	2.3±0.47d	2.9±0.54bc	6.9±0.89a
27	52	3.2±0.57b	2.1±0.30d	2.0±0.09d	2.0±0.16d	2.5±0.66c	5.0±0.56a
30	85	2.1±0.54b	2.0±0.41b	2.0±0.25b	2.1±0.64b	2.1±0.61b	4.6±0.65a
32	60	2.2±0.46b	1.9±0.50bc	1.8±0.77c	2.0±0.64bc	2.3±0.54b	4.3±0.92a

¹Means followed by the same letter within a column are not significantly different (P>0.05).

회 탈피한다는 보고와 같은 경향이었다(Pencoe and Martin, 1982; Montezano et al., 2019; Du Plessis et al., 2020; Jung et al., 2020). 그러나 30°C와 32°C에서의 5령 비율이 13.7%와 26.8%로 21~27°C에서 보다 높았다. 반면 7~8령비율이 21°C와 18°C에서는 각각 22.1%와 41.9%, 32°C와 30°C에서는 각각 13.4%와 13.7%로 유충 탈피횟수가 저온에서 증가하는 경향이였다. Ali et al. (1990)은 열대겨세미나방 유충이 보통 6령까지 발육하였으나, 17°C에서 9령까지 발육하는 경우가 있고, 25°C와 29°C에서 각각 26.5%와 23.9%가 5령까지 발육한다고 하였다. Montezano et al. (2019)는 부적합한 기주식물이나 저온조건에서 열대겨세미나방 유충의 탈피횟수가 증가한다고 하였으며, 5~10령까지 유충이 발육한다는 연구결과가 있다고 하였다. Yarro (1985)는 비선호작물이나 부적합한 환경조건에서 사육할 때 탈피횟수가 증가할 수 있다고 하였고 기주식물에 따라 유충령기가 증가하는 연구결과가 보고되고 있다(Pencoe and Martin, 1982; Wang et al., 2020). 열대겨세미나방의 발육 적정온도 범위는 26~32°C이고(Du Plessis et al., 2020), 저온에서 사육할 때 유충령기수가 증가할 수 있어(Esperk et al., 2007), 본 실험에서는 21°C 이하의 저온 조건이 열대겨세미나방 발육에 부적합한 요인으로 작용하여 유충 탈피 횟수가 증가한 것으로 판단되

었다. 6령까지 발육하는 유충을 기준으로 온도에 따른 유충령기별 발육기간을 조사한 결과(Table 5) 모든 시험온도에서 6령기간이 가장 길었으며 2~4령기간은 큰 차이가 없었다(18°C: df = 5, F = 127.30, P < 0.0001; 21°C: df = 5, F = 49.83, P < 0.0001; 24°C: df = 5, F = 145.61, P < 0.0001; 27°C: df = 5, F = 214.73, P < 0.0001; 30°C: df = 5, F = 84.87, P < 0.0001; 32°C: df = 5, F = 62.02, P < 0.0001). Jung et al. (2020)은 25°C에서 인공먹이로 열대겨세미나방을 사육한 결과 2~4령 유충기간이 짧은 경향이고 6령기간이 6.0~6.5일로 가장 길었다고 보고하여 본 실험 결과와 같은 경향이였다. 또한 1령기간이 2~4령기간보다 길었고 24~27°C에서는 5령보다도 길었는데, 1령 유충기간이 6령을 제외한 다른 령기보다 길었다는 보고와(Du Plessis et al., 2020; Jung et al., 2020; Wang et al., 2020; He et al., 2021b) 같은 경향이였다.

발육영점온도 및 유효적산온도

열대겨세미나방의 각 태별 발육률은 온도가 높아질수록 빨라지는 직선적 관계를 나타냈는데(Table 6), 18~30°C의 온도 범위에서 열대겨세미나방의 각 태별 발육률이 직선적으로 증

Table 6. Linear regression equations describing the relationship between the development rate and temperature(18-32°C) and the thermal requirements of different developmental stages of *Spodoptera frugiperda* reared on artificial diets

Development stage	Regression model	R ² -value	Lower temperature threshold (°C)	Degree days (DD)
Eggs	y=0.0270x-0.3494	0.9659	12.9	37.0
First instar	y=0.0211x-0.2113	0.9352	10.0	47.4
Second instar	y=0.0236x-0.2048	0.9432	8.7	42.4
Third instar	y=0.0255x-0.2371	0.9020	9.3	39.2
Fourth instar	y=0.0230x-0.1864	0.8420	8.1	43.4
Fifth instar	y=0.0230x-0.2462	0.9144	10.7	43.4
Sixth instar	y=0.0117x-0.1337	0.9794	11.4	85.6
Larval stage	y=0.0035x-0.0395	0.9562	11.3	286.3
Pupal stage	y=0.0076x-0.0951	0.9891	12.6	132.2
Egg-to-adult	y=0.0022x-0.0259	0.9727	11.8	456.8

가하였다는 보고와(Du Plessis et al., 2020) 같은 경향이였다. 온도와 발육률의 관계를 직선회귀식을 이용하여 분석한 결과 알, 유충, 번데기의 발육영점온도는 각각 12.9, 11.3, 12.6°C였으며 유충 령기별 발육영점온도는 각각 10.0, 8.7, 9.3, 8.1, 10.7, 11.4°C였다. Prasad et al. (2021)는 알, 유충, 번데기의 발육영점온도가 각각 12.1°C, 11.0°C, 12.2°C로 보고하여 비슷한 경향이였다. 그러나 Du Plessis et al. (2020)은 각 태별 발육영점온도가 각각 13.0, 12.1, 13.0°C였고, 유충 령기별 발육영점온도는 각각 8.5, 10.6, 13.5, 13.1, 11.2, 14.9°C라고 하였고, Hassan et al. (2020)은 각각 15.79, 10.39, 14.05°C라고 하였으며, Ali et al. (1990)은 유충의 발육영점온도는 12.38°C라고 하여 본 조사 결과보다 높은 경향이였다. 알, 유충, 번데기의 유효적산온도는 39.0, 286.3, 132.2일도로 Du Plessis et al. (2020)의 35.7, 202.7, 150.3일도, Hassan et al. (2020)의 30.0, 360.2, 129.0일도, Prasad et al. (2021)의 50, 250, 200일도와 비교하여 차이가 있었으며, 특히 유충에서 큰 차이가 있었다. 유충 먹이에 따라 유효적산온도의 차이가 있다는 보고가 있어(Ali and Gaylor, 1992; Lee and Roh, 2010) 열대거세미나방도 기주식물에 따라 유효적산온도에 차이가 있을 것으로 판단되었다. 파밤나방의 발육영점온도와 유효적산온도는 알 11.65~13.38°C와 36.89~40.16일도, 유충 12.41~15.4°C와 155.72~174.83일도, 번데기 12.98~15.4°C와 78.5~106.38일도(Lee et al., 1991; Choi and Park, 2000; Azadeh et al., 2014), 담배거세미나방의 발육영점온도와 유효적산온도는 알 11.93°C, 34.48일도, 유충 10.68°C, 344.82일도, 번데기 9.54°C, 163.93일도(Thakur et al., 2017)로 보고되어 있어, 열대거세미나방 알의 발육영점온도와 유효적산온도는 파밤나방과 담배거세미나방과 비슷하나, 유충과 번데기의 발육영점온도와 유효적산온도는 파밤나방보다 낮고 담배거세미나

방보다 높았다.

이상의 결과를 참고한다면 열대거세미나방의 발생생태, 예찰, 비래 후 포장내 총태 변화 등의 예측이 가능하여 방제시기 설정 등에 도움이 될 것으로 생각한다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01500908)의 지원에 의하여 연구가 수행되었습니다.

Supplementary Information

Supplementary data are available at Korean Journal of Applied Entomology online (<http://www.entomology2.or.kr>).

저자 직책 및 역할

문형철: 전북농업기술원, 농업연구사; 실험설계, 실험수행 및 분석, 논문작성

최민경: 전북농업기술원, 농업연구사; 실험수행 및 분석

장수지: 전북농업기술원, 농업연구사; 실험수행 및 분석

이장호: 전북농업기술원, 농업연구사; 실험수행 및 분석

김주희: 전북농업기술원, 농업연구관; 실험수행 및 분석

전형권: 전북농업기술원, 농업연구관; 논문검토

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

Literature Cited

- Aguilon, D.J.D., Velasco, L.R.I., 2015. Effects of larval rearing temperature and host plant condition on the development, survival, and coloration of African armyworm, *Spodoptera exempta* Walker (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Environ. Sci. Manag.* 18, 54-60.
- Ali, A., Gaylor, M.J., 1992. Effects of temperature and larval diet on development of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner. *Environ. Entomol.* 21, 780-786.
- Ali, A., Luttrell, R.G., Schneider, J.C., 1990. Effects of temperature and larval diet on development of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 83, 725-733.
- Azadeh, K.M., Fathipour, Y., Talebi, A.A., 2014. Development response of *Spodoptera exigua* to eight constant temperatures: linear and nonlinear modeling. *J. of Asia-Pacific Entomol.* 17, 349-354.
- Bae, S.D., Park K.B., Oh Y.J., 1997. Effects of temperature and food source on the egg and larval development of tobacco cutworm, *Spodoptera litura* Fabricius. *Korean J. Appl. Entomol.* 36, 48-54.
- Baudron, F., Zaman-Allah, M.A., Chaipa, I., Chari, N., Chinwada, P., 2019. Understanding the factors influencing fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith) damage in African smallholder maize fields and quantifying its impact on yield. A case study in Eastern Zimbabwe. *Crop Protection* 120, 141-150.
- Choi, J.S., Park Y.D., 2000. Effects of some temperature on larval development, adult longevity and oviposition of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner. *Kor. J. Life Sci.* 10, 1-6.
- Day, R., Abrahams, P., Bateman, M., Beale, T., Clotey, V., Cock, M., Colmenarez, Y., Corniani, N., Early, R., Godwin, J., 2017. Fall armyworm: impacts and implications for Africa. *Outlooks on Pest Management* 28, 196-201.
- Du Plessis, H., Schlemmer, M.L., Van den Berg, J., 2020. The effect of temperature on the development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Insects* 11, 228. doi: 10.3390/insects11040228
- Dumas, P., Legeal, F., Lemaitre, C., Scaon, E., Orsucci, M., Labadie, K., Gimenez, S., Clamens, A., Henri, H., Vavre, F., 2015. *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) host-plant variants: two host strains or two distinct species? *Genetica* 143, 305-316.
- Esperk, T., Tammaru, T., Nylin, S., 2007. Intraspecific variability in number of larval instars in insects. *J. Econ. Entomol.* 100, 627-645.
- Fand, B.B., Sul, N.T., Bal, S.K., Minhas, P.S., 2015. Temperature impacts the development and survival of common cutworm (*Spodoptera litura*): simulation and visualization of potential population growth in India under warmer temperatures through life cycle modeling and spatial mapping. *PLOS ONE* 10, e0124682. doi: 10.1371/journal.pone.0124682
- Goergen, G., Kumar, P.L., Sankung, S.B., Togola, A., Tamo, M., 2016. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)(Lepidoptera: Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa. *PLoS ONE* 11, e0165632. doi: 10.1371/journal.pone.0165632
- Hassan, F.D., Salem, S.A.R., Gamil, W.E., Mohamed, H.O., 2020. Heat requirements for the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)(Lepidoptera: Noctuidae) as a new invasive pest in Egypt. *Egypt. Acad. J. Biolog. Sci.* 13, 73-85.
- He, L.M., Wang, T.L., Chen, Y.C., Ge, S.S., Wyckhuys, K.A.G., Wu, K.M., 2021a. Larval diet affects development and reproduction of east asian strain of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *J. Intergrative Agriculture* 20, 736-744.
- He, L.M., Wu, Q.I., Gao, X.W., Wu, K.M., 2021b. Population life tables for the invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* fed on major oil crops planted in China. *J. Intergrative Agriculture* 20, 745-754.
- Huang, L.L., Xue, F.S., Chen, C., Guo, X., Tang, J.J., Zhong, L., He, H.M., 2021. Effects of temperature on life-history traits of the newly invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in Southeast China. *Ecol. Evol.* 11, 5255-5264. doi: 10.1002/ece3.7413
- Jung, J.K., Kim, E.Y., Kim, I.H., Ahn, J.J., Lee, G.S., Seo, B.Y., 2020. Meridic diets for rearing of *Spodoptera frugiperda* larvae. *Korea. Korean J. Appl. Entomol.* 59, 243-250.
- Jung, J.K., Kim, E.Y., Kim, I.H., Seo, B.Y., 2020. Species identification of noctuid potential pests of soybean and maize, and estimation of their annual adult emergence in Suwon, Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 59, 93-107.
- Kumela, T., Simiyu, J., Sisay, B., Likhayo, P., Mendesil, E., Gohole, L., Tefera, T., 2018. Farmers' knowledge, perceptions, and management practices of the new invasive pest, fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Ethiopia and Kenya. *Int. J. Pest Manag.* doi: 10.1080/09670874.2017.1423129
- Lee, G.S., Seo, B.Y., Lee, J.H., Kim, H.J., Song, J.H., Lee, W.H., 2020. First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1979) (Lepidoptera: Noctuidae), a new migratory pest in Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 59, 73-78.
- Lee, J.E., Park, Y.J., 2021. Analysis of life cycle on *Spodoptera exigua* by various temperatures and larval susceptibility against two pesticides in quarantine pest research facility. *Korean J. Appl. Entomol.* 60, 185-191.
- Lee, K.P., Roh, C., 2010. Temperature-by-nutrient interactions affecting growth rate in an insect ectotherm. *Entomol. Exp. Appl.* 136, 151-163.
- Lee, S.D., Ahn, S.B., Cho, W.S., Choi, K.M., 1991. Effects of temperature on the development of beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae). *Res. Rept. RDA (C.P.)* 33, 58-62.
- Montezano, D.G., Specht A., Sosa-Gomez D.R., Roque-Specht V.F., Paula-Moraes S.V., Peterson J.A., Hunt T., 2019. Developmental parameters of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) immature stages under controlled and standardized conditions. *J.*

- Agri. Scie. 11, 76-89.
- Murua, M.G., Vera M.T., Abraham S., Juarez M.L., Prieto S., Head G.P., Willink E., 2008. Fitness and mating compatibility *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) of populations from different host plant species and regions in Argentina. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 101, 639-649.
- Pantoja, A., Smith, C.M., Robinson, J.F., 1987. Development of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), strains from Louisiana and Puerto Rico. *Environ. Entomol.* 16, 116-119.
- Park, C.G., Park, H.H., Kim, K.H., Lee, S.G., 2013. Temperature-dependent development model of white backed planthopper (WBPH), *Sogatella furcifera* (Horvath) (Homoptera: Delphacidae). *Korean J. Appl. Entomol.* 52, 133-140.
- Pencoe, N.L., Martin, P.B., 1982. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) larval development and adult fecundity on five grass hosts. *Environ. Entomol.* 11, 720-723.
- Prasad, T.V., Rao, M.S., Rao, K.V., Bal, S.K., Muttapa, Y., Choudhary, J.S., Singh, V.K., 2021. Temperature based phenology model for predicting the present and future establishment and distribution of recently invasive *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) in India. *Bull. Entomol. Res.* 112, 271-285. doi: 10.1017/S0007485321000882
- Prasanna, B.M., Huesing, J.E., Eddy, R., Peschke, V.M., 2018. Fall armyworm in Africa: a guide for integrated pest management. p. 120.
- Seo, B.Y., Jun, J.K., Lee, G.S., Yang, C.Y., Cho, J.R., Kim, Y.P., 2020. Sex pheromone trapping of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Korea and distribution of intraspecies-specific single nucleotide polymorphisms in the cytochrome c oxidase subunit 1 (CO1). *Korean J. Appl. Entomol.* 59, 217-231.
- Thakur, N., Gotyal, B.S., Satpathy, S., 2017. Effect on biology of jute indigo caterpillar, *Spodoptera litura* (Fabricius) under five different constant temperatures. *J. Entomol. Zool. Stud.* 5, 102-106.
- Wang, W.W., He, P.Y., Zhang, Y.Y., Liu, T.X., Jing, X.F., Zhang, S., 2020. The population growth of *Spodoptera frugiperda* on six cash crop species and implications for its occurrence and damage potential in China. *Insects* 11, 639.
- Wu, L.H., Zhou, C., Long, G.Y., Yang, X.B., Wei, Z.Y., Liao, Y.J., Yang, H., Hu, C.X., 2021. Fitness of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* to three solanaceous vegetables. *J. Integr. Agric.* 20, 755-763.
- Yarro, J.G., 1985. Effect of host plant on moulting in the African armyworm *Spodoptera exempta* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae) at constant temperature and humidity conditions. *Int. J. Trop. Insect. Sci.* 6, 171-175.
- Zhu, G., Luo, Y., Xue, M., Zhao, H., Xia, N.N., Wang, X., 2018. Effects of high-temperature stress and heatshock on two root maggots, *Bradysia odoriphaga* and *Bradysia difformis* (Diptera: Sciariidae). *J. of Asia-Pacific Entomol.* 21, 106-114.