

온도에 따른 아메리카왕거저리(*Zophobas atratus*)의 발육 특성

곽규원[†] · 김선영[†] · 이경용 · 윤형주*

농촌진흥청 국립농업과학원 농업생물부

Developmental Characteristics of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae) at Varing Temperatures

Kyu-Won Kwak[†], Sun Young Kim[†], Kyeong Yong Lee and Hyung Joo Yoon*

Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

ABSTRACT: We investigated the developmental characteristics of super mealworm (Coleoptera: Tenebrionidae) at four different temperatures (25°C, 27°C, 30°C, and 33°C). The rearing conditions were 9L/15D, 65% RH, and 1,330 to 1,800 lux with wheat bran. The length of developmental period of 1 to 18 instars at each temperature showed that 30°C was the shortest at 120.0±5.8 days, compared to that at 27°C (132.6±10.7 days), 33°C (136.5±9.2 days), and 25°C (156.7±7.5 days). The larval developmental period was statistically significantly longer at 25°C, 27°C, and 30°C compared to the length at 33°C. However, the death rate of larvae at 33°C was 2.7-3.3 times higher than the rate at other temperatures. Body weight was heaviest at 30°C followed by 27°C, 33°C, and 25°C. The patterns of head capsule, body capsule, and body length were similar to that of body weight. Regression analyses of developmental period, larval body weight, and length according to temperature revealed 29-30°C as the most suitable temperature. The prepupa rate was 43.1% in 17 instars, 30.3% in 18 instars, 15.4% in 16 instars, 7.1% in 19 instars, 2.2% in 15 instars, and 1.9% in 20 instars, accounting for 88.8% in 16-18 instars. Prepupal period was longer at lower temperatures. For the average prepupal period of 15-18 instars, prepupa time was 18.8±1.9 days at 27°C, 18.8±2.3 days at 30°C, 23.0±2.4 days at 33°C, and 23.1±2.9 days at 25°C. The average pupal period of females and males was 11.1±2.2 and 11.6±2.4 days, respectively. The data indicate that the most suitable rearing temperature of super mealworm was 30°C.

Key words: Super mealworm, Temperature, Development characteristics

초 록: 국내에서 한시적 식용 곤충으로 등록된 아메리카왕거저리의 사육에 적합한 온도를 규명하고자 온도별 발육특성을 조사하였다. 25°C, 27°C, 30°C, 33°C 등 4개의 온도(9L/15D, 65% R.H., 1330-1800 lux 조건)에서 1-18령까지 발육기간은 30°C가 120.0 ±5.8일로 가장 짧았고, 그 다음이 33°C (132.6±10.7일), 27°C (136.5±9.2일), 25°C (156.7±7.5일) 순이었다. 30°C는 25°C보다 36.7일나 단축되었다. 33°C의 경우, 25°C, 27°C, 30°C에 비해서 폐사율이 2.7-3.3배나 높았다. 33°C를 제외하고 온도가 높을수록 발육기간이 단축되는 경향이었으며, 온도별 발육기간은 고도의 통계적 유의성을 나타내었다. 체중의 경우, 30°C가 가장 무거웠고 그 다음은 27°C, 33°C, 25°C 순이었다. 두폭, 체폭, 체장도 체중과 같은 경향을 보여, 온도 간에 발육의 차이가 확인되었다. 온도와 발육기간, 체중, 체장에 대한 회귀분석 결과, 29-30°C가 가장 적합한 온도이었다. 온도별 전용율은 17령이 43.1%로 가장 높았고, 18령(30.3%), 16령(15.4%), 19령(7.1%), 20령(1.9%)순으로 88.8%가 16령-18령 사이에 전용이 되었다. 전용기간(15-20령)은 27°C와 30°C가 각각 18.8±1.9일, 18.8±2.3일이었고, 그 다음이 33°C (23.0±2.4일), 25°C (23.1±2.9일) 순으로 온도가 낮을수록 늦어지는 경향이 있었다. 번데기기간 또한 온도가 높을수록 짧아지는 경향을 나타내었다. 암수 간의 번데기기간은 각각 11.1±2.2일, 11.6±2.4일로 차이가 없었다. 이상의 결과들로 볼 때 아메리카왕거저리의 발육에 적합한 온도는 30°C로 판단된다.

검색어: 아메리카왕거저리, 온도, 발육특성, 발육기간, 체중, 체장, 체폭, 두폭

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author: yoohj1023@korea.kr

Received April 13 2022; Revised May 12 2022

Accepted May 23 2022

급격한 세계인구의 증가로 2050년에는 세계인구가 약 90억 명에 달할 것으로 추정되며, 현재 필요한 식량의 절반에 해당하는 양이 추가로 필요할 것으로 예상된다. 이로 인하여, 미래 식량으로 곤충이 주목을 받고 있다(Godfray, 2010; Van Huis, 2013; Van Huis, et al., 2013). 곤충은 가축에 비해서 단백질 함량은 유사하나, 온실가스의 배출로 인한 지구온난화, 대기 및 수질오염, 토지의 황폐화, 생물다양성의 감소와 같은 피해가 적기 때문에 더 환경 친화적이다. 또한, 사료전환 효율이 높다는 장점뿐만 아니라 번식력이 강하고, 단백질이 풍부하며 영양학적으로 우수하며(Ghaly and Alkoaik, 2009; MacEvilly, 2000; Nonaka, 2009), 기존 가축에 비해 사료효율이 좋고 환경오염 요소가 적은 특성을 가지고 있다(Nakagaki and Defoliart, 1991). 곤충 중 식용곤충으로는 나비목(Lepidoptera), 딱정벌레목(Coleoptera), 메뚜기목(Orthoptera), 흰개미목(Isoptera)과 벌목(Hymenoptera) 등에 속하는 2000종 이상이 있으며, 전 세계 113개국에서 곤충을 섭취하고 있다(Kourimska and Adamkova, 2016; Yoo et al., 2013).

2020년 국내에서 한시적 식용곤충으로 등록된 아메리카왕거저리(*Zophobas atratus* Fabricius 1775)는 완전변태곤충으로 딱정벌레목(Coleoptera) 거저리과(Tenebrionidae)에 속한다. 갈색거저리(*Tenebrio molitor*)보다 약 3-4배 더 큰 형태의 대형 거저리류이며, 중남미에 주로 분포한다(Park et al., 2013). 이 종은 이미 벨기에에서는 2013년부터 식품으로 인정하고 발표하였다(Megido et al., 2013). 아메리카왕거저리는 30°C, 65% 상대습도(RH) 및 12L/12D 광주기의 환경에서 생활사(lifecycle)는 알(5-7일), 유충(120일, 1~18령), 용화기(9-10일), 성충(5개월 이상)으로 보고되고 있다(Yoon et al., 2020). 곤충을 사육할 경우, 곤충의 종에 따라 온도, 광주기, 습도, 조도, 밀도 등 여러 가지 외적 환경 요인에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Ludwig, 1956; Urs and Hopkins, 1973; Tyschchenko and Sheyk, 1986; Price, 1997; Roff, 1992; Whitman and Ananthkrishanan, 2009). 그 중에서 특히 온도에 대한 영향을 받는다는 많은 보고들이 있다.

흰점박이꽃무지 *Protaetia brevitarsis* (Coleoptera: Scarabaeidae)는 20, 25, 30, 35°C 중, 20, 25, 30°C의 16L:8D (93.1%, 83.7%, 45.2%)에서 8L:16D (90.9%, 71.5%, 37.3%)보다 높은 부화율을 보였으나, 온도가 20°C일 때 93.5%로 부화율이 가장 증가하여, 온도 조건이 광주기보다 부화에 더 중요한 조건으로 확인되었다(Kim et al., 2018). 또다른 딱정벌레목인 뽕나무하늘소(*Apriona germari* Hope, Coleoptera: Cerambycidae) 유충은 15, 20, 25, 30°C의 온도조건 중 15°C에서 4령까지 6.7%, 20°C에서 7령까지 23.3%의 생존율을 보였으나, 25°C와 30°C에서 7령까지의 생존율이 56.7%, 63.3%로 나타나 온도가 높아

질수록 생존율이 증가한 반면, 15°C에서 가장 폐사율이 높았다(Yoon et al., 2000). 15°C에서 1령에서 3령까지의 기간이 108일인 반면 30°C에서 발육기간이 29일로 가장 짧았으며, 체중에서는 4령부터 25°C 시험구에서 가장 체중이 증가하여 7령의 체중은 1,800mg으로 1령의 130배 성장을 보여 온도가 발육에 중요한 조건으로 연구되었다(Yoon et al., 2000).

갈색거저리(*T. molitor*)의 발육조건에 대한 연구에서는 성충을 20, 25, 30, 35°C 조건에서 16주동안 사육한 결과 20°C에서 95%, 25°C, 30°C에서 85%, 35°C에서 35% 생존율을 보여 20°C에서 가장 높은 생존율을 보였고, 유충 체장의 길이를 16주 차까지 확인 결과, 30°C에서 체장의 길이가 16.5 mm로 가장 크게 증가하여 온도에 영향을 받는 것으로 보아 30°C 온도 조건이 유충 발육에는 적합한 온도이었다(Kim et al., 2016). *Stethorus gilvifrons* (Coleoptera: Coccinellidae)는 산란 및 수명에 대한 내재적 요인은 25°C의 상대적으로 긴 광주기에 높게 나타났으며, 폐사율은 짧은 광주기에 20°C에서 가장 낮게 나타났다(Aksit et al., 2007). 이러한 결과는 곤충 종의 생리적 특징에 따라 발육에 영향을 주는 적절한 온도, 광주기, 습도, 조도 등을 다룰 수 있다는 것을 보여준다. 발육과정의 변화는 두가지 조건에 의해 의존되는데 유충의 수와 각 령의 기간이며, 유약호르몬(juvenile hormone), 내분비 요인 등이 발육에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Feyereisen, 1985; Connat et al., 1991; Riddiford, 1976).

Kwak et al. (2021)은 아메리카왕거저리의 알의 경우, 온도, 습도, 광주기, 조도 중에서 25°C (6.5%), 27°C (71%), 30°C (91.0%), 33°C (66.5%)의 온도조건 중 30°C일 때, 91.0%의 부화율을 보이며, 상관분석 결과(one-way ANOVA test: $F_{3, 8} = 65.654$, $p = 0.0001$) 온도가 알의 부화에 가장 유의적인 영향을 주었으며, 유충의 체중증가에도 가장 많은 영향을 끼치는 요인이었다(Kim et al., 2015). 풀무치(*Locusta migratoria*) 알의 부화 역시, 20°C (0%), 25°C (0%), 27°C (42.3%), 30°C (63.2%), 33°C (85.6%)의 온도조건 중 33°C에서 가장 높은 85.6%의 부화율을 보여, 온도가 광주기, 습도, 조도보다 부화에 더 영향을 받는 것으로 나타났다(Kwak et al., 2022). *Z. atratus*는 변태(탈피)를 하기 위해서 개체독립(isolation)이 매우 필요하다(Quennedey et al., 1995; Aribi et al., 1997). 개체들이 밀집되어 있는 조건에서 *Z. atratus* 유충은 령이 진전될수록 크기와 무게가 증가하지만, 결국 용화 과정에 들어가지 못한다(Tschinkel and Willson, 1981)고 하여 종에 따라서 밀도도 중요한 환경적 요인이 될 수 있다.

이러한 다양한 환경적 요인 중 특히, 온도가 아메리카왕거저리의 발육에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 다소 적은

편이다. 이에 본 연구에서는 아메리카왕거저리를 대량 사육하기에 적합한 조건을 구명하고자 위한 온도 별 발육기간, 폐사율, 체중, 체장, 체폭, 두폭 등의 발육특성을 조사하였다.

재료 및 방법

실험곤충

농촌진흥청 국립농업과학원 농업생물부에서 계대사육중인 아메리카왕거저리 10G, 1일째 1령 유충을 실험곤충으로 사용하였다.

온도별 아메리카왕거저리 유충 발육특성

온도별 아메리카왕거저리의 발육특성을 조사하기 위하여, 실험 온도를 25, 27, 30, 33°C 등 4구로 설정하고 사육 인큐베이터(multi room incubator/ DS-14MCLHP)에서 실험하였다. 이때 사육환경은 습도 65% RH, 조도 1,330-1,800 lux, 광주기 9L/15D로 하였다. 실험구 당 45마리씩 3반복하였다. 사육상자는 27.5 × 22.5 × 32.5 mm (H × W × D) 크기의 플라스틱 상자를 사용하였고, 먹이는 밀기울을 주기적으로 급여하였다. 온도에 따른 아메리카왕거저리의 발육기간을 조사하기 위하여 각 령별 발육기간, 폐사율, 체중, 체장, 체폭, 두폭 등을 조사하였다.

온도별 아메리카왕거저리 유충의 발육기간 및 폐사율 조사를 위하여 발육기간을 1령부터 18령까지 측정하였다. 발육기간은 탈피 직후 오전 10시를 기준으로 조사하였으며, 이때 폐사율도 함께 조사하였다. 온도에 따른 영별 체중은 1령-18령까지 조사하였고, 탈피 직후 1일 내에 측정하였다. 측정 시에는 탄산가스로 잠시 마취시켜 움직임이 없는 상태에서 디지털 저울(OHAUS)을 사용하였다. 온도별 체장, 체폭, 두폭 역시 탈피 1일 내에 현미경(Leica, LED2500)을 사용하여 조사하였다. 길이 측정은 측정프로그램(T capture, version 4.3.0.602 beta 2, tuxsen)을 사용하였다.

온도에 따른 전용율, 전용기간 및 번데기기간

온도별 전용율, 전용기간, 번데기기간 및 암수별 번데기기간을 조사하였다. 전용율은 15-20령 사이의 유충이 번데기 전 단계인 노숙유충을 원예용 포트에 넣어 조사하였다. 아메리카왕거저리는 노숙유충을 사육상자에 그대로 두면 번데기가 되기 어렵기 때문에 노숙유충이 상자밖으로 나오지 않고, 용화율을 높이기 위해서 128구 원예용 포트는 58 × 28 × 50 mm (H × W

× D, 1구의 크기: 2.5 × 1.8 × 4.5 mm) 크기를 이용하였다(Yoon et al., 2020). 전용시기는 노숙유충에서 번데기되기 전까지의 기간으로 계산하였고, 번데기기간은 번데기시작부터 우화 전까지 기간으로 설정하였다. 암수 번데기의 구분은 복부 끝부분의 돌기인 유두 돌기를 이용하여 구분하였다. 암컷번데기는 유두 돌기가 양 측면으로 벌어져 있으며, 수컷은 유두 돌기가 중앙에 한 쌍으로 몰려있는 것으로 구분하였다(Yoon et al., 2020).

통계 분석

통계 분석은 'PASW 18' 통계소프트웨어 패키지(IBM Inc., 2009)를 이용하여 one-way ANOVA test (일원배치 분산분석), 사후검정으로 Turkey's HSD, Chi-square test, T-test, 다변량 분산분석(MANOVA test), 상관분석(Correlation analysis)과 회귀분석(Regression analysis)으로 통계 분석하였다. one-way ANOVA test는 아메리카왕거저리의 온도 별 발육기간, 체중, 체장, 체폭, 두폭, 폐사율, 성에 따른 용화율을 비교하는데 사용하였다. Chi-square test는 온도에 따른 전용시기에, T-test는 암수 전용기간 비교에 사용하였다. 또한 다변량 분산분석을 통하여 온도에 따라 발육기간과 체중, 체장, 두폭 등 유충의 발달이 차이가 있는지, 차이가 있을 경우, 어떠한 요소에 더 큰 영향을 미치는지 확인하였다. 온도와 유충의 발육기간과 유충의 발달 간 연관이 되었는지 상관분석을 통하여 검증하였다. 유의미한 상관관계 존재할 경우, 온도에 따른 1차 또는 2차 회귀식을 도출하였다. 도출된 회귀식을 통하여 발육기간이 가장 짧은 온도, 가장 체중이 무겁거나, 길이가 긴 유충을 얻을 수 있는 온도를 계산하였다.

결과

온도별 아메리카왕거저리 유충 발육특성

온도에 따른 아메리카왕거저리 유충의 발육특성을 조사하기 위하여 25°C, 27°C, 30°C, 33°C의 4개의 온도에서 1-18령까지 각 령별 발육기간을 조사하였다(Fig. 1A). 그 결과, 1-10령까지는 33°C가 39.2±3.0일로 가장 짧았고, 그 다음이 30°C (40.1±2.5일), 27°C (43.6±2.4)일이었고 25°C는 (57.8±2.9)일로 33°C와 30°C보다 17.7-18.6일나 길었다(one-way ANOVA test: $F_{(3,176)} = 448.830, p = 0.0001$)(Fig. 1A). 전용이 되기 시작하는 15령까지는 30°C가 75.9±4.1일로 33°C보다 3.4일, 27°C보다 9.6일, 25°C보다는 무려 31.6일이나 단축되었다($F_{(3,89)} = 228.224, p = 0.0001$)(Fig. 1A). 1-15령까지 아메리카왕거저리

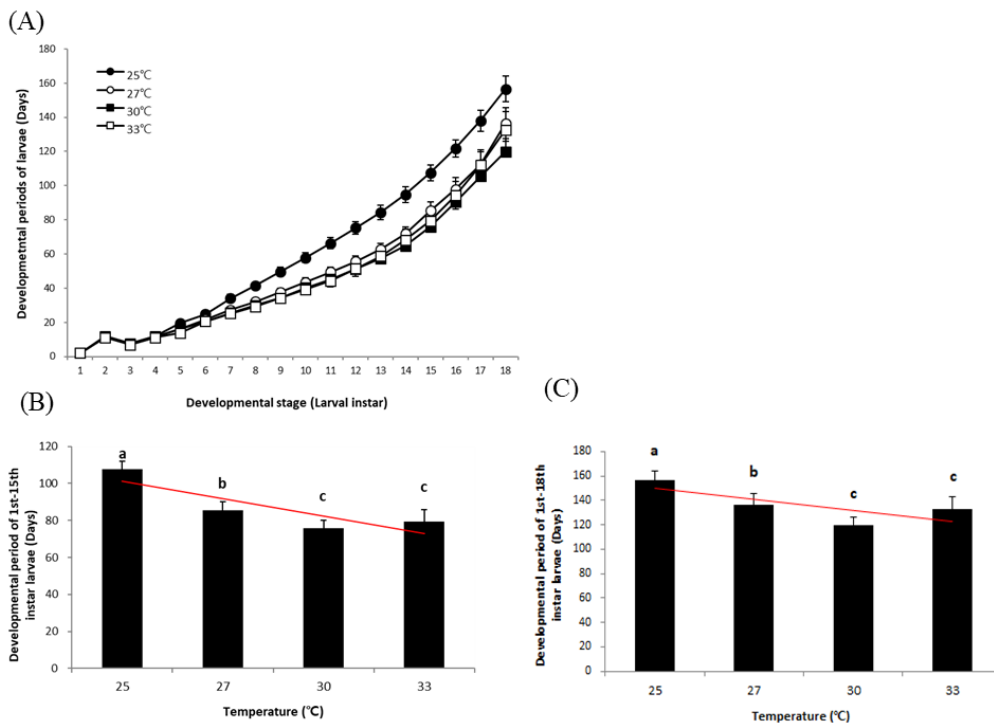


Fig. 1. Analysis of the developmental period of *Z. atratus* larvae (A) Variations in developmental period of *Z. atratus* larvae with varying temperature (B) Correlation analysis of growth period from 1st to 15th instar larvae of *Z. atratus* (Correlation analysis: $R = -0.828$, $p = 0.0001$) (C) Correlation analysis of growth period from 1st to 18th instar larvae of *Z. atratus* (Correlation analysis: $R = -0.701$, $p = 0.0001$).

유충의 발육기간과 온도에 따른 상관분석 결과(Fig. 1B), $R = -0.828$, $p = 0.0001$ 로 온도와 발육 기간은 유의적인 상관관계가 있는 것으로 나타나 온도가 높을수록 발육기간이 단축되었다. 온도에 따른 15령까지 발육기간에 대한 회귀분석 결과, 이차회귀방정식은 $y = 1.0781x^2 - 65.962x + 1082.4$, $R^2 = 0.878$, $F_{2,32} = 198.114$, $p = 0.0001$ 로 확인되어 온도에 따라라도 발육기간이 유의적으로 영향을 받는 것으로 확인되었다(Fig. 7A). 대부분 전용으로 들어가는 18령까지의 발육기간 역시, 30°C가 120.0 ± 5.8 일로 33°C, 27°C, 25°C보다 12.6-36.7일나 단축되어($F_{(3,33)} = 25.718$, $p = 0.0001$) 발육기간은 온도에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 1-18령까지 아메리카왕거저리 유충의 발육기간과 온도에 따른 상관분석 결과(Fig. 1C), $R = -0.701$, $p = 0.0001$ 로 온도와 발육 기간은 유의적인 상관관계가 있는 것으로 나타나 온도가 높을수록 발육기간이 단축되었다. 온도에 따른 18령까지 발육기간에 대한 회귀분석 결과, 이차회귀방정식은 $y = 1.4579x^2 - 87.349x + 1429.4$, $R^2 = 0.721$, $F_{2,32} = 41.342$, $p = 0.0001$ 로 확인되어 온도에 따라라도 발육기간이 유의적으로 영향을 받는 것으로 확인되었다(Fig. 7B).

온도 조건이 아메리카왕거저리의 폐사율에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 조사하였다. 온도별로 18령까지 조사한 결

과, 33°C에서 유충기간에 평균 69.5% 폐사한 반면, 25°C (32.7%), 27°C (30.8%), 30°C (27.1%)에서는 유의적 차이가 없었다(Fig. 2B). 온도(25°C, 27°C, 30°C, 33°C)에 따른 아메리카왕거저리의 폐사율을 조사한 결과, 1~5령 내에 폐사율이 32.3% 나타났으며, 전용(0.9%)과 번데기 시기(1.0%)에는 폐사가 거의 없었다(Fig. 2A). 따라서, 33°C에서 1-10령까지의 유충의 누적된 폐사율이 $41.5 \pm 8.3\%$ ($F_{(3,8)} = 1.946$, $p = 0.201$)로 유의적 차이는 확인되지 않았으나 1-18령까지의 유충의 누적된 폐사율은 $69.5 \pm 10.1\%$ ($F_{(3,8)} = 47.011$, $p = 0.0001$)로 다른 온도조건 대비 23.5~36.0배 증가하여 매우 유의적인 차이를 보였다(Fig. 2A). 따라서 33°C 조건은 아메리카왕거저리 유충의 발육에 적합한 온도조건으로 볼 수 없었다.

온도별 아메리카왕거저리 유충의 령별 체중을 조사한 결과 전반적으로 30°C가 가장 무거웠고 그 다음은 27°C, 33°C, 25°C 순이었으며, 온도 간에 고도의 유의성이 확인되었다($p = 0.0001$) (Fig. 3A). 5령까지 체중은 27°C-33°C는 평균 1.0-1.2 mg이었으나 25°C는 0.8mg으로 1.3-1.5배 적었다(Fig. 3B, $F_{(3,94.064)} = 74.079$, $p = 0.0001$; $R = 0.657$, $p = 0.0001$). 10령의 경우에서도 30°C와 33°C가 각각 13.2 ± 3.7 mg과 13.4 ± 2.9 mg로 27°C (11.7 ± 2.4 mg), 25°C (9.7 ± 2.3 mg)보다 체중이 무겁게 나타났다(Fig.

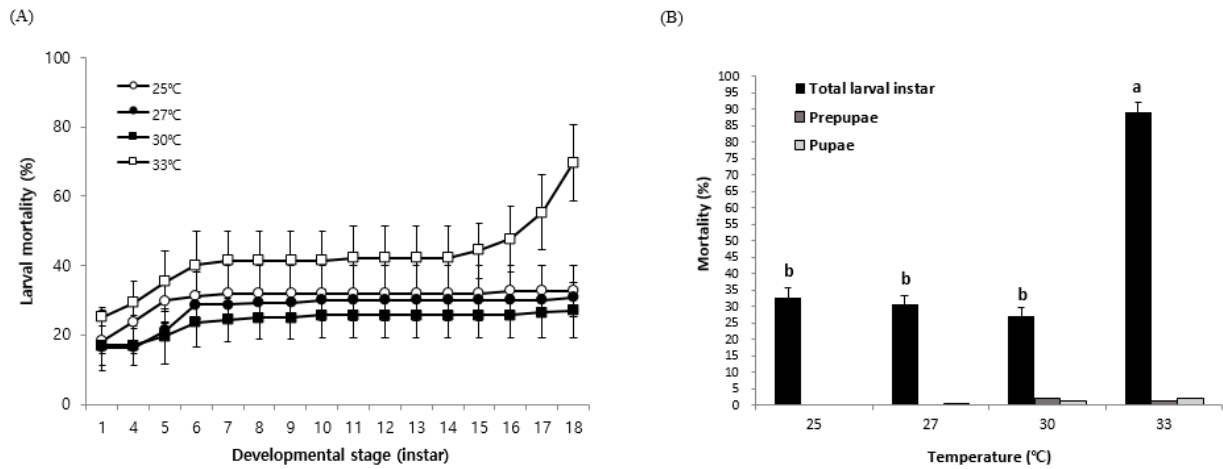


Fig. 2. Morality rate of *Z. atratus* with varying temperature (A) Total larval instar of *Z. atratus* with varying temperature (B) Mortality rate of total larval instars, prepupae, and pupae of *Z. atratus* with varying temperature.

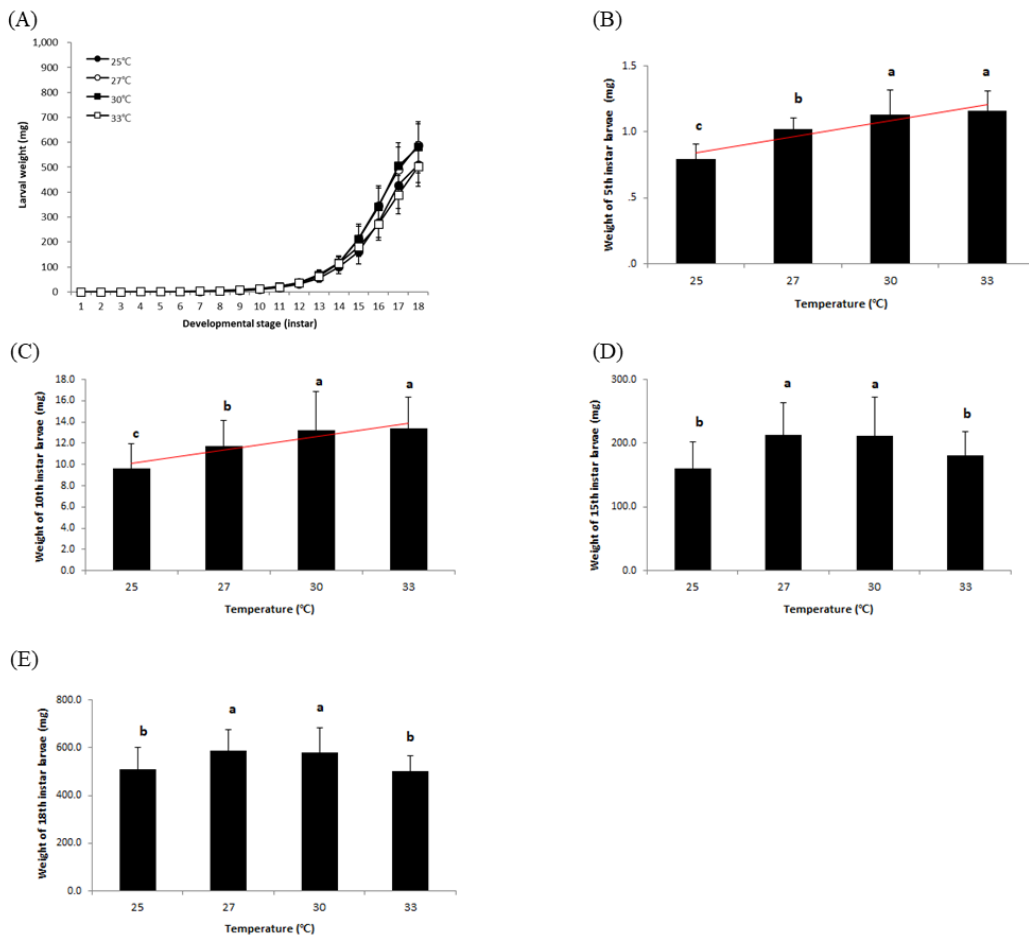


Fig. 3. Analysis of *Z. atratus* larval body weight with varying temperature (A) *Z. atratus* instar larval weight with varying temperature (B) Correlation analysis of 5th instar larval weight of *Z. atratus* with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,94,064)} = 74.079$, $p = 0.0001$; pearson correlation $R = 0.657$, $p = 0.0001$) (C) Correlation analysis of *Z. atratus* 10th instar larval weight with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,174)} = 15.631$, $p = 0.0001$; pearson correlation $R = 0.422$, $p = 0.0001$) (D) Correlation analysis of *Z. atratus* 15th instar larval weight with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,95,590)} = 18.466$, $p = 0.0001$; pearson correlation $R = 0.484$, $p = 0.264$) (E) Correlation analysis of *Z. atratus* 18th instar larval weight with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,60,957)} = 8.214$, $p = 0.0001$; pearson correlation $R = -0.007$, $p = 0.941$).

3C, $F_{(3,174)} = 15.631$, $p = 0.0001$; $R = 0.422$, $p = 0.0001$). 15령에서는 27°C와 30°C가 각각 213.0 mg, 211.0 mg이었고, 그 다음이 33°C (180.3 mg), 25°C (161.1 mg)순이었다(Fig. 3D, $F_{(3,95.590)} = 18.466$, $p = 0.0001$; $R = 0.484$, $p = 0.264$). 전용으로 들어가지 전인 18령의 경우, 27°C(587.9 mg), 30°C (520.1 mg), 25°C (509.5 mg), 33°C (502.1 mg)순으로 나타났다(Fig. 3E, $F_{(3,60.957)} = 8.214$, $p = 0.0001$; $R = -0.007$, $p = 0.941$). 위의 결과에 따라 온도에 따른 18령까지 체중에 대한 회귀분석 결과, 이차회귀방정식은 $y = -2.9912x^2 + 175.12x - 2343.6$, $R^2 = 0.1574$, $F_{2,177} = 16.532$, $p = 0.0001$ 로 확인되어 온도에 따른 유의적인 차이가 있는 것으로 확인되었다(Fig. 7C). 이런 결과로 볼 때, 아메리카왕거저리의 령별 체중은 온도에 상당히 영향을

받는 것으로 나타났다.

온도별 아메리카왕거저리의 체장은 체중과 같은 경향을 보여 전반적으로 30°C가 가장 긴 경향을 보였다(Fig 4A). 5령 체장의 경우, 27-33°C는 평균 5.0-5.3 mm의 인데 반하여 25°C는 4.6 mm로 가장 짧았다(Fig. 4B, $F_{(3,90)} = 10.344$, $p = 0.0001$) 10령은 11.6-12.5 mm의 길이로 30°C (12.4 mm)와 33°C (12.5 mm)가 길게 나타났다(Fig. 4C, $F_{(3,61.005)} = 10.295$, $p = 0.0001$). 15령에서는 30°C (33.5 mm), 27°C (33.4 mm), 33°C (30.3 mm), 25°C (29.6 mm)순이었다(Fig. 4D, $F_{(3,169)} = 21.124$, $p = 0.0001$), 18령에서도 15령과 같은 경향으로 30°C가 46.9 mm로 가장 길게 나타났다(Fig. 4E, $F_{(3,44.745)} = 6.574$, $p = 0.001$).

위의 결과에 따라 온도에 따른 아메리카왕거저리 18령 유충

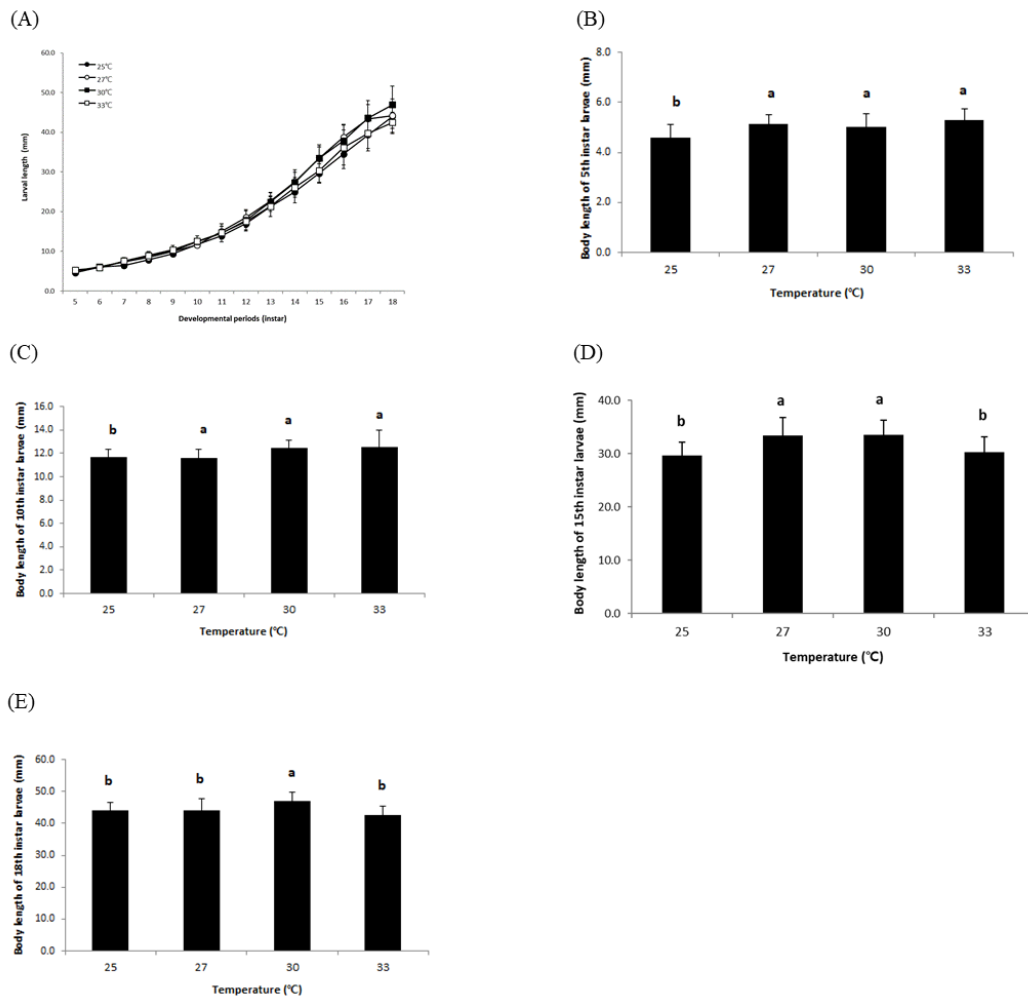


Fig. 4. Analysis of *Z. atratus* larval body length with varying temperature (A) *Z. atratus* instar larval length with varying temperature (B) Correlation analysis of 5th instar larval length of *Z. atratus* with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,90)} = 10.344$, $p = 0.0001$) (C) Correlation analysis of *Z. atratus* 10th instar larval length with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,61.005)} = 10.295$, $p = 0.0001$) (D) Correlation analysis of *Z. atratus* 15th instar larval length with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,169)} = 21.124$, $p = 0.0001$) (E) Correlation analysis of *Z. atratus* 18th instar larval length with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,44.745)} = 6.574$, $p = 0.001$).

까지 체장의 회귀분석 결과, 이차회귀방정식은 $y = -0.2431x^2 + 14.151x - 172.11$, $R^2 = 0.2937$, $F_{2,167} = 34.716$, $p = 0.0001$ 로 확인되어 온도에 따른 유의적인 차이가 있는 것으로 확인되었다 (Fig. 7D).

사육온도별 아메리카왕거저리의 체폭 역시 체중, 체장 결과와 유사한 경향으로 대체적으로 30°C의 체폭이 넓은 경향을 보였다(Fig 5A). 5령 체폭의 경우, 27-33°C는 평균 0.55-0.60 mm의 인데 반하여 25°C는 0.49 mm로 가장 좁았다(Fig. 5B, $F_{(3,90)} = 11.085$, $p = 0.0001$). 10령은 1.40-1.64 mm로 온도 간의 유의성이 확인되었다(Fig. 5C, $F_{(3,56,241)} = 13.151$, $p = 0.0001$). 15령

에서는 30°C (33.5 mm), 27°C (33.4 mm), 33°C(30.3 mm), 25°C (29.6 mm)순이었다 (Fig. 5D, $F_{(3,169)} = 21.124$, $p = 0.0001$), 18령에서도 15령과 같은 경향으로 30°C가 5.70 mm로 가장 넓었다(Fig. 5E, $F_{(3,43,227)} = 6.546$, $p = 0.001$). 그러나 온도에 따른 아메리카왕거저리의 체폭에 대한 상관분석 결과 유의적 상관관계는 없는 것으로 확인되었다.

사육온도별 아메리카왕거저리의 두폭 역시 체중, 체장, 체폭 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다(Fig. 6A). 27-33°C의 5령 평균 두폭은 0.37-0.43 mm로 25°C (0.32 mm)보다 1.2-1.3배 컸다(Fig. 6B, $F_{(3,90)} = 16.832$, $p = 0.0001$). 10령은

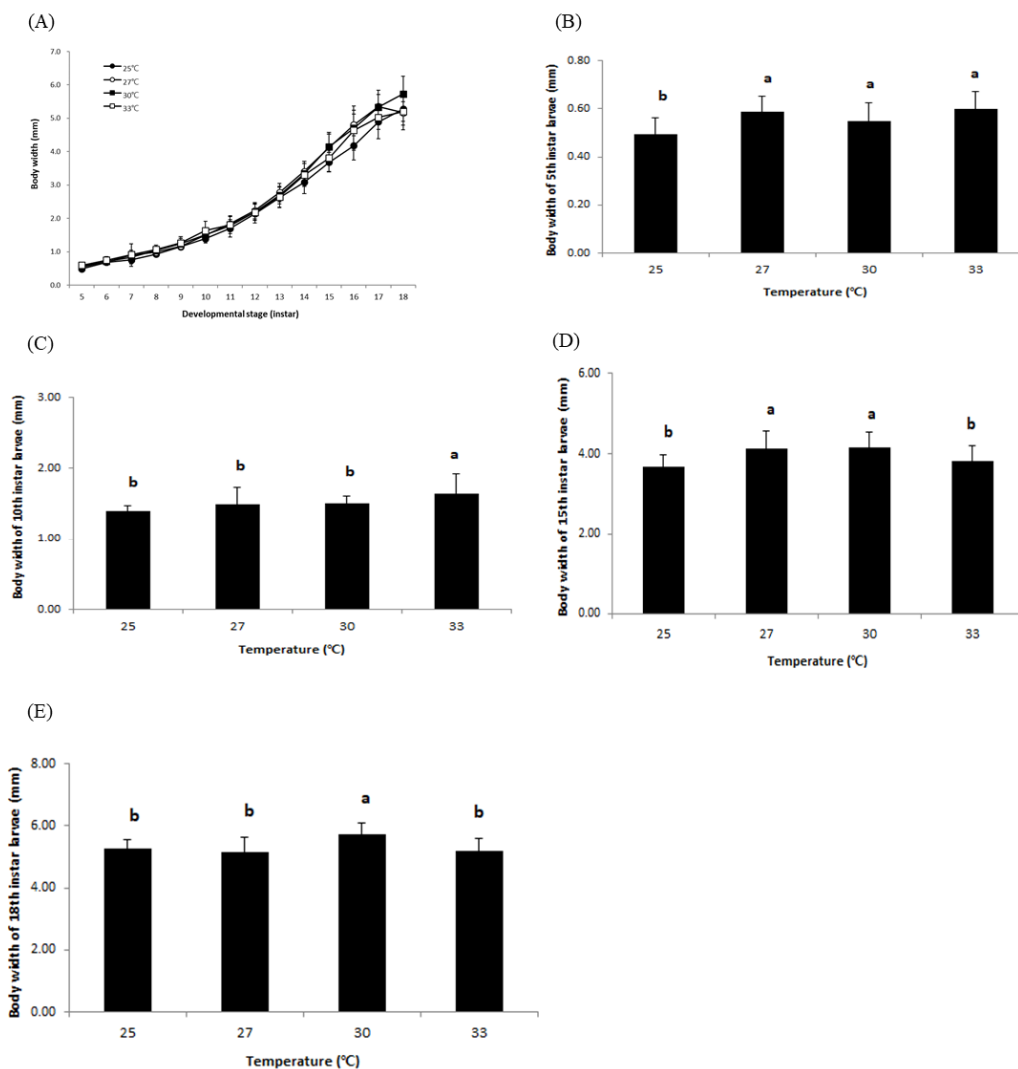


Fig. 5. Analysis of *Z. atratus* larval body width with varying temperature (A) *Z. atratus* instar larval body width with varying temperature (B) Correlation analysis of 5th instar larval body width of *Z. atratus* with varying temperature (oneway ANOVA test: $F_{(3,90)} = 11.085$, $p = 0.0001$, no correlation) (C) Correlation analysis of *Z. atratus* 10th instar larval width with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,56,241)} = 13.151$, $p = 0.0001$, no correlation) (D) Correlation analysis of *Z. atratus* 15th instar larval width with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,169)} = 2.356$, $p = 0.0001$, no correlation) (E) Correlation analysis of *Z. atratus* 18th instar larval width with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,43,227)} = 6.546$, $p = 0.001$, no correlation).

0.91-1.0 mm로 온도 간의 유의성이 확인되었다(Fig. 6C, $F_{(3,56,241)} = 2.899$, $p = 0.0001$). 15령(Fig. 6D, $F_{(3,169)} = 13.338$, $p = 0.0001$)과 18령(Fig. 6E, $F_{(3,108)} = 6.789$, $p = 0.001$)의 두쪽도 온도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 온도에 따른 아메리카왕거저리 두쪽의 상관분석 결과, 유의적 상관관계는 없는 것으로 확인되었다. 온도에 따라 무게, 체장, 체폭, 두폭, 발육기간에 대한 다변량 분산분석(MANOVA test) 결과, 무게($p = 0.0001$), 체장($p = 0.002$), 발육기간($p = 0.0001$)이 유의미한 차이가 있었고, 이중 Π^2 값에 대한 비교분석 결과, 발육기간($\Pi^2 = 0.885$)이 무게

($\Pi^2 = 0.216$)나 체장($\Pi^2 = 0.158$)보다 온도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 온도에 따른 가장 효과적인 발육기간(1st to 18th instar: $F_{2,32} = 41.342$, $p = 0.0001$, $DW = 0.807$), 무게(18th instar larval weight, $F_{2,177} = 16.532$, $p = 0.0001$), 체장(18th instar larval length, $F_{2,167} = 34.716$, $p = 0.0001$)에 대한 회귀분석 한 결과, 모두 유의미한 회귀식이 도출되었다. 각 2차 회귀모델을 통하여 온도가 30°C 일 때 121.0일로 발육기간이 가장 짧았고, 29.3°C 일때 219.5 mg으로 가장 무거웠으며, 30°C 일 때 33.8 mm로 가장 긴 유충을 얻을 수 있었다. 그러나 무게

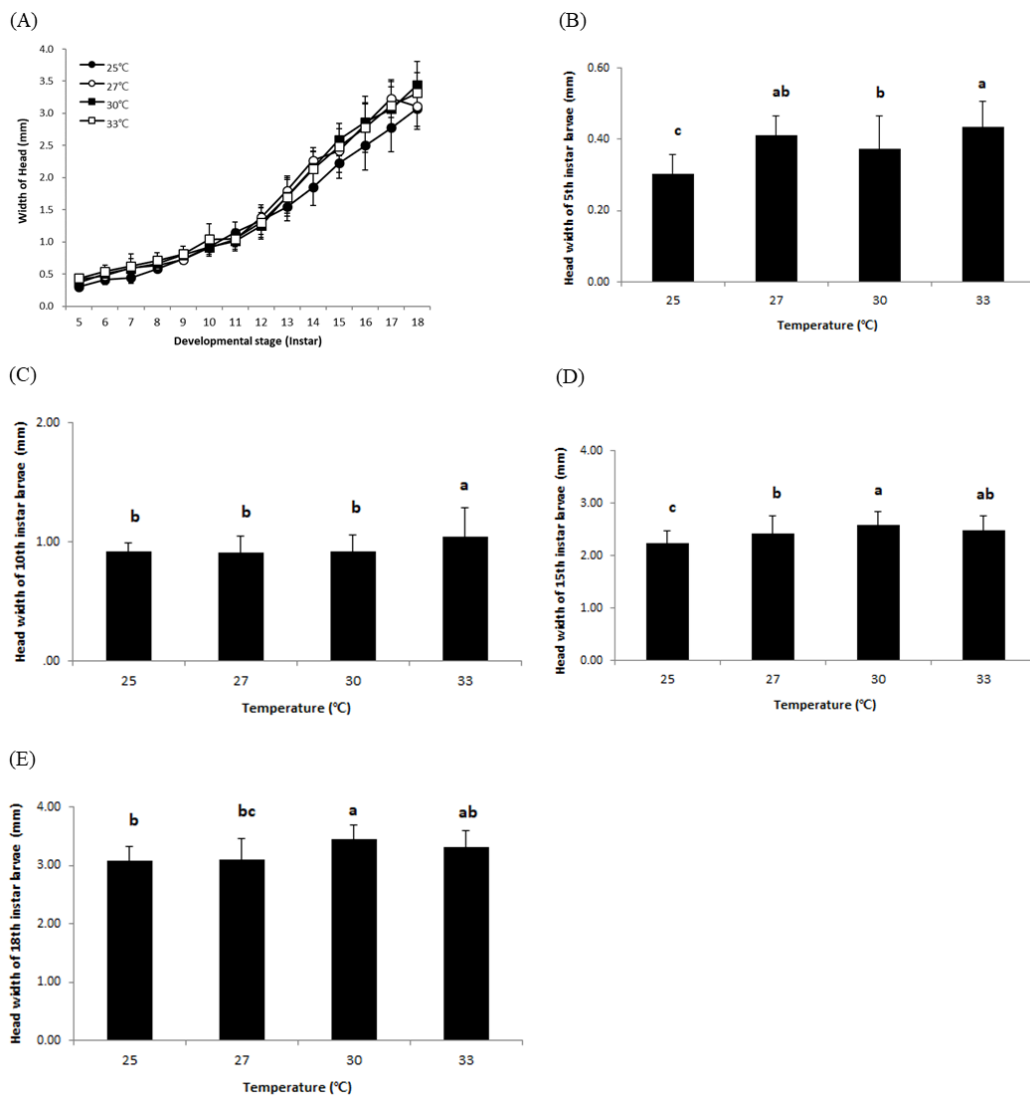


Fig. 6. Analysis of *Z. atratus* head width with varying temperature (A) Correlation analysis of *Z. atratus* instar larvae with varying temperature (B) Correlation analysis of *Z. atratus* 5th instar head width with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,90)} = 16.832$, $p = 0.0001$, no correlation) (C) Correlation analysis of *Z. atratus* 10th instar head width with varying temperature (welch's ANOVA test: $F_{(3,56,241)} = 2.899$, $p = 0.0001$, no correlation) (D) Correlation analysis of *Z. atratus* 15th instar head width with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,169)} = 13.338$, $p = 0.0001$, no correlation) (E) Correlation analysis of *Z. atratus* 18th instar head width with varying temperature (one-way ANOVA test: $F_{(3,108)} = 6.789$, $p = 0.0001$, no correlation).

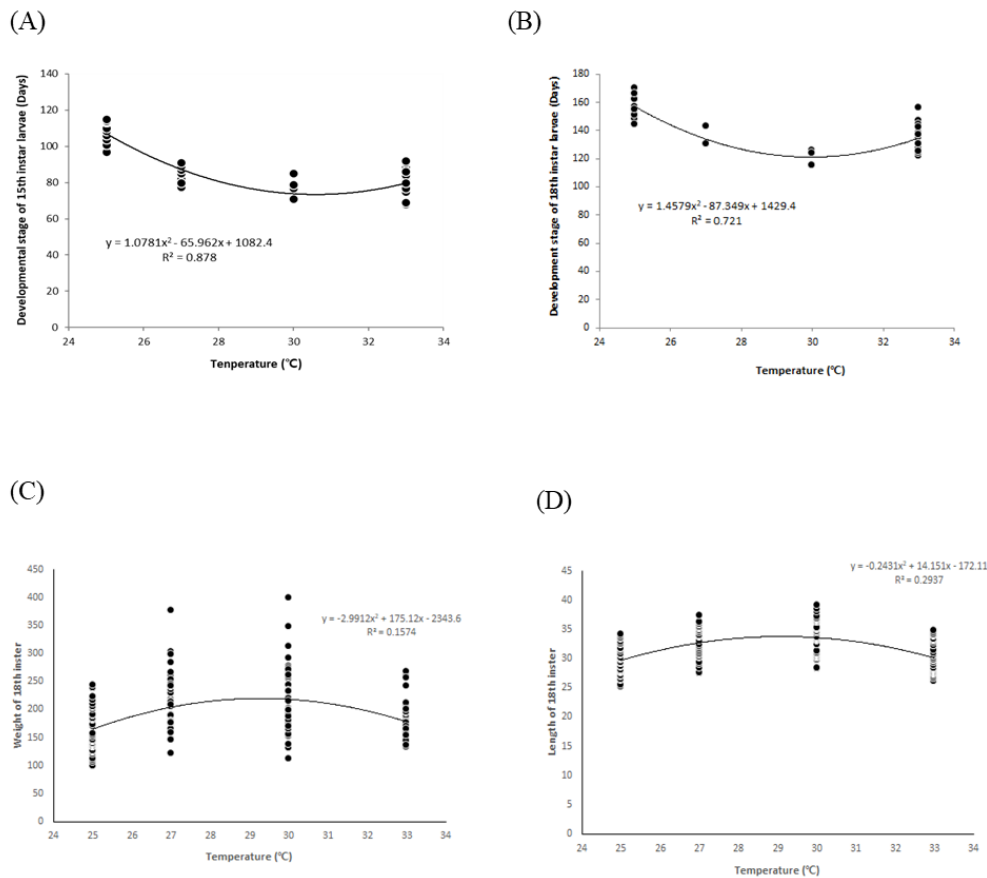


Fig. 7. Regression analysis of developmental period, body weight, and body length the *Z. atratus* larvae (A) Regression analysis of growth period from 1st to 15th instar larvae of *Z. atratus* (1st to 15th instar: ANOVA test $F_{2,32} = 198.114$, $p = 0.0001$, $DW = 0.807$) (B) Regression analysis of growth period from 1st to 18th instar larvae of *Z. atratus* (1st to 18th instar: $F_{2,32} = 41.342$, $p = 0.0001$, $DW = 0.807$) (C) Regression analysis of 18th instar larval weight of *Z. atratus* with varying temperature ($F_{2,177} = 16.532$, $p = 0.0001$) (D) Regression analysis of 18th instar larval length of *Z. atratus* with varying temperature ($F_{2,167} = 34.716$, $p = 0.0001$).

와 체장에 대한 회귀식의 설명력은 각각 0.157, 0.293로 발육기간은 0.721에 비해 비교적 낮아 높은 예측률을 기대하기 어렵지만, 세 가지 변수 모두 29-30°C의 범위에서 가장 효과적인 결과를 나타내었다.

온도 및 암수별 아메리카왕거저리의 전용율, 전용기간 및 번데기 기간

아메리카왕거저리의 전용되는 시기와 전용율을 조사하였다 (Fig 8). 전용이 되는 시기는 15령부터 20령까지이었고, 17령 43.1%로 가장 많았고, 18령, 30.3%, 16령 15.4%, 19령(7.1%), 15령(2.2%), 20령(1.9%) 순으로 16-18령사이에 88.8%가 전용이 되었다(Fig 8A, Chi-square test: $\chi^2 = 86.973$, $df = 15$, $p = 0.0001$). 온도별로 전용이 되는 시기를 조사한 결과(Fig 8A), 25°C는 16령-20령으로, 17-19령에 94.0%가 전용이 되었고,

27°C는 15-19령으로 16-18령에 97.6%가 전용이 되었다. 30°C는 16령-20령으로, 16-18령에 86.2%가 전용, 33°C는 15-19령으로, 온도가 높을수록 전용시기가 빨라지는 경향을 보였다. 온도에 따른 각 령별 전용기간을 조사한 결과(Fig. 8B), 전용시기와 비슷한 경향으로 온도가 높을수록 전용기간이 짧아지는 경향을 보였다(16령: $F_{(2,29)} = 6.127$, $p = 0.006$, 17령: $F_{(2,83)} = 26.082$, $p = 0.0001$, 18령: $F_{(3,57)} = 15.741$, $p = 0.0001$). 15-20령까지의 평균 전용기간을 조사한 결과, 27°C와 30°C는 각각 18.8 ± 1.9 일, 18.8 ± 2.3 일이었고, 33°C 23.0 ± 2.4 일, 25°C 23.1 ± 2.9 일($F_{(3,195)} = 49.552$, $p = 0.0001$)로 25°C-33°C의 전체 평균 전용기간은 20.5 ± 3.2 일이었다. 결과적으로 아메리카왕거저리의 전용시기와 전용기간을 볼 때, 30°C가 적인 것 알 수 있었다.

온도 조건이 아메리카왕거저리의 암수별 전용시기 및 번데기기간에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다. 온도에 따른 암수별 아메리카왕거저리의 전용기간은 온도가 높을수록 짧아지

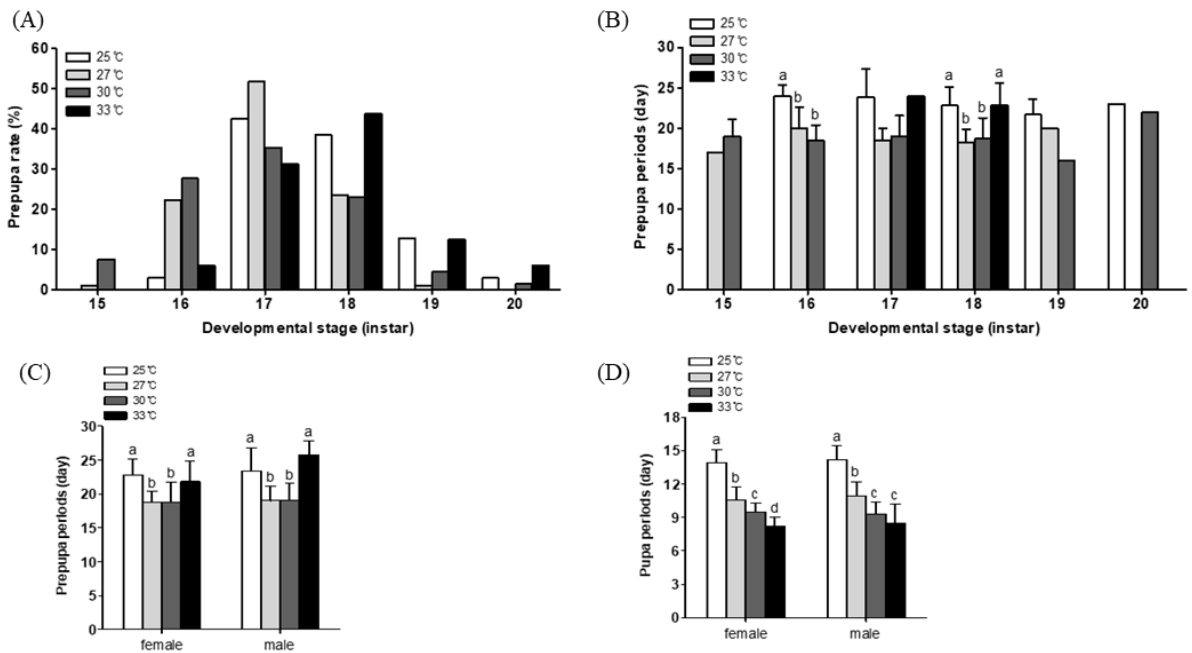


Fig. 8. Analysis of *Z. atratus* prepupae and pupae period with varying temperature (A) Prepupae rate of *Z. atratus* with varying temperature (B) Prepupae period of *Z. atratus* with varying temperature (C) Prepupae period of *Z. atratus* males and females with varying temperature (D) Pupa periods of *Z. atratus* males and females.

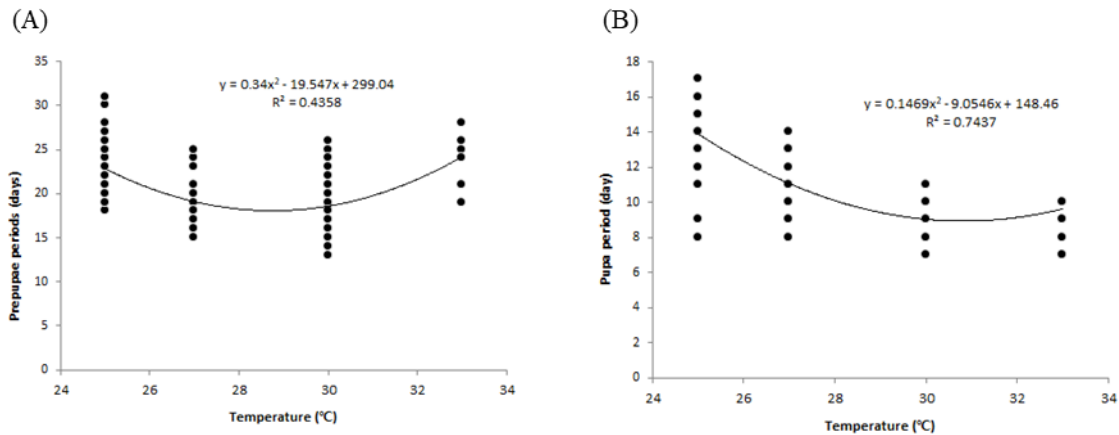


Fig. 9. Regression analysis of *Z. atratus* prepupae and pupae period with varying temperature (A) Regression analysis of prepupae period with varying temperature (ANOVA test $F_{2,235} = 90.774$, $p = 0.0001$, $DW = 1.368$) (B) Regression analysis of pupae period with varying temperature ($F_{2,234} = 339.466$, $p = 0.0001$, $DW = 1.356$).

는 경향이였다(온도별 암컷 전용기간: $F_{(3,105)} = 26.848$, $p = 0.0001$; 온도별 수컷 전용기간: $F_{(3,126)} = 28.935$, $p = 0.0001$). 온도별 전용기간에 대한 상관분석 결과, 온도 간에 유의성이 확인되었다($R = -0.378$, $p = 0.0001$). 하지만 암수별 전용기간은 암컷 20.3 ± 3.0 일, 수컷은 20.9 ± 3.5 일로 암·수간의 전용기간에는 차이가 없었다(Fig. 8C). 온도에 따른 암수별 번데기기간의 경우, 전용기간과 같은 경향으로 온도가 높을수록 짧아지는 경향을 보였다(Fig. 8D, 온도별 암컷 번데기기간: $F_{(3,137)} = 144.755$,

$p = 0.0001$; 온도별 수컷전용기간: $F_{(3,148)} = 142.364$, $p = 0.0001$). 온도별 번데기기간에 대한 상관분석 결과, 온도 간에 유의성이 확인되었지만($R = -0.802$, $p = 0.0001$), 암수별 번데기기간은 각각 11.1 ± 2.2 일, 11.6 ± 2.4 일로 암수간의 차이가 없었다. 온도에 따른 전용기간에 대한 회귀분석결과, 이차회귀방정식은 $y = -0.34x^2 - 19.547x + 299.04$, $R^2 = 0.4358$, ANOVA test $F_{2,235} = 90.774$, $p = 0.0001$, $DW = 1.386$ 로 확인되어 온도에 따라 전용기간이 유의적으로 영향을 받는 것으로 확인되었

다(Fig. 9A). 또한 온도에 따른 번데기기간에 대한 회귀분석 결과, 이차회귀방정식은 $y = -0.1469x^2 - 9.0546x + 148.46$, $R^2 = 0.7437$, ANOVA test $F_{2,234} = 339.466$, $p = 0.0001$ 로 확인되어 온도에 유의적으로 영향을 받는 것으로 확인되었다(Fig. 9B).

고찰

아메리카왕거저리는 남아메리카와 멕시코의 남부지역에서 식하는 거대 딱정벌레 목으로 주로 열대과일인 구아노와 그 과일즙에서 발견된다(Tschinkel and Willson, 1981; Quennedey et al., 1995). 이러한 열대기후종의 특성에 따라 실험 온도 조건 중 30°C 및 33°C 조건에서 발육이 좋은 것으로 나타났다. 다른 열대기후 종 중 긴날개여치 (*Gampsocleis ussuriensis* Adelung; 메뚜기목: 메뚜기과)의 적정 사육온도에 관한 연구에서 온도 별 약충의 발육기간을 24, 28, 32, 36, 40°C 조건으로 연구한 결과, 가장 발육기가 단축된 온도 조건은 40°C였다. 즉, 온도가 높을수록 발육기간이 짧아지며 생존율은 32°C에서 77.8%로 가장 높았다(Lim et al., 2019). 그러나 36°C 이상의 고온에서 먹이 식물인 포토묘가 빨리 시들어버리는 경향으로 실내사육온도에서는 적합하지 않았고 생존율과 무게로 보았을 때 30°C가 가장 최적 온도 조건임을 확인하였다(Lim et al., 2019). 이러한 결과는 본 연구에서 고온으로 갈수록 발육기간이 짧아지고 발달이 좋은 점은 있으나 33°C 이상의 고온에서 폐사율이 증가하여 적합한 온도조건이 될 수 없는 결과와 유사하였다.

본 연구에서 1-18령까지 아메리카왕거저리의 발육기간을 조사한 결과, 30°C가 20.0±5.8일로 가장 짧았고 그 다음이 33°C 132.6±10.7일, 27°C 136.5±9.2일, 25°C 156.7±7.5일이었으며, 33°C의 경우, 25°C, 27°C, 30°C에 비해서 폐사율이 2.7-3.3배나 높았다. Kim et al. (2015)의 다양한 령에 대한 유충의 발육 특성에 관한 연구결과에 따르면, 아메리카왕거저리 유충의 길이는 18령에서 최대에 도달했으며 폐사율은 2령에서 5령 사이에 주로 발생되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 폐사율이 1-5령의 폐사율이 19.6-35.4%로 확인되고 10령까지 25.7-41.5%에서 확인되어 초기 령에서 폐사가 확인되는 Kim et al. (2015)의 결과와 유사하게 나타나지는 않았다.

본 연구에서는 33°C를 제외하고 온도가 높을수록 발육기간이 단축되는 경향이었으며, 온도 별 발육기간은 고도의 통계적 유의성을 나타내었다. 25, 27, 30, 33 °C의 온도 조건 중 30 °C에서 유충 발육의 경과 일수가 짧으며 무게, 체장, 체폭, 두폭 등이 증가하여 안정된 발육과 생존율을 보였다. 아메리카왕거저리 전용기간을 조사한 결과, 대부분의 유충은 온도에 관계없이 16령에서 18령까지 전용기에 들어갔다(Fig. 8A). 이는 온도 조

건이 발육과 전용율에 큰 영향을 미치며 유충의 전용 시기가 개체 간의 일장과 온도에 대한 감수성 차이라고 생각된다. 또한 암수별 번데기 기간과 전용기간에서 온도가 높을수록 기간이 짧아지는 경향이 있었다. 본 연구에서 아메리카왕거저리를 온도 별 사육했을 경우 30°C에서 특히 15령과 18령까지의 유충 경과 일수는 다른 온도의 경과 일수에 비해 비교적 짧게 나타났고, 전용이 되는 시기는 27°C에서 약 50% 이상이 일어났으며 33°C에서 약 40% 이상 전용되었다. 온도 33°C에서 유충 발육의 경과 일수가 비교적 짧고 체중이 증가하는 등 발육 특성이 양호하고 번데기, 전용기간에서는 폐사율이 낮았으나, 유충 단계에서 폐사율이 높은 단점이 있었다.

온도에 따라 무게, 체장, 체폭, 두폭, 발육기간에 대한 다변량 분산분석 결과, 무게, 체장, 발육기간이 유의미한 차이가 있었고, 이중 Π^2 값에 대한 비교분석 결과, 발육기간($\Pi^2 = 0.885$)이 무게($\Pi^2 = 0.216$)나 체장($\Pi^2 = 0.158$)보다 온도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 온도에 따른 가장 효과적인 발육기간, 무게, 체장에 대한 회귀분석 결과, 모두 유의미한 회귀식이 도출되었다. 각 2차 회귀모형을 통하여 온도가 30°C 일 때 121.04일로 발육기간이 가장 짧았고, 29.3°C 일 때 219.5 mg으로 가장 무거웠으며, 30°C 일 때 33.8 mm로 가장 긴 유충을 얻을 수 있었다. 그러나 무게와 체장 회귀식의 설명력은 각각 0.157, 0.293로 발육기간은 0.721에 비해 비교적 낮아 높은 예측률을 기대하기 어렵지만, 세 가지 변수 모두 29-30°C의 범위에서 가장 효과적인 결과를 나타내기 때문에 이 온도 범위에서 아메리카왕거저리를 사육하는 것이 가장 효과적으로 생각된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 식용곤충 후보종 발굴 및 대량생산기술 개발, 세부과제번호: PJ01267002)를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 바탕으로 작성하였다.

저자 직책 & 역할

곽규원: 국립농업과학원, 전문연구원; 논문작성, 실험수행
김선영: 국립농업과학원, 농업연구사; 실험수행, 자료정리
이경용: 국립농업과학원, 농업연구사; 자료분석 및 검토
윤형주: 국립농업과학원, 농업연구관; 실험설계, 실험수행 및 분석, 검토, 논문작성

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

Literature Cited

- Aksit, T., Cakmak, I., Ozer, G., 2007. Effect of temperature and photoperiod on development and fecundity of an acarophagous ladybird beetle, *Stethorus gilvifrons*. *Phytoparasitica* 35, 357-366.
- Aribi, N., Quennedey, A., Pitoizet, N., Delbecque, J.-P., 1997. Ecdysteroid titres in a Tenebrionid beetle, *Zophobas atratus*: effects of grouping and isolation. *J. Insect Physiol.* 43, 815-821.
- Connat, J.L., Delbecque, J.-P., Glietho, I., Delachambre, J., 1991. The onset of metamorphosis in *Tenebrio molitor* larvae (Insecta, Coleoptera) under grouped, isolated and starved conditions. *J. Insect Physiol.* 37, 653-662.
- Feyereisen, R., 1985. Regulation of juvenile hormone titer: synthesis, in: Kerkut, G.A., Gilbert, L.I. (Eds), *Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, Pergamon Press, Oxford, Vol 7, pp. 391-429.
- Ghaly, A.E., Alkoaik, F.N., 2009. The yellow mealworm as a novel source of protein. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 4, 319-331.
- Godfray, H.C.J., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Nisbett, N., Pretty, J., Robinson, S., Toulmin, C., Whiteley, R., 2010. The future of the global food system. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 365, 2769-2777.
- Kim, S., Kim, J.C., Lee, S.J., Kim, J.S., 2016. Establishment of optimal rearing conditions for the production of *Tenebrio molitor* Larvae. *Kor. J. Appl. Entomol.* 55, 421-429.
- Kim, S., Park, H.-C., Kim, N., Park, I., 2018. Effect of photoperiod and temperature on the reproductive responses of *Protaetia brevitarsis*. *Int. J. Indust. Entomol.* 37, 90-94.
- Kim, S.Y., Kim, H.G., Song, S.H., Kim, N.J., 2015. Developmental characteristics of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae in different instars. *Int. J. Indust. Entomol.* 30, 45-49.
- Kwak, K.-W., Kim, S.Y., Ko, H.-J. Lee, K.Y., Song, J.-H., Yoon, H.J., 2021. Optimal hatching conditions of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae) eggs under various culture conditions. *J. Asia-Pacific Entomol.* 24, 1107-1115.
- Kwak, K.-W., Kim, S.Y., Lee, K.Y., Kim, Y.-S., Yoon, H.J., 2022. Maximizing the hatchability of *Locusta migratoria* (Orthoptera: Acrididae) eggs under artificial hatching conditions. *Entomol. Res.* 52, 90-98.
- Lim, J.R., Moon, H.C., Park, N.Y., Lee, S.S., Yoo, Y.J., 2019. Analysis of the developmental and ovipositional characteristics for interior mass-rearing of *Gampsocleis ussuriensis* Adelung. *Kor. J. Appl. Entomol.* 58, 381-387.
- Ludwig, D., 1956. Effects of temperature and parental age on the life cycle of the mealworm *Tenebrio molitor* L. *Ann. Ent. Soc. Am.* 49, 12-15.
- MacEvilly, C., 2000. Bugs in the system. *Nutr. Bull.* 25:267-268.
- Megido, R.C., Sablon, L., Geuens, M., Brostaux, Y., Alabi, T., Blecker, C., Drugmand, D., Haubruge, É., Francis, F., 2013. Edible insects acceptance by Belgian consumers: promising attitude for entomophagy development. *J. Sens. Stud.* 29, 14-20.
- Nakagaki, B.J., Defoliart, G.R., 1991. Comparison of diets for mass-rearing *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) as a novelty food, and comparison of food conversion efficiency with values reported for livestock. *J. Econ. Entomol.* 84, 891-896.
- Nonaka, K., 2009. Feasting on insects. *Entomol. Res.* 39, 304-312.
- Park, H.C., Jung, B.H., Han, T., Lee, Y.B., Kim, S.H., Kim, N.J., 2013. Taxonomy of introduced commercial insect, *Zophobas atratus* (Coleoptera; Tenebrionidae) and a comparison of DNA barcoding with similar tenebrionids, *Promethis valgipes* and *Tenebrio molitor* in Korea. *J. Seric. Entomol. Sci.* 51, 185-190.
- Price, P.W., 1997. *Insect ecology*. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Quennedey, A., Aribi, N., Everaerts, C., Delbecque, J.-P., 1995. Postembryonic development of *Zophobas atratus* Fab. (Coleoptera: Tenebrionidae) under crowded or isolated conditions and effects of juvenile hormone analogue applications. *J. Insect Physiol.* 41, 143-152.
- Riddiford, L.M., 1976. Hormonal control of insect epidermal cell commitment in vitro. *Nature* 259, 115-117.
- Roff, D.A., 1992. *The evolution of life histories: theory and analysis*. Chapman & Hall. New York.
- Tschinkel, W.R., Willson, C.D., 1981. Inhibition of pupation due to crowding in some tenebrionid beetles. *J. Exp. Zool.* 176, 137-146.
- Tyschchenko, V.P., Sheyk, B.A., 1986. Photoperiodic regulation of larval growth and pupation of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *Ent. Rev.* 65, 35-46.
- Urs, K.C.D., Hopkins, T.L., 1973. Effect of moisture on growth rate and development of two strains of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera, Tenebrionidae). *J. Stored Prod. Res.* 8, 291-297.
- Van Huis, A., 2013. Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Ann. Rev. Entomol.* 58, 563-583.
- Van Huis, A., Van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., Vantomme, P., 2013. *Edible insects: future prospects for food and feed security*. FAO Forestry Paper 171. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Whitman, D.W., Ananthakrishnan, T.N., 2009. *Phenotypic plasticity of insects: mechanisms and consequences*, 1st ed., Science publishers, New Hampshire.
- Yoo, J.M., Hwang, J.S., Goo, T.W., Yun, E.Y., 2013. Comparative analysis of nutritional and harmful components in Korean and Chinese mealworms (*Tenebrio molitor*). *J. Kor. Soc. Food Sci. Nutr.* 42, 249-254.
- Yoon, H.J., Mah, Y.I., Moon, J.Y., 2000. Effect of rearing temperature and photoperiod on the larval developmental growth of *Apriona germari* Hope. *Int. J. Indust. Entomol.* 1, 137-141.
- Yoon, H.J., Park, H.-C., Kim, S. Y., Lee, K. Y., Shin, M., Ko, H.-J., Nam, S.-H., 2020. Re-examination of supermealworm as edible insects, 1st ed., *Rural Development of Agriculture*, Wanju, Republic of Korea.