

갈색거저리(*Tenebrio molitor* L.) 유충의 온도발육 모형구희연\*\* · 김선곤 · 오형근 · 김정은 · 최덕수 · 김도익\* · 김익수<sup>1</sup>전남농업기술원 연구개발국, <sup>1</sup>전남대학교 농업생명과학대학 친환경농업연구소Temperature-dependent Development Model of Larvae of Mealworm beetle, *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae)Hui-Yeon Koo\*\*, Seon-Gon Kim, Hyung-Keun Oh, Jung-Eun Kim, Duck-Soo Choi, Do-Ik Kim\* and Iksoo Kim<sup>1</sup>

Jeonnam Agricultural Research &amp; Extension Services, Naju 520-715, Republic of Korea

<sup>1</sup>Institute of Environmentally-Friendly Agriculture, College of Agriculture & Life Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Republic of Korea

**ABSTRACT:** The developmental times of mealworm beetle larvae, *Tenebrio molitor* were studied at six temperatures ranging from 15 to 30°C with 60~70% RH, and a photoperiod of 14L:10D. Mortality of larval period was very low at 17 and 20°C but did not die over 22°C. Developmental time of larva was decreased with increasing temperature. The total developmental time of *T. molitor* larvae was longest at 17°C (244.3 days) and shortest at 30°C (110.8 days). Egg and larvae were not developed at 15°C. The lower developmental threshold and effective accumulative temperatures for the total larval stages were 6.0°C and 2564.1 degree-days, respectively. The relationship between developmental rate and temperature was fitted by a linear model and nonlinear model of Logan-6( $r^2=0.95$ ). The distribution of completion of each development stage was well described by the 2-parameter Weibull function ( $r^2=0.8502\sim 0.9390$ ).

**Key words:** *Tenebrio molitor*, Developmental time, Lower developmental threshold, Degree-day, Temperature

**초록:** 갈색거저리의 온도에 따른 유충 발육시험을 15, 17, 20, 22, 25, 28 및 30°C의 7개 항온조건, 광주기 14L:10D, 상대습도 60~70% 조건에서 수행하였다. 유충은 13령까지 경과하였고 항온 조건에서 사망률은 17, 20°C에서 극소수 개체만이 발견되었고, 22°C 이상의 항온조건에서는 발견되지 않았다. 유충의 발육기간은 17°C에서 244.3일로 가장 길었고, 30°C에서 110.8일로 가장 짧았다. 15°C는 부화되지 않아 유충 발육 조사가 불가능하였다. 온도와 발육율과의 관계를 알아보기 위하여 선형모형과 비선형모형(Logan 6)을 이용하였으며, 선형모형을 이용하여 추정된 전체유충의 발육영점온도는 6.0°C, 발육 유효적산온도는 2564.1DD였으며 선형, 비선형 모두 결정계수값( $r^2$ )이 0.95로 높은 값을 보였다. 전체 유충의 발육완료분포는 2-parameter Weibull 함수를 사용하였으며 전체 유충의 결정계수 값은 0.8502~0.9390의 양호한 모형 적합성을 보였다.

**검색어:** 갈색거저리, 발육기간, 발육영점온도, 유효적산온도, 온도

갈색거저리(*Tenebrio molitor* L., yellow mealworm beetle)는 전세계에 분포하고 야생에서 보통 1년 1세대 경과하지만 간헐적으로 1년 2세대, 2년 1세대를 경과하고, 실내사육시 1년 3~4세대 경과하며 최대 6세대까지 사육할 수 있다(Liu et al., 2011). 밀웜으로 불리는 갈색거저리 유충은 저장곡물을 가해하는 해충으로 알려져 있으나 최근 관리조건의 개선과 관리수준

이 높아지면서 야생에서는 거의 존재하지 않는 것으로 알려져 있다(Liu et al., 2011).

대부분의 딱정벌레목(Coleoptera) 유충은 3~5령을 경과하지만 불규칙적으로 영기를 경과하는 딱정벌레목은 갈색거저리를 포함하여 7과(Family) 21종(Species)이 존재하는 것으로 보고되어 있다(Eesperk et al., 2007). 갈색거저리 유충은 12~24령까지 존재하는 것으로 알려져 있으며, 건조 조건일 경우 평균 15령을 경과하고 적정 습도(65~75%) 조건의 경우 12~14령을 경과하며 대부분은 13령을 경과하는 것으로 알려져 있다(Ludwig, 1956; Ludwig and Fiore, 1960; Murray, 1968; Urs and Hopkins,

\*Corresponding author: doik1020@korea.kr

\*\*Co-corresponding author: huiyon@korea.kr

Received October 7 2013; Revised November 6 2013

Accepted November 22 2013

1973; Tyshchenko and Ba, 1986; Weaver and Mcfarlane, 1990; Connat et al., 1991). 중국에서는 100여년 전부터 갈색거저리가 사육되어졌으며 최근에는 식용, 가금류 사료 및 애완동물 먹이로의 산업이 활발히 진행되고 있고(Liu et al., 2011), 국내의 경우 곤충을 사료화하는 산업이 점차적으로 증가되고 있으므로 생태적 특성의 기초적인 선행연구 자료가 필요한 실정이다.

곤충의 발생시기, 발생밀도, 분포 등 개체군 기초 생태에 영향을 미치는 가장 중요한 물리적 요인 중 하나가 온도이며, 곤충의 밀도 변동을 예측하기 위한 기본적 요소로서 곤충발육과 온도와의 관계를 해석하고자 많은 노력이 있어왔다(Campbell et al., 1974; Logan et al., 1976; Schoolfield et al., 1981; Lactin et al., 1995; Briere and Pracros, 1998; Briere et al., 1999; Kim et al., 2001). 곤충의 발육속도와 온도와의 관계를 직선회귀식을 이용하여 영점발육온도와 유효적산온도를 추정하면 저온이나 고온 부근에서 현저하게 발육속도가 억제되어 전체적으로 S자 형태를 가지게 되므로 곤충의 발육율을 해석하는데 오차가 발생하는 단점이 있어(Howe, 1967; Scopes and Biggerstaff, 1977), 이를 보완하기 위하여 발육속도와 온도와의 관계를 선형, 비선형 모델로 해석하는 방법들이 제시되었다(Logan et al., 1976; Sharpe and DeMichele, 1977; Schoolfield et al., 1981; Taylor, 1981; Lactin et al., 1995; Briere et al., 1999; Tobin et al., 2001; Roy et al., 2002; Kontodimas et al., 2004; Logan et al., 2006).

동일한 연령집단의 개체를 동시에 사육하더라도 동일한 날에 모든 개체가 동시에 발육을 완료할 수 없으므로 발육이 완료되는 분포 모델이 필요하다. 동일한 발육단계의 집단이 시간의 흐름에 따라 발육이 완료되는 분포 모델은 발육속도 개념에 근거한 발육율을 적산하여 예측하는 방법이 제시되었으며(Curry et al., 1978a, b; Schoolfield et al., 1981; Wagner et al., 1984a, b), 이를 기초로 다양한 곤충종의 발육에 대한 연구결과가 발표되었다(Han et al., 1993; Kim and Lee, 2003; Kim et al., 2004; Park et al., 2010; Jeon et al., 2011; Park et al., 2011; Kim et al., 2012).

갈색거저리는 고단백 영양성분으로 동물 사료용으로 활용되고 있으며 시장 규모 확대에 따른 대량사육기술이 요구되고 있는 실정이다. 그러므로 온도에 따른 발육특성을 파악하고, 온도발육 모형과 발육완료 모형을 활용하여 적정 실내 사육온도 등 대량사육 조건을 추정하기 위한 기초적인 연구를 수행하였고 추후 추가적인 연구에 활용하기 위하여 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 갈색거저리(*Tenebrio molitor* L.) 사육

갈색거저리(*T. molitor* L.)는 전남농업기술원 곤충잡업연구소 사육실(25°C±3°C, 50~70% RH, L:D=14:10)에서 5세대 이상 누대 사육한 개체를 사용하였다. 갈색거저리 사육을 위하여 먹이원은 밀기울(wheat bran)을 사용하였고, 채란방법은 밀기울이 들어 있는 사육용기(w60Xd40Xh20 cm)에 갈색거저리 성충 300~350마리를 넣고 3~4일간 알을 받은 후 성충은 다른 사육장으로 이동시키는 방법으로 30일간 알을 받았다. 1~7령 유충은 사육용기당 1000~1500마리를 사육하고 8령 유충 이후는 과밀을 방지하기 위하여 500~700마리를 사육하였다.

### 유충의 항온조건간 발육기간 및 사망률

유충발육기간 조사는 우화된 성충 50쌍을 사육용기에 넣어 24시간 동안 알을 받았다. 동일한 조사일에 부화한 유충은 15마리씩 Ø9 cm 페트리디쉬에 밀기울을 먹이원으로 항온조건간 3개 반복구로 다단실험온기(NK-system TG-100-ADCT, ±1.0°C, RH 60~70%, L:D=14:10)에 7개 항온조건(15, 17, 20, 22, 25, 28 및 30°C)으로 발육조사를 수행하였다. 24시간 간격으로 발육상태를 조사하였으며 각 영기는 13령을 기준으로 부화된 개체는 1령, 탈피각이 발견된 개체는 다음 발육단계로 발달한 것으로 간주하였으며 발육기간은 발육개시일부터 다음 영기로 탈피가 이루어진 시기까지 계산하였다. 갈색거저리 유충기간에 대하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였고 평균간 비교는 Duncan's test (p<0.001)를 이용하였다.

### 온도발육 모형 및 발육 완료 분포 모형

#### 선형모형

온도와 발육율과의 관계를 나타낸 선형 모형은 최소자승법(Campbell et al., 1974)을 사용하여 구하였으며(수식 1), 온도에 따른 유충의 영기별 발육율은 발육단계별 평균 발육기간의 역수로 계산하였다.

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

수식 1에서  $r(T_c)$ 는 실험온도에서의 발육율,  $T_c$ 는 실험온도(°C),  $a$ 는 직선회귀식의 기울기이며,  $b$ 는 0°C에서 발육율이다.

직선회귀 분석은 17~30°C의 6개 항온조건에서 얻어진 발육율을 이용하였으며, 매개변수의 추정은 SAS의 PROC REG (SAS Institute, 1999)를 사용하였다. 유충 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 비선형 관계는 Logan 6 (Logan et al., 1976)을 이용하여 구하였다(수식 2).

$$r(T_c) = \Psi(e^{pT_c} - e^{(pT_L - (T_L - T_c)/\Delta T)}) \quad (2)$$

수식 2에서는  $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율,  $\Psi$ 는 최대발육율,  $T_c$ 는 온도(°C),  $p$ 는 최적온도에서 발육율 상수,  $T_L$ 은 치사 상한 온도,  $\Delta T$ 는 고온부분 경계지역의 온도 범위로서 생리적인 장애가 최우선 영향이 되는 온도 범위를 의미한다. 비선형 모형의 매개변수 추정을 위해서 윈도우용 TableCurve 2D ver. 5.01 (SYSTAT, 2002)의 사용자 정의 비선형 모형 분석을 사용하였다.

### 유충 발육완료 분포 모형

각 발육단계별 발육완료 분포 모형을 구하기 위하여 2-parameter Weibull 모형을 사용하였다(Wagner et al., 1984a) (수식 3).

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/\eta)^\beta] \quad (3)$$

수식 3에서  $F(x)$ 는 표준화된 시간  $x$  (발육기간/평균발육기간)에서 동일한 연령집단의 개체들 중에 다음 연령단계로 발육이 완료된 누적 개체수들의 비율을 의미한다.  $\eta$ ,  $\beta$ 는 비선형 회귀식의 매개변수이며, 이를 추정하기 위하여 윈도우용 TableCurve 2D ver. 5.01 (SYSTAT, 2002)을 이용하여 분석하였다.

### 발육모형 평가

발육모형 평가는 전남농업기술원 곤충잡업연구소 곤충사육실에서 2013년 3월 4일에 부화한 1령 유충을 사육용기(w60Xd40Xh20 cm)에 500마리를 넣고 먹이원은 밀기울과 채소류를 주기적으로 제공하였고, 2013년 3월 4일부터 용이 되는

날까지 유충 기간을 조사하였으며, 곤충사육실 사육온도는 28°C±1°C를 유지하였다. 발육완료 분포 모형은 2-parameter Weibull 모형을 사용하였다(Wagner et al., 1984a) (수식 3).

## 결과 및 고찰

### 온도에 따른 유충의 발육 특성 및 발육 모형

갈색거저리 유충 발육을 조사한 결과 1령~13령까지 경과하였고, Urs and Hopkins (1973)는 12.2령, Liu et al. (2011)은 10~15령을 경과하는 것으로 보고되어 본 연구결과와 유사하였다. 항온 조건별 발육조사 결과 15°C에서는 알에서 유충으로 부화하지 않았고, 17°C~30°C까지 유충의 발육기간은 17°C에서 244.3일로 가장 길었고 온도가 증가함에 따라 발육기간이 짧아졌으며 30°C에서 가장 짧은 110.8일이 소요되었다(1st larva F=37.3, df=5, P<0.001, 2nd F=103.1, df=5, P<0.001, 3rd F=47.9, df=5, P<0.001, 4th F=29.0, df=5, P<0.001, 5th F=36.6, df=5, P<0.001, 6th F=49.3, df=5, P<0.001, 7th F=84.8, df=5, P<0.001, 8th F=45.6, df=5, P<0.001, 9th F=54.7, df=5, P<0.001, 10th F=50.8, df=5, P<0.001, 11th F=49.2, df=5, P<0.001, 12th F=31.3, df=5, P<0.001, 13th F=14.5, df=5, P<0.001). Liu et al. (2011)은 중국 전통적 사육 조건에서 갈색거저리 유충기간은 80~130일, 최대 유충 발육기간은 480일, 유충 평균기간은 120일로 보고되었으며 본 연구결과와 비교해 보았을 때 최대 유충 발육기간은 차이를 보였고 유충 평균기간은 25°C(126.8일), 28°C(125.2일)로 유사하였다. 유충기간과 유충 영기별 발육기간을 보면 모든 온도조건에서 2령~13령의 발육기간은 영기가 발달함에 따라 점차적으로 기간이 증가하는 경향을 보였으나 1령 유충기간은 다른 영기와 비교해 보았을 때 현저히 짧음을 확인하였다(Table 1).

온도에 따른 유충 사망률을 비교한 결과 22, 25, 28 및 30°C는 치사개체가 발견되지 않았으며, 17, 20°C는 4.4, 2.2%로 낮은 사망률이 발견되었다. Urs and Hopkins (1973)는 건조 조건에서 갈색거저리 유충의 사망률이 증가하였다고 보고하였으나 본 연구에서는 적정 습도(60~70%)를 유지 하였으므로 습도에 의한 치사로 판단하기 어렵다. 또한 유충 치사개체가 저온(17, 20°C)에서 발견되는 경향은 있었으나 저온에서 치사개체가 전 영기에 고루 분포하는 것이 아닌 특정 영기에 소수 개체만이 발견되어 저온에 의한 치사로 판단하기 어렵다. 즉 온도 및 습도를 포함한 환경적인 요인 보다 자연치사로 추론된다(Table 2).

유충의 각 발육단계별 온도와 발육율의 관계를 직선회귀식에 의해 분석한 결과는 Table 3, Fig. 1과 같이 나타났다. 유충

**Table 1.** Development period (day, mean±SE) for larval stages of *Tenebrio molitor* at various temperatures

Stage	Temp. (°C)					
	17	20	22	25	28	30
1 <sup>st</sup>	6.0±1.67j*	4.9±0.47j	4.3±0.95j	3.0±0.32j	3.0±0.32j	1.7±0.21j
2 <sup>nd</sup>	21.8±2.84fgh	12.5±0.43i	10.6±3.38hi	9.0±0.54hi	9.0±0.57hi	4.5±1.16i
3 <sup>rd</sup>	19.6±4.50efg	13.0±0.84hi	9.9±2.92i	8.0±0.71i	8.0±0.70i	6.8±1.02h
4 <sup>th</sup>	15.4±2.42i	13.5±2.22hi	10.6±3.51hi	8.0±1.24i	7.8±1.09i	7.2±0.78gh
5 <sup>th</sup>	20.4±4.69def	15.5±4.23fg	9.8±1.71i	8.5±1.84hi	8.3±1.70hi	6.9±0.84gh
6 <sup>th</sup>	16.4±3.08hi	14.2±0.96gh	9.8±1.94i	8.4±1.26hi	8.2±1.16hi	7.5±0.88gh
7 <sup>th</sup>	18.8±2.34fgh	15.8±1.53de	12.5±2.47gh	8.2±0.95i	8.2±0.98hi	8.0±0.87fg
8 <sup>th</sup>	17.0±2.85ghi	17.9±0.91bc	12.9±2.92gh	9.6±1.46h	9.5±1.49g	9.0±1.22de
9 <sup>th</sup>	19.8±2.30efg	17.1±0.76cd	14.7±3.15g	10.8±1.02g	10.7±1.05g	9.4±1.71d
10 <sup>th</sup>	21.0±2.85def	18.5±1.01abc	14.5±1.93g	12.7±1.54f	12.8±1.61f	11.0±1.35c
11 <sup>th</sup>	22.1±3.01cde	18.6±0.92abc	12.8±2.19gh	13.7±1.38f	13.6±1.43e	12.2±1.58b
12 <sup>th</sup>	22.8±3.06c	19.0±1.40ab	14.3±2.28g	16.9±2.58d	17.1±2.63d	13.0±1.63ab
13 <sup>th</sup>	23.2±1.23dc	19.9±2.03a	18.5±5.28e	15.7±1.70e	15.5±1.71e	13.5±1.42a
Total	244.3±36.84a**	200.3±17.7b	155.2±34.6c	126.8±11.2d	125.2±10.5d	110.8±14.66e

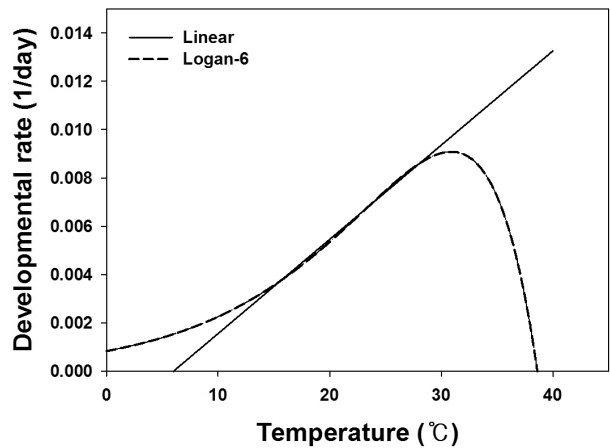
\* Values followed by the same letter within a column are not significantly different (P>0.001, DMRT).

\*\* The means followed by same letter in a row are not significantly different (P>0.001, DMRT).

**Table 2.** Stage-specific mortality of *Tenebrio molitor* at various temperature in the laboratory

Stage	n	Temp. (°C) and Larval mortality (%)					
		17	20	22	25	28	30
1 <sup>st</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2 <sup>nd</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3 <sup>rd</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8 <sup>th</sup>	45	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9 <sup>th</sup>	45	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
10 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11 <sup>th</sup>	45	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13 <sup>th</sup>	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	-	4.4	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0

각 발육단계별 결정계수( $r^2$ )는 유충의 경우 0.5775~0.9821였으며, 유충 전체는 0.9514의 모형적합성을 나타내었다(1st larva F=18.8, df=4, P>0.001, 2nd F=13.2, df=5, P>0.001, 3rd F=82.5, df=4, P<0.001, 4th F=31.4, df=4, P>0.001, 5th F=51.4, df=4, P>0.001, 6th F=47.4, df=4, P>0.001, 7th



**Fig. 1.** Development rate curves (1/day) for total larval stage of *Tenebrio molitor*. The linear and non-linear (Logan 6) models were used.

F=38.4, df=4, P>0.001, 8th F=33.1, df=4, P>0.001, 9th F=90.8, df=4, P<0.001, 10th F=60.8, df=4, P>0.001, 11th F=10.4, df=4, P>0.001, 12th F=5.5, df=4, P>0.001, 13th F=41.6, df=4, P>0.001). 1령~13령 유충까지 발육 영점온도는 12.3, 13.1, 8.9, 5.4, 9.6, 6.0, 8.8, 6.0, 6.0, 1.9, 3.1, 7.3, 9.4°C였으며 전체유충은 6.0°C였다 유효적산온도는 온도와 발육 1령~13령 유충까지 발육단계별 유효적산온도는 36.6, 94.3, 142.9, 170.4, 140.9, 174.5, 157.2, 205.8, 222.2, 311.5, 395.3, 518.1,

**Table 3.** Estimated parameters of a linear model regression development stage of *Tenebrio molitor*

Stage	Intercept	Slope	Lower threshold temperature *	Degree Days (DD)**	r <sup>2</sup>
1 <sup>st</sup>	-0.3367	0.02730	12.3	36.6	0.8243
2 <sup>nd</sup>	-0.1389	0.01060	13.1	94.3	0.7668
3 <sup>rd</sup>	-0.0620	0.00700	8.9	142.9	0.9537
4 <sup>th</sup>	-0.0315	0.00587	5.4	170.4	0.887
5 <sup>th</sup>	-0.0679	0.00710	9.6	140.8	0.9278
6 <sup>th</sup>	-0.0343	0.00573	6.0	174.5	0.9221
7 <sup>th</sup>	-0.0562	0.00639	8.8	157.2	0.9056
8 <sup>th</sup>	-0.0290	0.00486	6.0	205.8	0.9821
9 <sup>th</sup>	-0.0274	0.00450	6.0	222.2	0.9578
10 <sup>th</sup>	-0.0061	0.00321	1.9	311.5	0.9383
11 <sup>th</sup>	-0.0078	0.00253	3.1	395.3	0.7225
12 <sup>th</sup>	-0.0141	0.00193	7.3	518.1	0.5775
13 <sup>th</sup>	-0.0225	0.00240	9.4	416.7	0.9122
Total	-0.00234	0.00039	6.0	2564.1	0.9514

\* Low threshold temperature = | intercept / slope |.

\*\* Degree Days = 1 / slope.

**Table 4.** Estimated parameters of a non-linear model for development stages of *Tenebrio molitor*

Stage	$\psi$	$\rho$	$T_L$	$\Delta T$	r <sup>2</sup>
1 <sup>st</sup>	0.02575	0.1004	224.215	4.054	0.8935
2 <sup>nd</sup>	0.00750	0.1049	225.928	4.052	0.7779
3 <sup>rd</sup>	0.01620	0.1522	35.766	5.925	0.9574
4 <sup>th</sup>	0.01990	0.1419	35.397	6.223	0.9234
5 <sup>th</sup>	0.01550	0.1493	36.573	6.037	0.9208
6 <sup>th</sup>	0.01770	0.1382	35.920	6.290	0.9449
7 <sup>th</sup>	0.00857	0.1771	33.880	5.099	0.9605
8 <sup>th</sup>	0.01198	0.0864	33.935	2.595	0.9269
9 <sup>th</sup>	0.01236	0.1110	38.812	6.568	0.9631
10 <sup>th</sup>	0.02200	0.1003	40.164	8.200	0.9414
11 <sup>th</sup>	0.02397	0.1110	36.790	7.730	0.7761
12 <sup>th</sup>	0.04500	0.0667	48.620	12.560	0.5715
13 <sup>th</sup>	0.01650	0.0705	31.130	1.320	0.7232
Total	0.00226	0.1235	38.620	7.380	0.9515

416.7일도였으며 유충 전체 발육에 필요한 유효적산온도는 2564.1일도가 필요한 것으로 추정되었다(Table 3). 유효적산온도는 온도와 발육속도간의 직선회귀식에서 얻은 기울기의 역수로 유효적산온도가 작은 것은 기울기가 큰 것을 의미하므로 온도변화에 따른 발육을 변화가 1령 유충에서 가장 크고 12령

유충에서 가장 작음을 알 수 있었다(Table 3). 곤충의 발육속도와 온도와의 관계를 보면 발육이 가능한 전 온도 범위에서 직선의 관계를 가지는 것이 아니고 발육에 필요한 최저온도에 가까워 오거나 발육상한인 고온 부근에 가게 되면 전체적으로 S자 형태를 가지게 되므로 직선식에 의한 발육속도와 온도의 해석에는 한계가 있어 이를 해결하기 위해 비선형 모델로 설명하려는 연구들이 수행되었다(Logan et al., 1976; Sharpe and DeMichele, 1977; Schoolfield et al., 1981; Lactin et al., 1995; Briere et al., 1999). 비선형 모형(Logan 6)을 이용하여 온도와 발육율과의 관계를 분석한 결과 1령, 2령 유충의 치사상한온도( $T_L$ )는 비현실적으로 추정되었으며, 3령~13령 유충은 31.1~48.6°C였으며, 총 유충기간은 38.6°C로 추정되었다(Table 4). Roy et al. (2002)에서 Logan 6 모델의 적정온도 추정( $T_L - \Delta T$ )을 적용하였을 때 1령과 2령 유충은 비현실적으로 추정되었고, 3령~13령 유충은 28.8~36.1°C로 추정되었으며, 총 유충기간은 31.2°C로 추정되어 적정 사육온도는 30°C 전후로 추정된다. 유충 각 발육단계별 결정계수( $r^2$ )는 유충의 경우 0.5775~0.9821였으며, 유충 전체는 0.9514의 모형적합성을 나타내었다(1st larva F=5.9, df=2, P>0.001, 2nd F=2.3, df=2, P>0.001, 3rd F=14.9, df=2, P>0.001, 4th F=8.0, df=2, P>0.001, 5th F=7.6, df=2, P>0.001, 6th F=11.4, df=2, P>0.001, 7th F=16.2, df=2, P>0.001, 8th F=8.5, df=2, P>0.001, 9th F=17.4, df=2, P>0.001, 10th F=10.7, df=2, P>0.001, 11th F=2.3, df=2, P>0.001, 12th F=0.9, df=2, P>0.001, 13th F=7, df=2, P>0.001). 그러나 Liu et al. (2011)은 갈색거저리의 치사고온을 45°C로 보고하여 본 연구와 차이를 보였다. 모형의 적합성을 나타내는  $r^2$  값이 1령, 2령, 11령, 12령, 13령 유충 발육단계에서 선형, 비선형 모형 모두 비교적 낮은 적합성을 보였고 특히 13령 유충 선형 모형은 0.3155의 매우 낮은 모형 적합성을 보였다. 반면 대부분의 영기는 비교적 높은 모형 적합성을 나타내었고, 유충 전체의 모형적합성은 선형( $r^2=0.9514$ ), 비선형( $r^2=0.9515$ ) 모두 높은 모형 적합성을 나타내었다(Table 3, 4).

### 발육완료 분포 모형

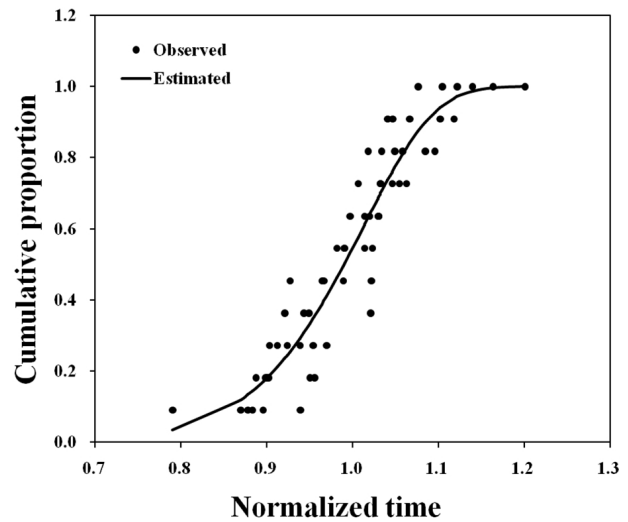
곤충의 발육율과 분포의 함수는 Curry et al. (1978a)의 방법으로 동일한 발육단계, 동일한 연령집단의 발육완료를 추정하였다. 각 항온조건별 개체들의 발육기간을 평균 발육기간으로 나눈 뒤 2-parameter Weibull 함수에 적용시켜 발육완료를 추정하였다. 각 발육단계별 모형 적합성을 나타내는  $r^2$  값이 0.8502~0.9390으로 양호한 모형 적합성을 보였으며(Table 5), 발육 평균 완료시기를 중심으로 대부분 분포하여 발육기간 변

**Table 5.** Estimated parameters of the two-parameter Weibull function for development completion of larvae of *Tenebrio molitor*

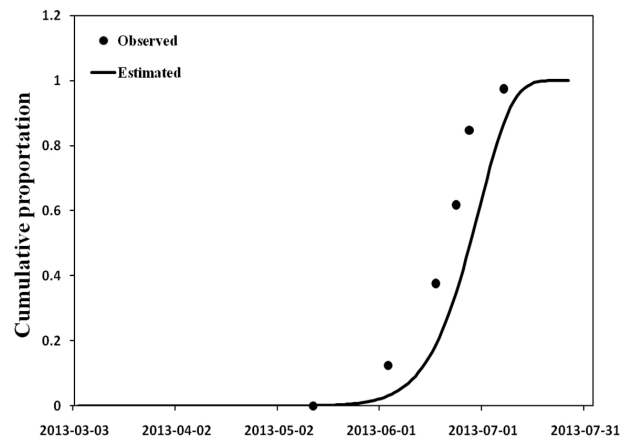
Stage	Parameter	Estimated value	SEM	r <sup>2</sup>
1 <sup>st</sup>	$\beta$	6.1255	0.7194	0.8502
	$\eta$	1.0069	0.0124	
2 <sup>nd</sup>	$\beta$	10.5887	0.8790	0.8886
	$\eta$	1.0083	0.0044	
3 <sup>rd</sup>	$\beta$	9.3344	0.7062	0.9024
	$\eta$	1.0140	0.0053	
4 <sup>th</sup>	$\beta$	7.0087	0.6572	0.8646
	$\eta$	1.0027	0.0081	
5 <sup>th</sup>	$\beta$	6.4040	0.5451	0.8865
	$\eta$	1.0101	0.0088	
6 <sup>th</sup>	$\beta$	7.1342	0.5416	0.9069
	$\eta$	1.0221	0.0079	
7 <sup>th</sup>	$\beta$	9.1249	0.5299	0.9390
	$\eta$	1.0197	0.0042	
8 <sup>th</sup>	$\beta$	7.6435	0.6489	0.8629
	$\eta$	1.0428	0.0070	
9 <sup>th</sup>	$\beta$	8.9023	0.7977	0.8756
	$\eta$	1.0153	0.0063	
10 <sup>th</sup>	$\beta$	10.7723	0.7023	0.9248
	$\eta$	1.0221	0.0040	
11 <sup>th</sup>	$\beta$	9.2091	0.6335	0.9122
	$\eta$	1.0236	0.0052	
12 <sup>th</sup>	$\beta$	8.5580	0.8964	0.8525
	$\eta$	1.0112	0.0077	
13 <sup>th</sup>	$\beta$	8.6908	0.8364	0.8707
	$\eta$	1.0128	0.0071	
Total	$\beta$	13.0948	0.9526	0.8917
	$\eta$	1.0179	0.0036	

이가 적은 것으로 판단된다(Fig. 2). 곤충사육실에서 갈색거저리 1령 유충을 대상으로 용이 되는 날의 비율을 조사하여 유충 발육모형 예측 값과 비교해본 결과 실제 조사값이 예측값보다 빠르게 나타났다(Fig. 3). 갈색거저리는 사료의 종류에 따라 유충의 성장발육에 직접 영향을 미친다고 보고된바 있고(Liu et al., 2011), 본 시험에서도 주사료인 밀기울과 보조사료인 채소류를 제공하여 수분을 보충할 수 있도록 사료를 제공하여 예측값보다 실제 조사값이 빠르게 나타난 것으로 판단된다.

이상의 결과 갈색거저리의 적정 실내사육 적정온도는 30°C 전후로 추정되며, 30°C의 유충 기간은 110일 가량 소요되었으며, 온도가 낮아질수록 유충기간은 길어졌다. 갈색거저리의 대량사육을 위하여 경제성과 수량을 고려하였을 때 온도별 유충 생육에 대한 결과가 추가되면 가장 효율적인 온도조건이 도출



**Fig. 2.** Cumulative proportion of development completion for total larval stages of *Tenebrio molitor* as a function of normalized time (developmental time/mean developmental time). The 2-parameter Weibull function was used.



**Fig. 3.** Comparison of predicted cumulative curves and observed proportion on each transplanting data of *Tenebrio molitor*.

될 것으로 생각된다. 항온조건별 유충의 발육기간, 발육 모델 및 발육완료 모델은 동물 사료용 곤충으로 이용 가능한 갈색거저리의 생태적 특성을 이해하고 추후 연구에 중요한 기본자료로 활용될 것으로 판단된다. 또한 알, 번데기, 성충 기간 및 산란 등의 연구결과가 추가되면 온도에 따른 갈색거저리의 발육 모델 및 발육완료 모델을 활용하여 대량사육에 요구되는 적절한 사육온도가 도출될 것으로 생각된다.

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ008778)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## Literature Cited

- 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.
- 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.
- 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.
- Curry, G.L., Feldman, R.M., Smith, K.C., 1978a. A stochastic model of a temperature-dependent population. *Theor. Popul. Biol.* 13, 197-213.
- Curry, G.L., Feldman, R.M., Sharpe, P.J.H., 1978b. Foundations of stochastic development. *J. Theor. Biol.* 74, 397-410.
- Esperk, T., Tammaru, T., Nylin, S., 2007. Intraspecific variability in number of larval instars in insects. *J. Econ. Entomol.* 100, 627-645.
- 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
- Jeon, S.W., Cho, M.R., Kim, Y.P., Lee, S.G., Lee, J.J., Kim, S.H., Yu, J., Hwang, C.Y., 2011. Temperature-dependent development model of the striped fruit fly, *Bactrocera scutellata* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Kor. J. Appl. Entomol.* 50, 373-378.
- Kim, D.I., Choi, D.S., Ko, S.J., Kang, B.R., Park, C.G., Kim, S.G., Park, J.D., Kim, S.S., 2012. Comparison of development times of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) between the constant and variable temperatures and its temperature-dependent development models. *Kor. J. Appl. Entomol.* 51, 431-438.
- 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, 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.
- Kontodimas, D.C., Eliopoulos, P.A., Stathas, G.J., Economou, L.P., 2004. Comparative temperature-dependent development of *Nephus includens* (Kirsch) and *Nephus bisignatus* (Boheman) (Coleoptera: Coccinellidae) preying on *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera: Pseudococcidae): evaluation of a linear and various nonlinear models using specific criteria. *Environ. Entomol.* 33, 1-11.
- 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.
- Liu, Y.S., Choi, Y.C., Song, H.S., 2011. Breeding and using technology of yellow mealworm beetle (*Tenebrio molitor*). NIAST. RDA. KOREA. pp. 14-30.
- 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, 1113-1140.
- Logan, J.D., Wolessensky, W., Joern, A., 2006. Temperature-dependent phenology and predation in arthropod systems. *Ecol. Model.* 47, 160-172.
- Ludwig, D., 1956. Effects of temperature and parental age on the life cycle of the mealworm, *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 49, 12-15.
- Ludwig, D., Fiore, C., 1960. Further studies on the relationship between parental age and the life cycle of the mealworm *Tenebrio molitor*. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 53, 595-600.
- Murray, D.R.P., 1968. The importance of water in the normal growth of larvae of *Tenebrio molitor*. *Entomol. Exp. Appl.* 11, 149-168.
- Park, C.G., Park, H.H., Uhm, K.B., Lee, J.H., 2010. 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.
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 2002. Relationship between temperature and development rate of *Stethorus punctillum* (Coleoptera: Coccinellidae) and its prey *Tetranychus mcDanieli* (Acarina: Tetranychidae). *Environ. Entomol.* 31, 177-187.
- SAS Institute. 1999. SAS version 9.1, SAS, Institute Cary, N.C.
- 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.
- Sharpe, P.J.H., DeMichele D.W., 1977. Reaction kinetics of poikilotherm development. *J. Theor. Biol.* 64, 649-670.
- Systat software inc. 2002. TableCurve 2D Automated curve fitting analysis: Ver. 5.01. Systat software. inc. San jose. CA.
- Taylor, F., 1981. Ecology and evolution of physiological time in insects. *Am. Nat.* 117, 1-23
- Tobin, P.C., Nagarkatii, S., Saunders, M.C., 2001. Modeling development in grape berry moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Environ.*

- 
- Entomol. 30, 692-699.
- Tyshchenko, V.P., Ba, A.S., 1986. Photoperiodic regulation of larval growth and pupation of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera, Tenebrionidae). Entomol. 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.
- 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.
- Weaver, D.K., Mcfarlane, J.E., 1990. The effect of larval density on growth and development of *Tenebrio molitor*. J. Insect Physiol. 36, 531-536.