



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

양배추에서 무테두리진딧물의  
온도발육모형, 생명표 통계량 및  
국내 기후변화 적합도 평가

Temperature-dependent development, life table  
parameters and thermal fitness of *Lipaphis erysimi*  
(Hemiptera: Aphididae) in Korea.

濟州大學校 大學院

農學科

吳性旻

2017年 2月

양배추에서 무테두리진딧물의  
온도발육모형, 생명표 통계량 및  
국내 기후변화 적합도 평가

指導教授 金 桐 淳

吳 性 旻

이 論文을 農學 碩士學位 論文으로 提出함

2016年 12月

吳性旻의 農學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2016年 12月

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
ABSTRACT .....	1
I. 서 론 .....	3
II. 연구사 .....	5
III. 재료 및 방법 .....	7
1. 무테두리진딧물 사육 .....	7
2. 온도별 약충 발육기간 및 사망률 조사 .....	7
3. 성충기간 및 산자수 조사 .....	8
4. 약충의 온도발육 관련 모형 .....	8
4-1. 선형모형 .....	8
4-2. 비선형모형 .....	9
4-3. 발육완료시기 분포모형 .....	9
5. 무시성충 산자(산람)모형의 단위모형 수립 .....	10
5-1. 성충 노화율(ageing rate) 모형 .....	10
5-2. 온도별 총 산자수 모형 .....	10
5-3. 연령별 누적산자율 모형 .....	10
5-4. 연령별 생존율 모형 .....	11
6. 생명표 통계량 추정 .....	12
7. RCP 8.5 기상시나리오를 이용한 기후변화 적합도 평가 .....	12

IV. 결 과 .....	14
1. 약층발육, 생존률, 성층 수명 및 산자수 .....	14
2. 약층 온도발육 모형 .....	18
3. 무시성층 산자 단위모형 .....	24
4. 생명표 통계량 추정 .....	30
5. RCP 8.5 기상시나리오에 따른 기후적응능력 및 발생세대수 평가 .....	32
V. 고 찰 .....	37
VI. 적 요 .....	41
인용문헌 .....	43

# LIST OF TABLES

Table 1. Survival rate (%) of <i>Lipaphis erysimi</i> at constant temperatures in the laboratory .....	15
Table 2. Developmental period days, (Mean±SD) for nymphal stages of <i>Lipaphis erysimi</i> at constant temperatures in the laboratory .....	16
Table 3. Adult longevity and fecundity of <i>Lipaphis erysimi</i> at constant temperature (Mean±SD) .....	17
Table 4. Estimated parameters of a linear regression model for nymphal and total immature stages of <i>Lipaphis erysimi</i> .....	19
Table 5. Estimated parameter values (± SEM) for nymphal development model of development time of <i>Lipaphis erysimi</i> .....	20
Table 6. Estimated parameter values (±SEM) for nymphal distribution model of development time of <i>Lipaphis erysimi</i> .....	21
Table 7. Estimated parameter values for the adult aging rate, temperature-dependent total fecundity, age-specific oviposition rate, and age-specific survival rate of <i>Lipaphis erysimi</i> .....	25
Table 8. Temperature-dependent development data of <i>Lipaphis erysimi</i> and source references in previous studies .....	28,29
Table 9. The estimated values for the table statistic of <i>Lipaphis erysimi</i> .....	31
Table 10. The changes of TSM values of <i>Lipaphis erysimi</i> .....	34
Table 11. The number of generation and active period of <i>Lipaphis erysimi</i> in relation to climate change in Jeju .....	35

# LIST OF FIGURES

Fig. 1. Developmental rate (1/days) curve for each developmental stage of *Lipaphis erysimi* at constant temperatures. A: small nymph (1+2 instar), B: large nymph (3+4 instar), C: nymph (all instar), and D: nymph (previous reports combined, see Table 8 for details) ..... 22

Fig. 2. Cumulative proportions for the development completion time of *Lipaphis erysimi* nymphs as a function of the physiological ages. .... 23

Fig. 3. Component models for oviposition model of *Lipaphis erysimi*, A = adult aging rate, B = temperature-dependent total fecundity, C = age-specific cumulative oviposition rate, and D = age-specific survival rate. .... 26

Fig. 4. Immature development time (A), apterous longevity (B), and fecundity (C) of *Lipaphis erysimi* in the previous reports comparing with present study. .... 27

Fig. 5. The relationship between temperature and intrinsic rate of natural increase ( $r_m$ ) of *Lipaphis erysimi*. Estimated curve is based on the parameters of Lactin-2 model (Lactin et al., 1995). The TSM means optimal temperature ( $T_{opt}$ ) minus habitat temperature ( $T_{hab}$ ) suggested by Deutsch et al. (2007). .... 33

Fig. 6. The changes in the overall fitness of *Lipaphis erysimi* with RCP 8.5 Climate Change Scenario ..... 36

## ABSTRACT

This study was conducted to develop temperature-driven models for a population model of turnip aphid, *Lipaphis erysimi*: nymphal development rate models and apterious adult's oviposition (larviparous) model. Nymphal development and the longevity and fecundity of adults were examined on cabbage at six constant temperatures (10, 15, 20, 25, 30, 35±1°C, 16L:8D). *L. erysimi* nymphs did not survive at 10°C. Development time of nymphs increased with increasing temperature up to 30°C and thereafter slightly decreased, ranging from 18.5 d at 15°C to 5.9 d at 30°C. The lower threshold temperature and thermal constant were estimated as 7.9°C and 126.3 degree days, respectively. The nonlinear model of Lactin 2 fitted well for the relationship between the development rate and temperature of small (1+2 instar), large (3+4 instar) and total nymph (all instars). The Weibull function provided a good fit for the distribution of development times of each stage. Temperature affected the longevity and fecundity of *L. erysimi*. Adult longevity decreased as the temperature increased and ranged from 24.4 d at 20°C to 16.4 d at 30.0°C with abnormal longevity 18.2 d at 15°C, which was used to estimate adult aging rate model for the calculation of adult physiological age. *L. erysimi* showed a maximum fecundity of 91.6 eggs per female at 20°C. In this study, we provided three temperature-dependent components for an oviposition model of *L. erysimi*: total fecundity, age-specific cumulative oviposition rate, and age-specific survival rate.

Additionally, the climate adaptation and annual multiplication ability of *L. erysimi* were evaluated using the parameters of life table according to RCP 8.5 climate scenario. The optimal temperature ( $T_{opt}$ ) of *L. erysimi* was regarded as the temperature at which the intrinsic rate of natural increase ( $r_m$ ) reached a maximum. And then the term of TSM (thermal safety margin) was defined as difference between  $T_{opt}$  and  $T_{hab}$  (habitat temperature), which



indicates the tolerance range of  $r_m$  with increasing temperature. TSM showed positive value until 2100 along RCP 8.5 climate scenario, indicating the populations of *L. erysimi* increase continuously.

The relationship between the completion rate of generation time (1/generation time) and temperature provided a lower threshold temperature for population development and annual generations. According to the increase of temperature, the first occurrence date was advanced, and the number of generation increased gradually. In conclusion, *L. erysimi* is predicted to increase by global warming in Korea except of some regions, especially largely in spring and autumn seasons.

## I. 서론

무테두리진딧물(*Lipaphis erysimi* (Kaltenbach))은 노린재목(Hemiptera) 진딧물과(Aphididae)에 속한 해충이다(Blackman and Eastop, 1984). 이 진딧물 해충은 중요한 채소작물인 십자화과 식물(브로콜리, 양배추, 무 토마토 등)을 기주식물로 하고 있다. 우리나라에서는 주로 양배추와 무를 가해하는데, 다발생하는 경우 잎의 기형, 황화를 일으키고, 기주식물의 수액을 흡즙하여 생육을 저해시킨다(Metcalf, 1962; Singh *et al.*, 1965; Jagan *et al.*, 1981; Kim *et al.*, 2008).

농작물에 발생하는 진딧물류는 발육기간이 짧고 번식력이 높아 약제에 대한 저항성을 빨리 획득할 뿐만 아니라 기후변화에도 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Frazier *et al.*, 2006). 우리나라 박과류 채소작물에 많이 발생하는 목화진딧물(*Aphis gossypii*)과 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae*)은 기후변화에 따라 다르게 반응하는데, 목화진딧물은 온도증가에 따라 환경 적합력(fitness)이 증가하는 반면 복숭아혹진딧물은 감소하는 것으로 분석되었다(Kim *et al.*, 2009). 일본에서 무테두리진딧물은 평균온도가 2°C 높았던 년도에 발생시기가 빨라졌는데, 발육영점온도가 10°C 이하로 낮아 온도 증가시 대기온도의 영향을 더 받기 때문이라고 보고하였다(Yamaguchi *et al.*, 2001).

곤충의 온도발육 특성은 포장상태에서 발생시기와 같은 생태적 특성을 이해하는데 기본적으로 필요하다. 특히, 온도발육 모형은 변온조건에서 개체군 동태 이해에 이용될 수 있다. 부분적으로 무테두리진딧물의 온도발육모형이 보고되었으나(Liu and Meng, 2000), 아직 성충의 산자모형을 포함한 전체 모형의 기반모형이 개발된바 없다. 그 동안 보고되었던 무테두리진딧물 온도발육 자료(Liu, 1991; Liu and Yue, 2001; Kim *et al.* 2008; Mahal *et al.*, 2012)는 이 진딧물의 이해에 유용하게 활용될 수 있다. 기존자료가 비록 무테두리진딧물 온도발육에 대한 중요한 정보를 제공하고 있으나, 본 연구는 기존자료와는 다른 기주식물(양배추)에서 수행되었고, 10~35°C의 넓은 온도범위를 포함하였다. 진딧물류의 생물적 특성은 지역 개체군에 따라 차이가 다소 달라질 수 있으므로(Reviewed in Kwon, 2015) 비교 자료로서 가치가 있을 것이다. 더불어 무테두리진딧물 약충의 온도발

육모형 뿐만 아니라 무시성층의 산자모형 작성에 필요한 기본모형들을 제공하였다. 또한 RCP 8.5 기상시나리오에 따라 국내 기상환경에서 무테두리진딧물의 기후적응능력과 발생세대수를 평가하였고, RCP 8.5 기상시나리오에 따라 향후 무테두리진딧물의 포괄적 적합도를 평가하고 이를 GIS 지도에 표출하였다.

## II. 연구사

전 세계에 보고된 진딧물과 4,700 여종의 진딧물 중 250 여종이 농업해충으로, 1,700 여종이 산림해충으로 알려져있다(Lee *et al.*, 2002; Kim, 2008).

진딧물들은 식물의 어린 순이나 잎에 군집을 형성하여 흡즙하는 생태적 특징이 있다. 또한, 1 세대 간격이 5~7 일 정도로 빠르고 단위생식을 통해 개체수가 기하급수적으로 증가하며, 유시충의 발생으로 인해 인접 식물로 전파가 쉽기 때문에 초기 밀도가 적을 때 방제하지 않으면 한 재배지역 내에 전체적인 피해를 입기 쉽다(Kim, 2008). 진딧물은 흡즙으로 인한 직접적인 피해보다도 감로 분비를 통한 그을음병과 바이러스를 매개하는 등의 간접적인 피해로 식물의 성장과 결실에 많은 피해를 준다(Eastop, 1983; Lee, 2006). 예를들어 복숭아혹진딧물은 작물에 관을 삽입하여 흡즙가해하며 엽록소 파괴 및 영양분 고갈로 작물을 고사시킨다(Blackman and Eastop., 1984). 또한, 복숭아혹진딧물은 오이모자이크바이러스(cucumber mosaic virus), 호박누른모자이크바이러스(zucchini yellow virus) 등 80 가지 이상의 바이러스를 매개하여(Flanders *et al.*, 1991; Kassanis, 1961; Namba *et al.*, 1966; Kim, 2010) 작물의 엽록소 변형, 잎의 뒤틀림 그리고 반점 등을 일으킨다(Kim, 2010).

진딧물의 생활사는 기주식물의 활용방식에 따라 기주전환종(heteroecious)과 비기주전환종(autoecious)으로 구분할 수 있다(Blackman and Eastop, 2006). 기주전환종은 가을부터 다음 해 봄까지 일차기주에서 월동 및 생활하며 여름에는 이차기주인 초본류로 이동하여 번식하고 가을에는 다시 일차기주로 돌아온다. 비기주전환종은 기주전환종과 달리 목본류와 초본류 간의 이동없이 한종의 기주에서만 생활한다. 또한 진딧물의 생활사는 생식방법을 기준으로 완전생활형(holocyclic)과 불완전생활형(anholocyclic)으로 구분할 수 있다(Dixon, 1987; Leather, 1992). 완전생활형은 생활사에서 연속적인 단위생식 후 가을에 유성형 세대를 갖는 생활형이고, 불완전생활형의 경우 생활사 내내 단위생식 세대만 존재하고 유성형 세대를 갖지 않는 생활형을 말한다(Kwon, 2015).

무테두리진딧물의 무시충은 작은 것부터 중간 크기까지 있고, 하얀 왁스층을 가진 연두색, 초록색 또는 어두운 녹색이다. 습한 환경에서는 종종 더 뽀뽀하게 왁스층으로 코팅이 된다. 무시충은 뚜렷하고 어두운 측면 경피, 그리고 어두운 날개맥이 있는 어두운 녹색의 복부를 가진다. 무시충은 1.2~2.4mm, 유시충은 1.4~2.2mm 이다(Blackman and Eastop., 1984.)

무테두리진딧물은 중요한 채소작물인 십자화과 식물인 브로콜리, 양배추, 무, 토마토 등을 기주식물로 하고 있다. 우리나라에서는 주로 양배추와 무를 가해하는데, 다발생하는 경우 잎의 기형, 그리고 황화를 일으키고, 기주식물의 수액을 흡즙하여 생육을 저해시킨다. 국내의 배추와 무에 발생하는 중요한 바이러스병으로 오이 모자이크 바이러스(Cucumber mosaic virus, CMV)와 순무 모자이크 바이러스(turnip mosaic virus, TuMV)가 있다(Choi, 1993). 뿐만 아니라 봄 재배 배추와 무, 서늘한 지역의 배추, 양배추, 무 등에도 매년 피해가 증가하고 있다(Choi, 1998).

### Ⅲ. 재료 및 방법

#### 1. 무데두리진딧물 사육

본 연구에 이용한 무데두리진딧물(*Lipaphis erysimi* (Kaltenbach))은 2015년 10월 25일에서 11월 1일 기간에 제주특별자치도 제주시 한림읍에서 친환경 양배추를 재배하는 농가에서 채집하였다. 채집한 진딧물을 실험실에서 누대사육하기 위하여 Insect Breeding Dish( $\Phi$  100 x 40 mm, SPL)에 물을 적신 솜과 탈지면을 깔고, 그 위에 'Matsumo' 품종 양배추(*Brassica oleracea*)를 크기에 맞게 잘라 뒷면이 보이도록 설치하여 진딧물 실험장치를 마련하였다. 채집한 진딧물을 접종하고 장일조건(25℃, LD 16:8)의 항온기에서 사육하였다. 대표 표본은 제주대학교 곤충생태학실험실에 보관되어 있다.

#### 2. 온도별 약충 발육기간 및 사망률 조사

약충의 온도발육기간을 조사하기 위하여 위와 같이 마련된 진딧물 실험장치에 무시형 성충 15마리씩 접종하고(총 6개 실험장치 준비), 25℃ 항온기에 보관하면서 갓 발생된 1령 약충을 확보하였다. 바로 태어난 부화약충을 세필봇(Artmate 300A 0호, 진딧물을 양호하게 옮길 수 있도록 가늘게 가공함)을 이용하여 한 마리씩 실험장치(양배추 절편크기 3 x 3 cm)에 접종하여 총 30반복으로 처리하였다. 양배추 절편은 부패하기 시작하면 교체를 하였다. 실험장치는 10, 15, 20, 25, 30 및 35±1℃로 설정된 항온기(DS-8CL, (주)다솔과학)에 배치하여 항온처리하였다. 항온기의 광주기는 16L:8D로 설정하였으며, 12시간 간격으로 발육상태 및 사망률을 조사 하였다. 약충의 발육단계는 1령, 2령, 3령, 4령으로 해부현미경(10~20 배)에서 탈피각을 확인하였을 때를 기준으로 령기를 판정하였다.

조사과정에서 탈지면에 다리가 걸려 사망하거나 물에 빠져 죽은 진딧물은 분석에서 제외하였고, 반복수가 부족한 경우 동일한 조건에서 1령을 접종하여 추가실험을 실시하였다.

### 3. 성충기간 및 산자수 조사

성충기간과 산자수 조사는 약충발육 실험에서 성충으로 된 개체를 바탕으로 동일한 조건에서 이어서 실시하였다. 산자수와 생사유무는 매일 기록하였으며, 4령이 성충으로 탈피 후 첫 번째 산자까지 기간을 산자전기간, 수명이 다할 때까지의 기간을 성충기간이라 하였다.

### 4. 약충의 온도발육 관련 모형

무테두리진딧물 약충 발육단계 중에서 1+2령을 전기약충, 3+4령을 후기약충으로 구분하여 분석하였다. 또한 기존 보고된 자료를 종합(Table 8)하여 약충의 발육모형을 제시하였다.

#### 4-1. 선형모형

무테두리진딧물의 약충기간의 역수(1/약충기간)를 취하여 약충 발육률로 변환하였다. 약충의 발육영점온도와 발육완료에 필요한 적산온도를 추정하기 위하여 온도와 발육률(1/발육기간) 간의 직선회귀식을 구하였다.

$$r(T) = aT + b \text{ ---- 식 1}$$

여기서  $r(T)$ 는 온도  $T$ 에서 약충 발육률이며,  $a$ 는 기울기,  $b$ 는  $y$ 절편이다. 이 식으로부터 발육률이 0이 되는 온도를 추정하여 발육영점온도를 구하였다( $-b/a$ ). 약충 발육완료에 필요한 적산온도는 추정된 회귀식 기울기의 역수 값으로

구하였다. 회귀분석시 발육을 완료하지 못한 10℃와 발육률이 확연히 선형관계에서 벗어난 35℃ 자료는 제외하였다.

#### 4-2. 비선형모형

무테두리진딧물 약충의 온도와 발육률 간의 관계를 경험적인 비선형발육모형인 Lactin-2(Lactin *et al.*, 1995) 모형을 사용하여 추정하였다.

$$r(T) = e^{\rho T} - e^{[\rho T_{max} - (T_{max} - T)/\Delta]} + \lambda \quad \text{---- 식 2}$$

여기서  $r(T)$ 는 온도  $T$ 에서 약충 발육률이며,  $T_{max}$ 는 추정된 상한치사온도,  $\lambda$ 는 저온영역에서 발육률이  $y$  축과 교차하도록 유도하는 매개변수를 나타내고,  $\Delta$ 는 온도상한 부근에서 급격한 발육붕괴가 일어나는 온도범위(일종의 발육붕괴 온도범위),  $\rho$ 는 효소가 촉매하는 생화학적 반응에 대한 합성치로 해석될 수 있으며 이 값이 증가하면 발육률 곡선은 위쪽으로 수직 이동한다.

#### 4-3. 발육완료시기 분포모형

무테두리진딧물 약충 발육완료기간의 변이는 3개의 매개변수를 갖고 있는 Weibull 함수 (Wagner *et al.*, 1984)를 이용하여 적합시켰다.

$$F(x) = 1 - \exp(-[(x - \gamma)/\eta]^\beta) \quad \text{---- 식 3}$$

여기서  $F(x)$ 는 약충의 생리적 연령  $x$ 에서 발육을 완료하는 약충의 수의 누적 비율이며,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $\beta$ 는 매개변수이다.

모든 수식의 매개변수 값은 TableCurve 2D 프로그램(Jandel Scientific, 1996)을 이용하여 추정하였다.



## 5. 무시성충 산자(산란)모형의 단위모형 수립

성충의 산자모형은 Kim and Lee(2003)이 제시한 산란모형을 기반으로 수립하였다. 해당 모형은 온도의존적인 성충 노화율(=성충수명 완료율), 온도별총산란수, 연령별 누적산란율, 연령별 생존률 모형으로 구성되어 있다.

### 5-1. 성충 노화율(ageing rate) 모형

무테두리진딧물 성충의 수명에 역수(1/수명)를 취하여 성충의 노화율로 취급하였다. 온도에 따른 성충 노화율을 선형모형(식 1)에 적합시켜 매개변수를 추정하였으며, 성충의 생리적 연령( $Px_i$ )을 계산하는 목적으로 제시하였다.

$$Px_i = \int_0^n r(T_i) \approx \sum_{i=0}^n r(T_i) \text{ ---- 식 4}$$

### 5-2. 온도별 총 산자수 모형

이 모형은 온도에 따른 성충이 수명기간동안 낳을 수 있는 총 산자수의 분포를 나타낸다. 모형식은 곤충의 총 산란수 모형으로 많이 이용되고 있는 다음 식을 사용하였다.

$$f(T) = \omega \cdot \exp\left[1 + \frac{\epsilon - T}{\kappa} - \exp\left(\frac{\epsilon - T}{\kappa}\right)\right] \text{ ---- 식 5}$$

여기서 온도  $T$  및 총 산란 수  $f(T)$ 에서  $\omega$  = 경험적으로 추정된 상수,  $\epsilon$  = 최대 산자수를 보이는 온도가 되며,  $\kappa$  = 총 산란수 곡선의 분포를 조절하는 매개변수를 나타낸다.

### 5-3. 연령별 누적산자율 모형

연령별 누적산란율은 수명기간 동안 총 산자능력 중에서 어느 특정 연령시기 까지 산자하는 산자 수의 누적비율을 의미한다. 본 연구에서는 곤충 누적산란율 모형으로 많이 이용되고 있는(Kim and Lee, 2003) 2 개의 매개변수를 갖고 있는 Weibull 함수를 이용하여 추정하였다.

$$Y = 1 - \exp(-(x/\alpha)^\beta) \text{ ---- 식 6}$$

$a$ ,  $\beta$ 는 추정해야할 매개변수이며, 성충의 수명을 생리적연령으로 변환시키고 이에 대응하는 연령별 누적산란율을 계산하여 수식의 매개변수 값을 추정하였다. 각 온도에서 생리적 연령에 대응하는 누적산란율은 일별 산란수를 누적하여 각각을 총 산자수로 나누어 얻었다. 결과적으로 온도에 따른 산자곡선의 변이를 표준화시켜 온도와 독립적인 누적산란율 곡선을 얻을 수 있었다. 매개변수 추정 비선형회귀분석 과정에서 통계적 수렴(statistical convergence)을 방해하는 20℃ 자료의 일부를 제거하였다.

#### 5-4. 연령별 생존율 모형

생리적 연령별 생존율은 갓 성충이 된 진딧물 성충집단이 시간의 경과에 따라 어느 생리적 연령에 도달했을 때 살아있는 개체수의 비율이다. 본 연구에서는 기존 곤충의 생존율 모형으로 많이 사용되는 시그모이드모형을 이용하였다(Kim and Lee, 2003)

$$s(Px) = \frac{1}{1 + \exp[(\gamma - Px)/\delta]} \text{ ---- 식 7}$$

여기서  $s(Px)$  = 생리적 연령  $Px$ 에서 생존률,  $y = 50\%$  생존율에 대응하는 생리적 연령,  $\delta$  = 매개변수이며, 성충의 수명을 생리적 연령으로 변화시키고 이에 대응하는 연령별 생존율 값을 이용하여 수식의 매개변수 값을 추정하였다.

## 6. 생명표 통계량 추정

생명표 통계량을 추정하기 위하여 발육 산자 실험 자료에서 성충 연령, 약충 생존률, 일별평균산자수, 일별총산자수, 일별순산자수를 구하였다. 총 증가율(gross reproductive rate), 세대증가율(Net reproductive), 평균세대기간(Generation), 내적자연증가율(Intrinsic rate of natural), 기간증가율(Finite rate of increase), 개체군배가기간(Doubling time) 등을 Jackknife 방법에 따라 마이크로소프트 엑셀 스프레드시트를 이용하여 구하였다.

$$\text{총 증가율(GRR)} : GRR = \sum m_x$$

$$\text{세대증가율}(R_0) : R_0 = \sum l_x \cdot m_x$$

$$\text{평균세대기간}(T) : T = \frac{\sum Xl_x \cdot m_x}{R_0}$$

$$\text{내적자연증가율}(r_m) : r_m = \frac{\log(R_0)}{T}$$

$$\text{기간증가율}(\lambda) : \lambda = e^r$$

$$\text{개체군배가기간}(DT) : DT = \frac{\log_e 2}{r}$$

## 7. RCP 8.5 기상시나리오를 이용한 기후변화 적합도 평가

실내실험을 통해서 얻은 무테두리진딧물의 생명표 통계량 중 내적자연증가율( $r_m$ ) 과 세대기간(T)를 이용하였다. 내적자연증가율과 온도(T)와의 관계는 곤충의 발육모델의 하나인 Lactin-2모형(Lactin *et al.*, 1995)을 적용하여 매개변수를

추정하였다.

$$r_m(T) = \exp(aT) - \exp\left[ab - \frac{(b-T)}{c}\right] \text{----식 8}$$

a, b, c는 추정해야 할 매개변수로 각 온도실험(15~30 °C)으로부터 추정된  $r_m$ 의 평균값들을 이용하여 매개변수를 추정하였다. 이 모형은 기후변화에 따른 무테두리진딧물의 적합도를 평가하는 데 사용하였다.

또한 생명표통계량 인자중의 하나인 세대기간(T)에 역수(1/T)를 취하여 세대완료율 모형을 작성하였다(Lactin-2모형 적합). 일별 세대완료율을 누적하여 1.0이 되었을 때 1세대가 완료되는 것으로 판단하였다. 발육영점온도를 적용하고, 대기온도를 1~3°C까지 인위적으로 변화시키면서 무테두리진딧물 발생세대수를 추정하였다(불완전생활형 가정).

서식처 온도( $T_{hab}$ )와 최적온도의 차이를 나타내는 TSM(thermal safety margin)은 향후 지구온난화에 따라 무테두리진딧물의 증식률이 계속 증가되는 온도의 범위를 나타내는 지표 값으로 해석하였다(Deutsch et al., 2007). 위에서 추정한 Lactin 2 모형을 이용하여 최대 내적자연증가율을 나타내는 온도는 27.9°C로 추정되었으며, 이를 최적온도( $T_{opt}$ )로 간주하였다. 최종적으로 계산된 TSM 값은 봄(3~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)별로 분리하여 제시하였다.

RCP 8.5 기후시나리오 기상자료는 기상청 기후정보포털 사이트(<http://www.climate.go.kr/>)에서 얻었으며, 일별 기상자료로 변환하고 10년 단위(76개 지점)로 평균하여 무테두리진딧물 내적자연증가율 곡선의 TSM 값 계산에 이용하였다(기상청 76개 종관기상자료). GIS기반 시뮬레이션 아키텍처는 리눅스 서버 MapServer를 사용하고 지도를 WMS(Web Mapping Service) Layer로 생성하였다. 클라이언트 아키텍처는 국토해양부 국가공간정보유통시스템(vworld) 배경지도를 활용하고 오픈소스 GIS 웹 라이브러리 Openlayers를 이용하였다. 지도제작시 TSM 적합도를 10등급으로 구분하여 구현하였다. 1등급이 적합도가 높은 상태를 나타낸다.

## IV. 결 과

### 1. 약충발육, 생존률, 성충 수명 및 산자수

무테두리진딧물의 발육기간 중 생존률은 Table 1 에서와 같이 1~2 령에서 생존률이 가장 낮았으며, 3~4 령에서는 생존률이 비교적 높아지는 것을 알 수 있다. 15°C, 20°C, 35°C, 30°C 에서는 높은 생존률을 나타내고 있다.

온도는 무테두리진딧물 약충발육기간에 통계적으로 유의한 영향을 주었다(Table 2;  $df = 4, 72, F = 162.86, P < 0.0001$ ). 실험처리 중 저온인 10°C에서 고온인 30°C까지 온도가 증가함에 따라 발육기간이 짧아지는 경향을 보였으며, 35°C에서는 통계적 차이는 없었으나 오히려 약간 증가하였다. 본 연구에서는 저온인 10°C에서 2 령까지만 발육이 가능하였고, 30°C에서 약충기간이 5.9 일로 가장 짧았으며 15°C에서 18.5 일로 가장 길었다.

무테두리진딧물의 성충수명은 Table 3 와 같이 온도에 따라 유의하게 영향을 받았다( $df = 2, 57, F = 14.18, P < 0.0001$ ). 성충수명은 온도증가에 따라 감소하였는데, 15°C에서 비정상적으로 짧은 이상치를 보였다(See Discussion for the details). 총 산자수는 온도에 따라 유의하게 차이가 있었으며( $df = 2, 4, F = 30.12, P < 0.03213$ ), 20°C에서 91.6 개로 최고값을 나타냈다. 일일 산자수도 총산자수와 유사한 경향을 보였다.

**Table 1.** Survival rate (%) of *Lipaphis erysimi* at constant temperatures in the laboratory

Temperature (°C)	1st instar	2nd instar	3rd instar	4th instar	Total <sup>1</sup>
10	36.0	55.6	20.0	0.0	0.0
15	62.1	72.2	100.0	100.0	44.8
20	93.1	92.6	96.0	100.0	82.8
25	90.0	77.9	100.0	100.0	70.0
30	85.2	82.6	100.0	100.0	70.4
35	66.7	55.6	50.0	60.0	11.1

<sup>1</sup> Survival rate during nymphal period.

**Table 2.** Developmental period days, (Mean±SD) for nymphal stages of *Lipaphis erysimi* at constant temperatures in the laboratory

Temperature (°C)	Stage									
	n	1st instar	n	2nd instar	n	3rd instar	n	4th instar	n	Total nymph
10	9	6.4 ± 2.46d <sup>1</sup>	5	11.2 ± 3.68d	1	5.5	0	- <sup>2</sup>	0	-
15	18	4.2 ± 1.87c	13	4.9 ± 1.15c	13	4.1 ± 0.89c	13	4.8 ± 0.66d	13	18.5 ± 2.59c
20	27	2.7 ± 0.75b	25	3.0 ± 0.80b	24	2.6 ± 0.50b	19	2.8 ± 0.34ab	19	10.5 ± 0.81b
25	27	1.9 ± 0.88ab	21	1.7 ± 0.49a	21	1.6 ± 0.44a	21	1.7 ± 0.44c	21	7.1 ± 1.27a
30	23	1.5 ± 0.60a	19	1.6 ± 0.68a	19	1.3 ± 0.30a	19	1.3 ± 0.38bc	19	5.9 ± 0.83a
35	18	1.4 ± 0.58a	10	2.3 ± 1.03a	5	2.1 ± 1.64ab	3	3.3 ± 1.53a	3	7.7 ± 2.89a

<sup>1</sup> Means with same letters are not significantly different by Tukey's HSD test (GLM) at  $P = 0.05$ .

<sup>2</sup> No survived instar.

**Table 3.** Adult longevity and fecundity of *Lipaphis erysimi* at constant temperature (Mean±SD)

Temperature (°C)	n	Longevity (days)	Fecundity (days)	Nymphs/female/day
15	13	18.2 ± 3.82ab <sup>1</sup>	27.8 ± 10.83a	1.5 ± 0.5a
20	19	24.4 ± 6.54c	91.6 ± 21.53b	3.8 ± 0.57b
25	21	21.0 ± 3.49bc	75.8 ± 28.38b	3.7 ± 1.34b
30	19	16.4 ± 3.28a	29.8 ± 20.74a	1.9 ± 1.42a

<sup>1</sup> Means with same letters are not significantly different by Tukey's HSD test (GLM) at  $P = 0.05$ .



## 2. 약충 온도발육 모형

온도에 따른 무테두리진딧물 약충 발육률의 선형모형 매개변수는 Table 4와 같았다(35°C 자료 제외). 각 발육단별 발육영점온도(DT)는 전기약충 7.4°C, 후기약충 9.0°C, 약충전체 7.9°C로 나타났으며, 유효적산온도(DD)는 각각 70.8, 54.5, 126.3 일도(DD, degree-days)로 추정되었다. 결정계수( $R^2$ )는 모두 0.98 이상으로 회귀식으로 발육률의 변이가 충분히 설명되었다. 참고로 기존 보고자료의 약충발육기간을 종합하여 추정한 결과 발육영점온도는 8.6°C, 유효적산온도는 81.7DD 이었다.

무테두리진딧물의 약충 발육률에 대한 비선형 모형(Lactin 2 model)과 발육기간 분포 모형의 매개변수 추정값은 Table 5와 Table 6과 같았다. 전기약충, 후기약충, 약충전체의 발육률 곡선은 30°C 이하에서는 모두 선형적으로 증가하였으나, 그 이상에서는 급격히 감소하는 형태를 보였다(Fig. 1). 결정계수가 모두 0.99로 무테두리진딧물 약충 발육률은 선택된 비선형 모형식으로 잘 설명되었으며 통계적으로 유의하였다(df = 3, 5,  $F = 73.7961$ ,  $P < 0.0134$ ). 참고로 기존 보고자료의 약충발육기간을 종합하여 발육모형의 매개변수를 제시하였다.

약충발육기간의 분포모형은 Fig. 2과 같이 약충이 발육을 완료하는 빈도분포를 잘 보여 주었다. 결정계수로 판단했을 때 Weibull 모형은 변이의 95% 이상을 설명하였다(Table 6,  $R^2 = 0.95\sim 0.98$ ).

**Table 4.** Estimated parameters of a linear regression model for nymphal and total immature stages of *Lipaphis erysimi*

Stage	Regression		Low-threshold temp, DT	Thermal constant, DD
	Equation	R <sup>2</sup>		
1+2 instar	$y = 0.0141x - 0.1040$	0.98	7.4	70.8
3+4 instar	$y = 0.0183x - 0.1658$	0.99	9.0	54.5
Nymph	$y = 0.0079x - 0.06268$	0.99	7.9	126.3
Nymph based on previous reports	$y = 0.0122x - 0.1056$	0.79	8.6	81.7

**Table 5.** Estimated parameter values ( $\pm$  SEM) for nymphal development model of development time of *Lipaphis erysimi*

Stage	$\rho$	$T_{max}$	$\Delta$	$\lambda$	$R^2$
1+2 instar	0.1020 $\pm$ 0.02887	41.0900 $\pm$ 2.52573	9.6364 $\pm$ 2.52311	-0.1090 $\pm$ 0.12989	0.99
3+4 instar	0.1581 $\pm$ 0.00759	36.5936 $\pm$ 0.18849	6.3038 $\pm$ 0.29707	-0.0070 $\pm$ 0.01897	0.99
Nymph	0.1522 $\pm$ 0.03853	37.5746 $\pm$ 1.25250	6.5625 $\pm$ 1.64747	0.0072 $\pm$ 0.04007	0.99
Nymph based on previous reports	0.1036 $\pm$ 0.01594	38.4152 $\pm$ 0.98782	9.5021 $\pm$ 1.36104	-0.0995 $\pm$ 0.05735	0.91

**Table 6.** Estimated parameter values ( $\pm$ SEM) for nymphal distribution model of development time of *Lipaphis erysimi*

Stage	$\eta$	$\beta$	$\gamma$	R <sup>2</sup>
1+2 instar	0.3676 $\pm$ 0.13274	3.0040 $\pm$ 0.78226	0.6451 $\pm$ 0.13567	0.98
3+4 instar	0.6972 $\pm$ 0.03826	1.7592 $\pm$ 0.37233	0.2749 $\pm$ 0.04326	0.97
Nymph	0.5101 $\pm$ 0.22385	3.9366 $\pm$ 2.00972	0.5037 $\pm$ 0.22095	0.95

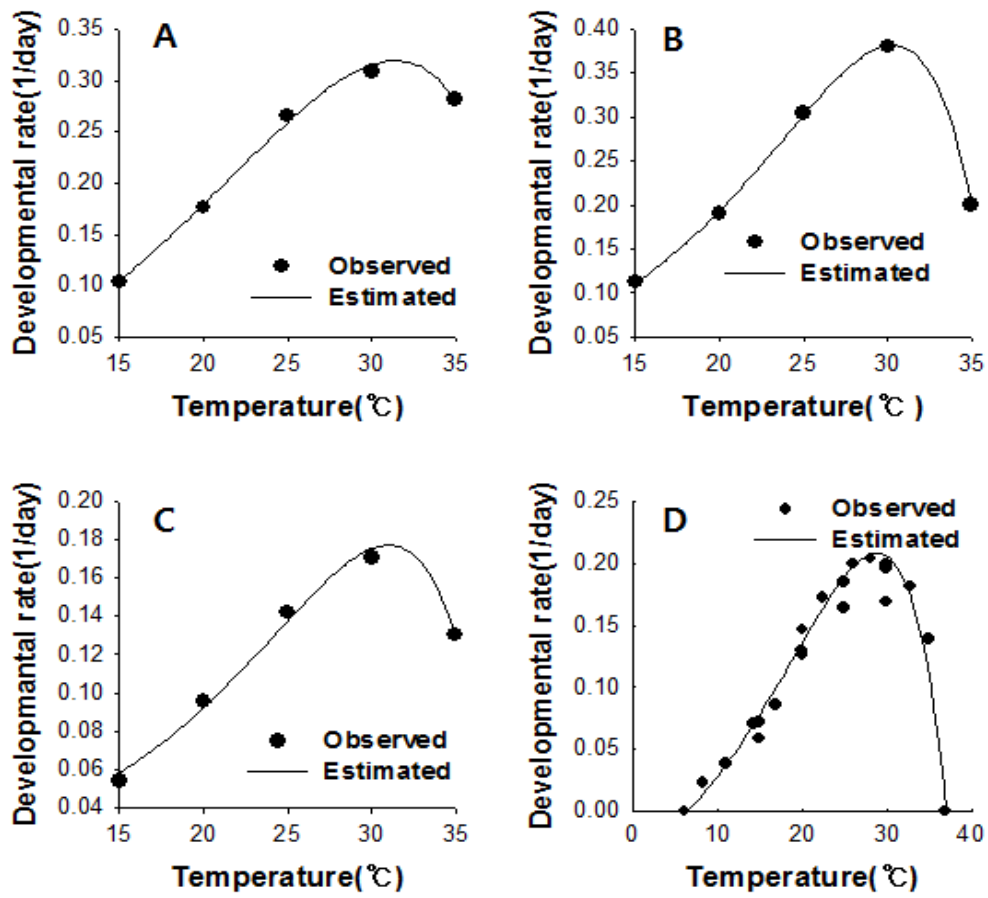
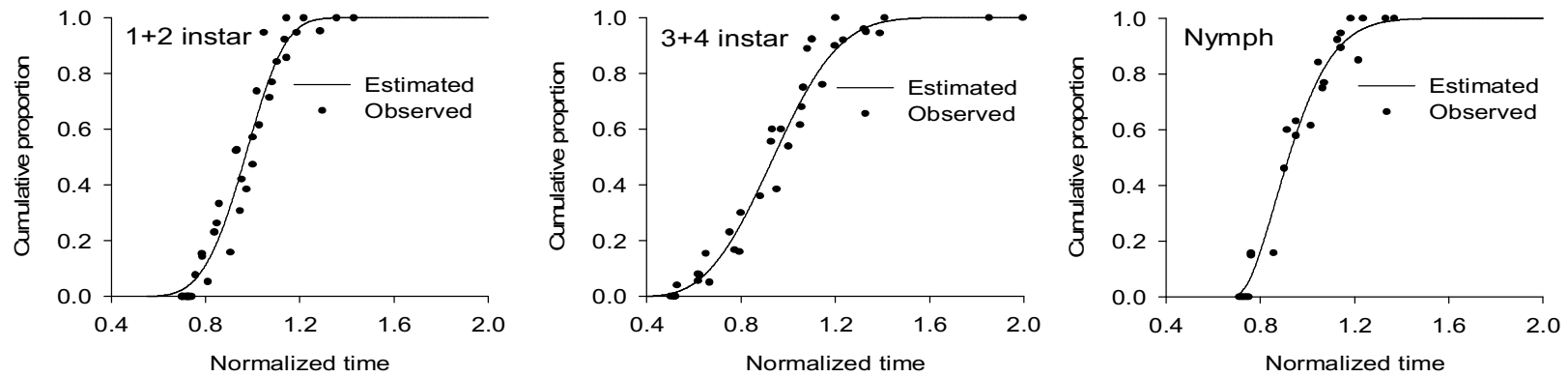


Fig. 1. Developmental rate (1/days) curve for each developmental stage of *Lipaphis erysimi* at constant temperatures. A: small nymph (1+2 instar), B: large nymph (3+4 instar), C: nymph (all instar), and D: nymph (previous reports combined, see Table 8 for details)



**Fig. 2.** Cumulative proportions for the development completion time of *Lipaphis erysimi* nymphs as a function of the physiological ages.

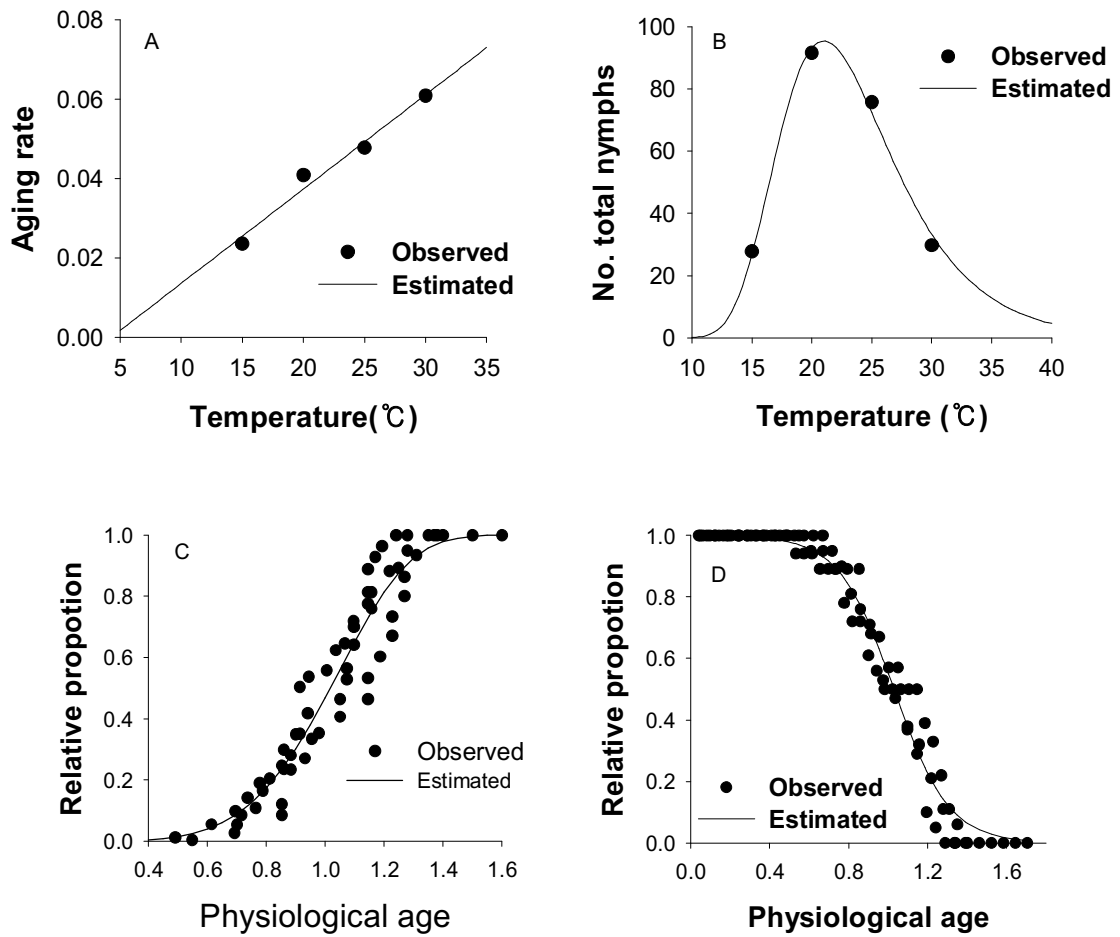
### 3. 무시성충 산자 단위모형

무테두리진딧물 무시성충의 산자모형 작성에 필요한 단위모형들의 매개변수와 형태는 각각 Table 7, Fig. 3, A 와 같았다. 성충의 노화율은 수명에 역수를 취하여 계산하였으며 선형모형에 잘 적합되었다( $df = 1, 3, F = 75.839, P < 0.01293, R^2 = 0.97$ ). 온도별 총산자수 모형은 온도  $20.0^{\circ}\text{C}$ (매개변수  $e$ )에서 최대 산자수 95.3(매개변수  $\omega$ )을 나타냈으며, 통계적으로 유의하였다( $df = 2, 4, F = 30.1209, P < 0.03213, R^2 = 0.97$ ). 생리적 연령에 따른 누적산자율(연령별 누적산자율) 곡선은 Weibull 모형에 잘 적합되었으며, 통계적으로 유의하였고( $df = 1, 57, F = 543.392, P < 0.0000, R^2 = 0.91$ ), 표준화된 생리적 연령을 적용함으로써 온도간 변이가 효과적으로 수렴되었다. 연령별 생존률(Sigmoid) 곡선은 전체적으로 처음에는 사망율이 낮다가 중간연령에서 급격히 선형적으로 증가하고, 후기 연령에서는 다시 감소하는 형태를 보였다. 실측 생존률 자료는 시그모이드 모형에 잘 적합되었으며 통계적으로 유의하였다( $df = 1, 89, F = 3557.4, P < 0.0000, R^2 = 0.98$ ). 모형에서 생리적 연령 1.0295(매개변수  $y$ )까지 50%의 사망이 일어난 것으로 나타났다.

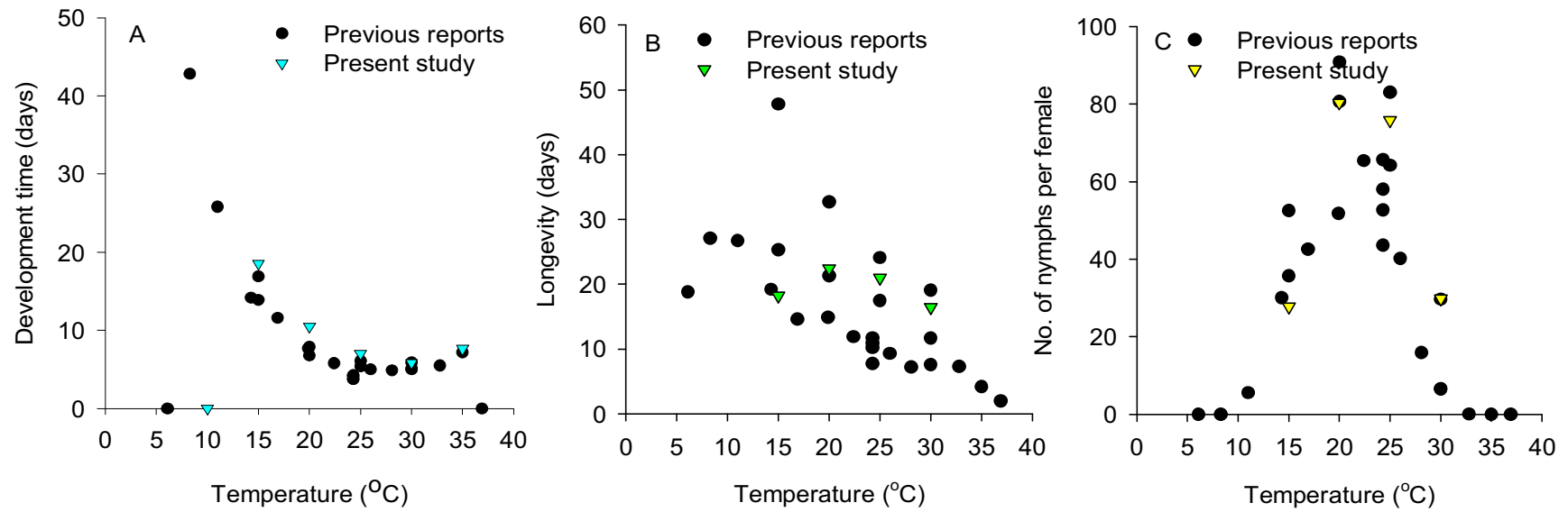
**Table 7.** Estimated parameter values for the adult aging rate, temperature-dependent total fecundity, age-specific oviposition rate, and age-specific survival rate of *Lipaphis erysimi*

	Model	Parameter	Estimated	SEM	R <sup>2</sup>
Present Study	Adult aging rate (1/longevity)	$a$	0.0024	0.00027	0.97
		$b$	-0.0102	0.00632	
	Total Fecundity	$\omega$	95.3318	4.80253	0.99
		$\varepsilon$	20.9891	0.30937	
		$\kappa$	4.7458	0.29509	
	Age-specific oviposition rate (Weibull function)	$a$	1.0898	0.00963	0.91
		$\beta$	5.3620	0.37168	
	Age-specific survival rate (Sigmoid)	$\gamma$	1.0295	0.00674	0.98
$\delta$		-0.1391	0.00616		
Based on previous reports	Adult aging rate (1/longevity)	$a$	0.0045	0.00094	0.88
		$b$	-0.0188	0.02203	
	Total Fecundity	$\omega$	80.9237	5.84829	0.89
		$\varepsilon$	19.5778	0.29416	
		$\kappa$	4.3392	0.33925	





**Fig. 3.** Component models for oviposition model of *Lipaphis erysimi*, A = adult aging rate, B = temperature-dependent total fecundity, C = age-specific cumulative oviposition rate, and D = age-specific survival rate.



**Fig. 4.** Immature development time (A), apterous longevity (B), and fecundity (C) of *Lipaphis erysimi* in the previous reports comparing with present study.

**Table 8.** Temperature-dependent development data of *Lipaphis erysimi* and source references in previous studies

Temperature (°C)	Nymph (days)	Longevity (days)	Fecundity	Host plant	Country	Reference
6.1	0	18.8	0	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
8.3	42.8	27.1	0	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
11	25.8	26.7	5.6	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
14.3	14.2	19.2	30.1	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
15	13.9	25.3	52.5	Cabbage	China, Chengdu	Liu and Yue (2001)
15	16.9	47.8	35.7	Chinese cabbage	Korea, Gwangju	Kim <i>et al.</i> (2008)
16.9	11.6	14.6	42.6	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
19.9	7.7	14.9	51.8	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
20	6.8	21.3	90.8	Cabbage	China, Chengdu	Liu and Yue (2001)
20	7.9	32.7	80.6	Chinese cabbage	Korea, Gwangju	Kim <i>et al.</i> (2008)
22.4	5.8	11.9	65.4	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
24.3	4.3	7.8	52.7	Chinese kale	Pakistan, Islamabad	Amjad (1999)
24.3	3.8	11.7	58	Leaf mustard	Pakistan, Islamabad	Amjad (1999)

24.3	3.8	10.9	65.7	Rape	Pakistan, Islamabad	Amjad (1999)
24.3	4.2	10.2	43.6	African kale	Pakistan, Islamabad	Amjad (1999)
25	6.1	17.5	83	Cabbage	China, Chengdu	Liu and Yue (2001)
25	5.4	24.1	64.2	Chinese cabbage	Korea, Gwangju	Kim <i>et al.</i> (2008)
26	5	9.3	40.2	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
28.1	4.9	7.2	15.9	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
30	5	11.7	29.7	Cabbage	China, Chengdu	Liu and Yue (2001)
30	5.1	7.6	6.6	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
30	5.9	19.1	6.6	Chinese cabbage	Korea, Gwangju	Kim <i>et al.</i> (2008)
32.8	5.5	7.3	0.1	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
35	7.2	4.2	0	Chinese cabbage	China	Liu (1991)
36.9	0	2	0	Chinese cabbage	China	Liu (1991)

#### 4. 생명표 통계량 추정

무테두리진딧물의 15~30℃까지 온도별 생명표 통계량 값(Table 9)을 나타내었다. Table 9 와 같이 총 증가율(GRR)은 20℃에서 가장 높게 나타났으며, 순 증가율( $R_0$ )은 20℃에서 86.61로 가장 높은 값을 나타내었고 온도가 상승하거나 감소함에 따라 값이 낮아지는 경향을 보였다. 내적자연증가율( $r_m$ )과 기간증가율( $\lambda$ )은 온도가 상승할수록 높아지는 경향을 보였다. 또한 개체군 배가기간( $DT$ )과 평균세대기간( $T$ )는 온도가 증가할수록 짧아지는 것으로 나타났다.

**Table 9.** The estimated values for the table statistic of *Lipaphis erysimi*

	$GRR(j)^1$	$R0(j)$	$T(j)$	$r_m(j)$	$\lambda(j)$	$DT(j)$
15°C	27.77	10.62	28.83	0.0823	1.0858	8.41
20°C	102.23	86.61	22.73	0.2000	1.2200	3.53
25°C	75.76	51.00	16.35	0.2406	1.2720	2.88
30°C	29.79	20.67	11.86	0.2567	1.2925	2.70

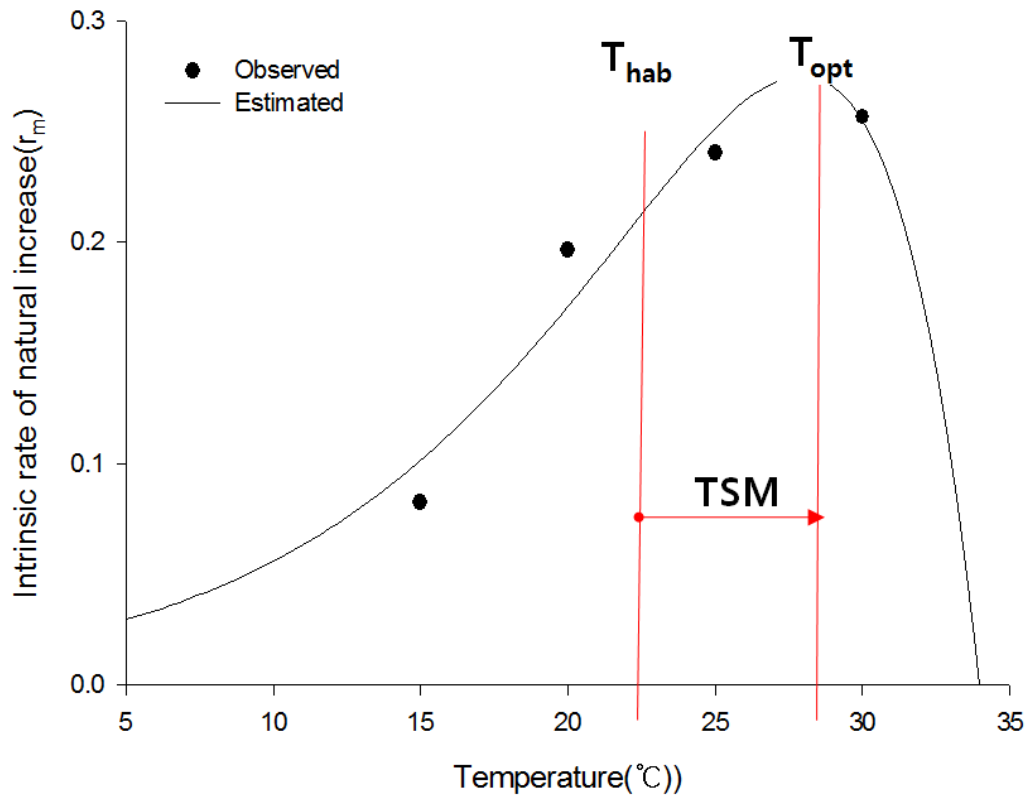
<sup>1</sup>  $GRR$  is the gross reproductive rate,  $R0$  is the net reproductive rate,  $T$  is the generation time,  $r_m$  is the intrinsic rate of increase,  $\lambda$  is the finite rate of increase,  $DT$  is the doubling time.

## 5. RCP 8.5 기상시나리오를 이용한 기후변화 적합도 평가

내적자연증가율이 최고가 되는 온도를 추정하여 무테두리진딧물의 최적온도로 이용하였고 모형을 통해 추정된 최적온도는 27.9이었다. 각 추정된 매개변수 값은  $a = 0.1654$ ,  $b = 33.9756$ ,  $c = 6.0296$ 로 추정되었다. 일별 세대완료율을 적산하여 구한 연간 잠재적 발생세대수는 13.2세대였다(Table 11). 불완전생활형 기준 무테두리진딧물의 첫세대 발생시기는 평년 4월 5일에서 온도가 1, 2, 3 °C 증가 시 각각 3월 27일, 3월 17일, 3월 7일로 단축되는 것으로 나타났으며, 그에 따라 연간 발생세대수는 온도가 1, 2, 3 °C 증가 시 평년 13.2세대에서 각각 14.4, 15.7, 16.9 세대로 크게 증가하는 것으로 나타났다(Table 11).

내적자연증가율을 이용하여 무테두리진딧물의 기후변화 적응능력을 추정했을 때 계산된 TSM값이 '0'에 가까울수록 포괄적 적합도가 높은 것으로 판단하였다. 향후 RCP8.5에 따른 국내기상환경에서 2070년까지 개체군 성장이 지속적으로 증가하였으며, 현재 수준보다는 높은것으로 나타났다(Fig 5). 그 후 대관령을 제외한 지역에서는 2100년까지 다소 감소하였으나 현재수준(2010년 기준)보다는 전체적으로 높은것으로 나타났다(Table 10).

또한, 총 76지역의 TSM 값의 포괄적 적합도를 GIS지도에 나타내었을 때, 무테두리진딧물은 겨울을 제외하고 시간이 지날수록 포괄적 적합도 등급이 여름은 4, 5등급에서 1, 2등급으로, 봄은 9, 10등급에서 5, 6, 7등급으로, 가을은 7, 8등급에서 4, 5, 6등급으로 포괄적 적합도가 높아지는 것으로 나타났다(Fig 6).



**Fig. 5.** The relationship between temperature and intrinsic rate of natural increase ( $r_m$ ) of *Lipaphis erysimi*. Estimated curve is based on the parameters of Lactin-2 model (Lactin et al., 1995). The TSM means optimal temperature ( $T_{opt}$ ) minus habitat temperature ( $T_{hab}$ ) suggested by Deutsch et al. (2007).



**Table 10.** The changes of TSM values of *Lipaphis erysimi*

Rcp 8.5 scenario		Jeju	Haenam	Cheongju	Daegwallyeong
2010	Spring	14.5	15.9	15.4	16.9
	Summer	4	4.3	3.2	4.2
	Fall	9.5	11.6	13.5	14.7
2020	Spring	14.8	16.2	17.4	16.2
	Summer	3.6	3.6	4.4	3.4
	Fall	10.2	12.3	15.2	13.9
2030	Spring	14.1	15.4	16.6	20.2
	Summer	3	3	3.9	8.5
	Fall	9.8	11.9	14.8	18.2
2040	Spring	14.2	15.5	14.9	20.4
	Summer	2.3	2.2	1.5	7.8
	Fall	9.4	11.4	12.3	17.9
2050	Spring	13.5	14.7	16	19.5
	Summer	1.6	1.4	2.4	7.1
	Fall	8.3	10.3	13.5	17.1
2060	Spring	16.4	18.6	19.2	24.3
	Summer	4.2	4.2	3.2	9.3
	Fall	3.2	4.2	4.4	10.6
2070	Spring	11.9	13.4	14.8	18.2
	Summer	0.5	0.4	1.4	5.7
	Fall	7.5	9.4	12.7	16.1
2080	Spring	11.5	12.9	12.2	12.8
	Summer	-0.1	-0.4	-1	-0.4
	Fall	6.9	8.8	9.9	10.7
2090	Spring	11.2	12.5	13.6	16.8
	Summer	-0.7	-1	0	4.6
	Fall	6.2	7.9	11	14.7
2100	Spring	10.5	12	11.5	16.6
	Summer	-1.3	-1.4	-2.4	3.8
	Fall	5.6	7.8	9.3	14.3

**Table 11.** The number of generation and active period of *Lipaphis erysimi* in relation to climate change in Jeju

Climate change	The first occurrence date	The last occurrence date	Active period	Number of generation
Past 30 yr average	April 5	Dec 14	253	13.2
1°C rise	March 27	Dec 21	269	14.4
2°C rise	March 17	Dec 25	283	15.7
3°C rise	March 7	Dec 25	293	16.9

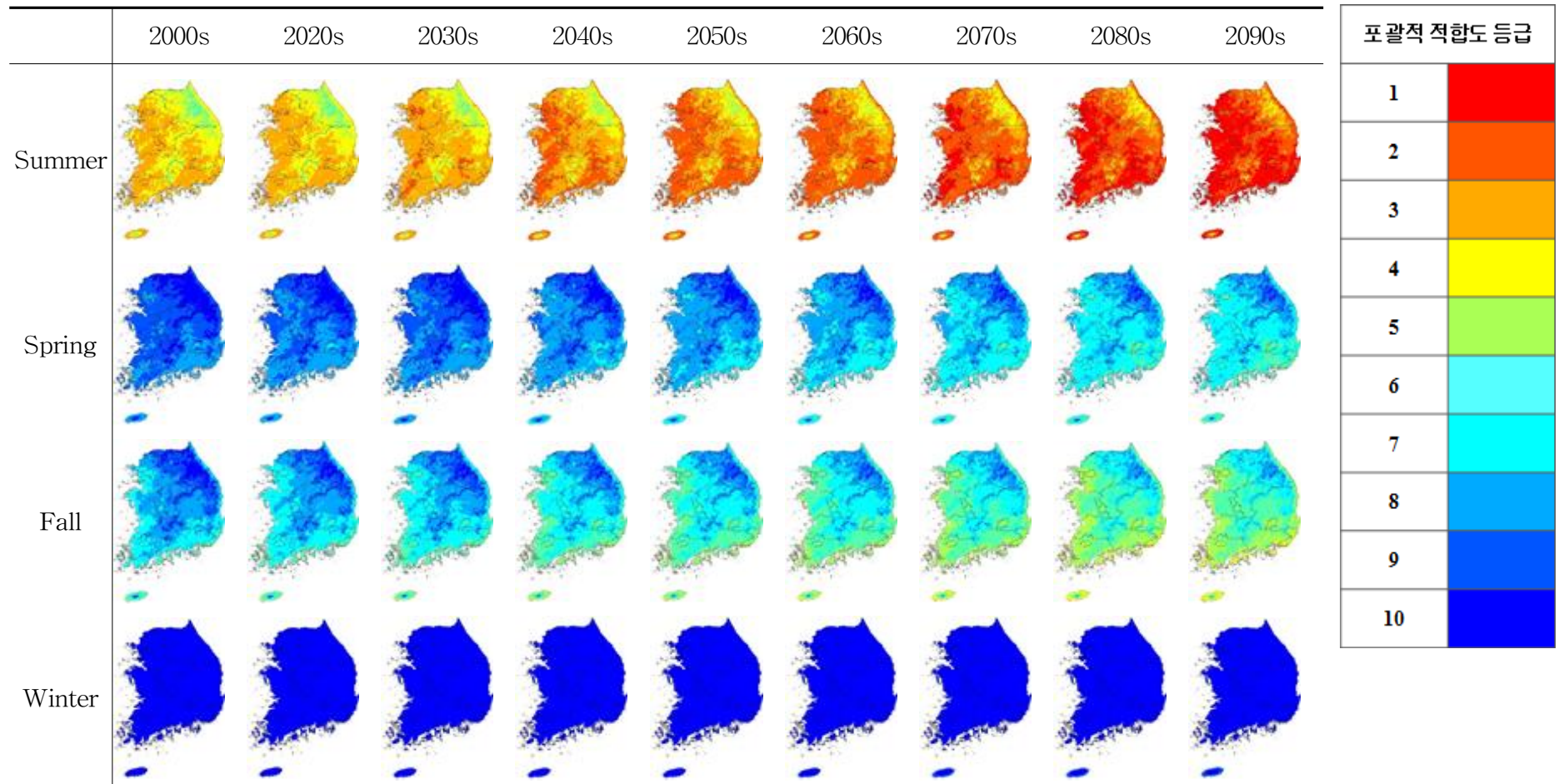


Fig 6. The changes in the overall fitness of *Lipaphis erysimi* with RCP 8.5 Climate Change Scenario

## V. 고찰

기존 연구결과에서 나타난 바와 같이 본 연구에서도 온도는 무테두리진딧물 발육에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 실험처리 온도 범위인 10~35℃에서 10℃의 경우 약충이 3령까지 발육할 수 있는 것을 관찰할 수 있었으며(1 개체), 성공적으로 4령이 되지 못하였다. 무테두리진딧물의 약충의 발육기간은 Table 8에 정리한 것과 같이 실험지역(나라)과 기주식물에 따라 다소 변이를 보였다. Liu (1991)는 본 실험결과와는 달리 10℃ 이하인 8.3℃에서도 약충이 성공적으로 발육한다고 보고하였다. 하지만, 다른 모든 선행연구자들은 15℃ 이하에서 약충발육을 확인하지 못하여 본 결과와 같은 경향 이하였다. Liu (1991)는 다른 연구자들과 비교하여 특별히 다른 기주식물이나 실험방법을 사용한 것이 아니기 때문에 저온에서 무테두리진딧물의 성공적인 발육결과의 이유를 해석하기 어려우나 아마도 지역 개체군의 유전적인 특성일 것으로 보인다. 비교적 고온인 35℃에서도 약충발육이 가능하였는데, Liu (1991)와 본 실험결과는 거의 일치하였다.

무테두리진딧물 약충 발육기간의 경우 15~25℃ 범위에서는 본 실험결과가 기존 보고자료 보다 다소 길었고, 고온인 30과 35℃에서는 다른 연구결과와 비슷한 수준이었다(Fig. 4, A). 본 연구와 동일한 기주식물(양배추)에서 수행한 결과(Liu and Yue, 2001)라고 해서 발육기간이 더 일치하지도 않았다. 이러한 차이는 사용한 기주식물, 실험환경과 방법, 지역개체군의 유전적 특성 등 다양한 요인으로 나타났다고 생각된다.

무테두리진딧물의 성충수명은 약충발육기간보다 더 큰 변이를 보였다. 우리나라에서 발표된 Kim *et al.*(2008)의 결과가 다른 연구들과 비교하여 모든 온도에서 훨씬 수명이 길었고, Liu and Yue(2001)의 보고도 다소 증가하는 경향이였다(Fig. 4, B). 본 실험의 결과는 20℃의 경우 Kim *et al.*(2008)과 일치하였고, 25와 30℃에서는 Kim *et al.*(2008)와 Liu and Yue(2001) 결과의 평균값에 가까웠다. 비록 Liu (1991)의 결과와는 비슷했으나, 본 연구의 15℃에서 타연구와 비교하여 경향성에서 벗어나 수명이 짧은 결과가 나타났는데, 이는 본

연구에서의 다른 온도처리구의 결과 값과 경향성에서 벗어난 것으로 보아 실험과정에서 오류를 충분히 제어하지 못한 것으로 보인다.

온도별 총 산자수는 지역과 연구자에 따라 다소 변이가 있었지만 20℃ 전후에서 최대 산자수를 보이면서 뚜렷한 경향성을 나타냈다(Fig. 4, C). Liu(1991)의 보고에서는 11℃에서도 산자활동이 가능한 것으로 나타났고, 30℃ 이상에서는 산자활동이 거의 불가능하여 본 실험과 같은 경향이였다. 본 연구결과의 산자수는 대체로 Liu and Yue (2001)과 Kim *et al.* (2008) 등 결과의 범위에 있었으며, 다만 30℃에서 산자수는 본 실험에서 훨씬 많았다.

무테두리진딧물은 다양한 작물에서 중요한 해충으로 취급되고 있으나 개체군발생 및 모형 개발에 필요한 온도발육 매개변수가 현재까지 보고되지 않은 상태에 있다. 본 연구에서는 직접 실험자료 및 기존 보고자료를 종합하여 무테두리진딧물 무시충의 개체군 모형 작성에 필요한 기본적인 모형을 모두 제시하였다.

제시된 온도발육모형과 발육완료분포모형은 향후 무테두리진딧물의 발육단계전이모형 작성(Kim *et al.*, 2002)에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 특히 약충발육단계를 전기약충(1~2)령과 후기약충(3~4)령으로 구분하였기 때문에 더 세분화된 시뮬레이션 모형 작성이 가능할 것으로 보인다. 또한 약충 전체기간을 모형작성에 사용하는 경우는 기존 보고자료를 종합하여 발육모형의 매개변수를 사용하는 경우 모형의 대표성을 높일 수 있을 것이다.

앞부분에서 고찰한 바와 같이 무시성충의 수명은 변이가 심하였기 때문에 비이상적인 15℃ 자료를 제거하고, 대신 경향성이 일치하는 Kim *et al.*(2008)의 값(수명 47.8)으로 대체하여 무시성충 노화율 모형을 추정하였다. 국내 개체군의 온도발육자료를 이용하였기 때문에 국내환경에 적합한 모형을 제작하는 경우 유용할 것이다. 노화율 모형 제작과정에서 본 실험결과의 15℃ 자료를 제거하였기 때문에 연령별 산자율 및 생존율 모형 추정시에는 20, 25, 30℃의 자료만 포함되었다.

본 연구에서 제시된 단위모형들의 결정계수( $R^2$ ) 값이 0.91~0.99로 높은 적합력을 보여주고 있고, 실측 생물적 자료를 사용하였으므로 무테두리진딧물의 생물적 특성을 반영하고 있다고 판단된다. 다만, 부분적으로 자료의 대체와 생략을 가했

기 때문에 향후 모형결과의 해석 시 이 부분의 이해가 동반되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 본 연구결과의 단위모형들은 무테두리진딧물의 개체군 동태 등 발생평가에 필요한 개체군 모형을 작성하는 데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 본 연구는 기존 연구결과를 종합하여 무테두리진딧물의 온도발육에 대한 이해의 폭을 넓혀 놓았다고 판단된다.

또한, 생명표통계량을 이용하여 RCP 8.5 기상시나리오에 따른 무테두리진딧물의 기후적응능력 및 잠재적 발생세대 수를 평가하였다. 무테두리진딧물의 내적자연증가율( $r_m$ )과 온도와의 관계는 곤충발육을 모형에서 주로 사용되는 비선형모형을 적용하여 매개변수를 추정하였고 잠재적 발생세대수는 생명표통계량 인자 중 하나인 세대기간( $T$ )을 이용하여 온도의존적 세대완료율모형을 작성한 후 기후시나리오에 따른 발생세대수를 추정하였다. 생명표 통계량 중 세대기간( $T$ )를 이용하여 향후 온도 상승에 따른 발생세대수를 추정한 결과, 온도 증가에 따라 연중 발생시기가 단축되는 것으로 나타났으며 발생세대수 또한 점차 증가하는 것으로 나타났다. 내적자연증가율과 세대기간을 기준으로 무테두리진딧물의 기후변화에 따른 발생양상을 종합적으로 평가한 결과, 향후 온도증가에 따라 무테두리진딧물의 개체군이 크게 증식할 것으로 예측되었다.

기후적응능력 평가의 경우 기후시나리오에 따른 내적자연증가율을 기반으로 개체군 크기의 증가를 유도하는 서식처 온도분포의 폭을 나타내는 TSM(thermal safety margin)을 계산한 후 기후변화시나리오에 따라 10년 단위로 비교하였다. TSM은 내적자연증가율이 최고치가 되는 온도를 최적온도( $T_{opt}$ )로 설정한 후 각 시기별 온도와  $T_{opt}$ 와의 차로 구하였다. 내적자연증가율을 이용하여 무테두리진딧물의 기후변화 적응능력을 추정했을 때 향후 RCP 8.5에 따른 국내기상환경(총 76 지역) 중 4개 지점에서 무테두리진딧물의 증식률은 강원도 일부지역을 제외하고 2070년까지 지속적으로 증가하였으며, 그 후 2070년 부터 약간 감소하였으나 현재 수준보다는 높은것으로 나타났다. 즉 무테두리진딧물은 온난화에 따라서 개체군이 증가하는 것으로 평가되었으며, 서식처 온도와 비교한 TSM 지표 값도 대부분 연도에서 양수 값을 보여 향후 온도가 증가 시 현재보다 높은 번식력을 발휘할 것으로 예상되었다. 그리고 기상청에서 제공하는 1km 공간해상도를 가지는 RCP 8.5 기상시나리오에 따라 10년 단위 계절별 TSM 값을 계산하였다.

각 TSM 값을 10 등급으로 세분화하여 포괄적 적합도의 변화를 GIS 지도에 표출시켰으며, 년도 및 계절별 포괄적 적합도의 변화를 제시하였다. 즉 무테두리진딧물은 온난화에 따라서 개체군이 증가하는 것으로 평가되었으며, 서식처 온도와 비교한 TSM 지표 값도 대부분 연도에서 양수 값을 보여 향후 온도가 증가 시 현재보다 높은 번식력을 발휘할 것으로 예상되었다. 본 연구에서는 생명표통계량을 활용한 기후변화 관련 개체군 영향평가 방법을 제시하고 무테두리진딧물의 조기관리방안 연구를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## VI. 적 요

본 연구는 양배추에서 무테두리진딧물의 온도발육실험, 성충수명, 산자실험을 통해 매개변수를 추정하여, 약충의 온도발육모형, 무시성충의 산자모형 작성에 필요한 기본모형들을 제공하기 위해 실시하였다. 6 개의 온도(10, 15, 20, 25, 30,  $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 16L:8D)에서 실험하였으며, 저온인  $10^{\circ}\text{C}$ 에서는 성공적으로 발육하지 못했다. 약충 발육기간은 온도가 증가하수록  $30^{\circ}\text{C}$ 까지는 감소하였고  $35^{\circ}\text{C}$ 에서는 다시 증가하였는데,  $15^{\circ}\text{C}$ 에서 18.5 일,  $30^{\circ}\text{C}$ 에서 5.9 일 이었다. 약충전체 직선회귀식에서 발육영점온도(DT)는  $7.9^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 유효적산온도(DD)는 126.3 일이었다. 전기약충(1+2령), 후기약충(3+4령), 전체약충 발육률에 대한 비선형모형(Lactin 2 model)과 발육기간 분포 모형(Weibull model)을 작성하였다. 성충수명은  $15^{\circ}\text{C}$ 에서 비정상적으로 18.2 일을 보였고,  $20^{\circ}\text{C}$ 에서 24.4 일,  $30.0^{\circ}\text{C}$ 에서 16.4 일의 범위에 있었으며, 성충 생리적 연령 계산을 위한 노화율 모형작성에 이용되었다. 총 산자수는  $20^{\circ}\text{C}$ 에서 91.6 마리로 최대값을 보였다. 본 연구를 통하여 무테두리진딧물 무시성충 산란모형 작성에 필요한 온도별 총산자수, 연령별 누적산자율, 연령별 생존률 모형 등 3 개의 기본모형을 추정하였다. 또한, 생명표통계량을 이용하여 RCP 8.5 기상시나리오에 따른 무테두리진딧물의 기후적응능력 및 잠재적 발생세대 수를 평가하였다. 잠재적 발생세대수는 생명표통계량 인자 중 하나인 세대기간( $T$ )을 이용하여 온도의존적 세대완료율모형을 작성한 후 기후시나리오에 따른 발생세대수를 추정하였다. 기후적응능력 평가의 경우 기후시나리오에 따른 내적자연증가율을 기반으로 개체군 크기의 증가를 유도하는 서식처 온도분포의 폭을 나타내는 TSM(thermal safety margin)을 계산한 후 기후변화시나리오에 따라 10 년단위로 비교하였다. TSM 은 내적자연증가율이 최고치가 되는 온도를 최적온도( $T_{opt}$ )로 설정한 후 각 시기별 온도와  $T_{opt}$ 와의 차로 구하였다. 또한 RCP 8.5 기상시나리오에 따라 TSM 값을 10 등급으로 세분화하여 포괄적 적합도의 변화를 GIS 지도에 표출시켰으며, 년도 및 계절별 포괄적 적합도의 변화를 제시하였다.



## 인 용 문 헌

- Blackman, R.L., Eastop, V.F., 1984. Aphids on the world's crops: An identification guide, 291 pp.
- Choi, G.-S., 1993. Studies on biological properties and genome analysis of turnip mosaic virus isolated from Chinese cabbage and radish. Kangwon National University, Doctor Thesis. 126 pp.
- Choi, J.-k., 1998. Studies on ecology and control of viral disease by turnip mosaic virus on Chinese cabbage. Kangwon National University, Doctor Thesis. 119 pp.
- Dixon, A.F.G. 1987. Evolution and adaptive significance of cyclical parthenesis in aphids. Aphids, their Biology, Natural Enemies and Control, Vol. 2A (ed. by A. K. Minks and P. Harrewijn), pp. 289-297. Elsevier, Amsterdam.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Huey, R.B., Sheldon, K.S., Ghalambor, C.K., Haak, D.C., Martin, P.R., 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. PNAS 105, 6668-6672.
- Eastop, V.F., 1983. The biology of the principle virus vectors, in: Plumb, R.T., Thresh, J.M. (Eds.), Plant virus epidemiology. Blackwell Scientific Publication, Oxford. pp. 115-132..
- Flanders KL, Radcliffe EB and Ragsdale DW,. 1991. Potato leafroll virus spread in relation to densities of green peach aphid (Homoptera: Aphididae): Implications for management thresholds for Minnesota seed potatoes. *J Economic Entomology* 84, 1028-1036.

- Frazier, M.R., Huey, R.B., Berrigan, D., 2006. Thermodynamics constrains the evolution of insect population growth rates: "Warmer is better". *Am. Nat.* 168, 512-520.
- Jagan, M., Krishnaiah, N.K., Krishna K.N.K., 1981. Chemical control of mustard aphid, *Lipaphis erysimi* Kalt and leaf webber, *Crocidolomia binotalis* Zell on cabbage. *Pesticides* 15, 29-32.
- Jandel Scientific, 1996. TableCurve 2D. Automated Curve Fitting and Equation Discovery: Version 4.0. Jandel Scientific, Sam Rafael, CA, USA.
- Kim, D.-S., Lee, J.-H., 2003. Oviposition model of *carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Eco. Model.* 162, 145-153.
- Kassanis, B., 1961. The transmission of potato aucuba mosaic virus by aphids from plants also infected by potato virus A or Y. *Virology* 13, 93-97.
- Kwon, S-H., 2015. A Forecasting model for the occurrence of sexual morphs in cotton aphid in relation to temperature and photoperiod. Jeju National University. Master Thesis. 46 pp.
- Kim, D.Y., Chang, S.K., Jeong, H.U., Kim, M.J., Kim, I., 2008. Development of the turnip aphid, *Lipaphis erysimi* Kaltenbach (Homoptera: Aphididae), and test of insecticidal efficacy of some commercial natural products. *Int. J. Indust. Entomol.* 16, 93-99.

- Kim, D.-S., Choi, K.S., Jang, Y.S., Song, J.H., 2009. The effects of elevated temperatures on the population phenology and abundance of citrus pests in Jeju, Korea. International Symposium on Climate Change and Insect Pest, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Republic of Korea. 28-30 October, 2009.
- Kim, H.-J., 2008. A Systematic study of the Tribe Aphidini (Hemiptera:Aphididae) in the Korean peninsula, with discussion of their phylogenetic relationships based on molecular markers and morphology. Seoul National University, Doctor Thesis.
- Kim, H.Y., 2010. (A)Study on the Control of Green Peach Aphid (*Myzus persicae*) by Entomopathogenic fungi *Lecanicillium attenuatum* CNU-23
- Lactin, D.J., Holliday, N.J., Johnson, D.L., Craigen, R., 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. *Environ. Entomol.* 24, 68-75.
- Leather, S.R., 1992. Aspects of aphid overwintering (Homoptera: Aphidinea: Aphididae). *Entomologia Generalis*, 17, 101-113.
- Lee, S., J. Holman, and J. Havelka. 2002. *Illustrad Catalogue of Aphididae in the Korean Peninsula. Part I, Subfamily Aphidinae (Hemiptera: Sternorrhyncha)*. Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology. Daejeon, Korea. 329 pp.
- Liu, S.-S., 1991. The influence of temperature on the population increase of *Myzus persicae* and *Lipaphis erysimi*. *Acta Entomol. Sinica* 34, 189-197.

- Liu, S.S., Meng, X.D., 2000. Modelling development time of *Lipaphis erysimi* (Hemiptera: Aphididae) at constant and variable temperatures. Bull. Entomol. Res. 90, 337-347.
- Lee, J.-H., 2006. Temperature-dependent development and its model of the greenbug, *Schizaphis graminum* (Rondani) (Homoptera: Aphididae). Chonbuk National University. Master Thesis. 46 pp.
- Liu, T.X., Yue, B.S., 2001. Comparison of some life history parameters between alate and apterous forms of turnip aphid (Homoptera: Aphididae) on cabbage under constant temperatures. Florida Entomol. 84, 239-242.
- Mahal, M.S., Kumar, S., Brar, G.S., 2012. Threshold temperature and thermal constant for the development of mustard aphid *Lipaphis erysimi* on rapeseed and mustard. J. Insect Sci. 25, 359-363.
- Metcalf, R.L., 1962. Destructive and useful insects: Their habits and control. McGraw-Hill Co, New York.
- Namba, R. Kawanishi, Clinton, Y., 1966. Transmission of Papaya Mosaic Virus by the Green Peach Aphid. *J Economic Entomology* 59, 669-671.
- Singh, S.R., Narain, A., Srivastava, K.P., Siddiqui, J.A., 1965. Fecundity of mustard aphid of different rapeseed and mustard species. Indian Oilseeds J. 9, 215-219.
- Yamaguchi, T., Kiritani, K., Matsuhira, K., Fukuda, K., 2001. The influence of unusual hot weather on the occurrence of several arthropod crop pests. Jpn. J. Appl. Entomol. Zool. 45, 1-7.

Wagner, T.L., WU, H.-I., Sharpe, P.J.H., Coulson, R.N., 1984. Modeling distributions of insect development time: A literature review and application of the Weibull function. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 77, 475-487.

## 감사의 글

학과 생활 중 실험실 생활을 해보겠다고 교수님을 찾아갔던 것이 벌써 4년이 지난 시간이 되었습니다. 지난 4년 동안 많은 도움과 가르침을 주신 존경하는 김동순 지도교수님께 깊이 감사드립니다. 교수님 보면서 곤충생태학이라는 학문 이외에도 많은 것을 배울 수 있어 매우 의미 있는 시간이었습니다.

바쁘신 와중에도 학위논문을 심사해주시고 검토해주신 현해남 교수님과 김주성 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 학부생 시절부터 많은 가르침을 주신 송창길 교수님과 전용철 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

실험실 생활을 하며 옆에서 많은 관심과 조언으로 이 논문을 쓰는데 큰 도움을 주신 권순화, 김수빈, 현승용 선생님께 깊이 감사드립니다. 또한 부족한 동생을 끝까지 챙겨준 박정훈, 김태욱 형님께 깊이 감사드립니다. 그리고 실험실에서 고생만 시켜 미안한 고경훈, 고명수, 김건에게도 고마운 마음을 전합니다. 또 많은 격려와 응원을 해주신 장용석, 김용근 선생님과 농학과 조교로 고생하고 계시는 이종훈, 이희선 선생님, 오랫동안 옆에서 저의 불평불만을 받아준 홍상준, 이진혁과 고향친구들에게도 감사의 마음을 전합니다. 대학원에 진학하며 저의 멘토가 되어주신 오명협 선생님께도 감사드립니다. 많은 분들의 격려와 응원 덕분에 이 논문을 완성할 수 있었고 이 논문이 나오기까지 도움을 주신 모든 분들께 짧게나마 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 저를 믿고 지켜봐주신 아버지, 어머니와 외가식구들, 저 때문에 고생한 헤림이, 성훈이에게 정말 감사드리며 이 논문을 바칩니다.