



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

제주지역 옥수수에서  
기장테두리진딧물의 온도발육  
특성과 생명표 통계량

Temperature-dependent development and life table  
parameters of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera:  
Aphididae) on corns in Jeju, Korea

濟州大學校 大學院

農學科

朴正訓

2016年 8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. 기주식물 재배 및 실험용 진딧물 사육 .....	7
2. 온도별 발육실험 .....	8
2-1. 약충발육기간 조사 .....	8
2-2. 무시형 성충 수명과 산자수 조사 .....	8
2-3. 통계분석 .....	9
3. 온도발육관련 모형의 매개변수 추정 .....	9
3-1. 약충 온도 발육모형 .....	9
3-2. 선형 발육모형 .....	9
3-3. 비선형 발육모형 .....	10
3-4. 발육완료 분포모형 .....	10
4. 성충의 산자관련 모형 .....	10
4-1. 성충 노화율 모형 .....	10
4-2. 온도별 총 산자수 모형 .....	11
4-3. 연령별 누적산자율 모형 .....	11
4-4. 연령별 생존율 모형 .....	12

5. 생명표 통계량 추정 .....	12
6. RCP 8.5 기상시나리오에 따른 기후적응능력 및 발생세대수 평가 .....	14
6-1. 기후자료의 수집 .....	14
6-2. 기후적응능력 및 발생세대수 평가 .....	14
IV. 결 과 .....	16
1. 약층발육, 성층수명 및 산자수 .....	16
2. 약층 온도발육 모형 .....	19
3. 성층 산자 모형 .....	25
4. 생명표 통계량 추정 .....	31
5. RCP 8.5 기상시나리오에 따른 기후적응능력 및 발생세대수 평가 .....	33
V. 고 찰 .....	37
VI. 적 요 .....	41
인용문헌 .....	42

# LIST OF TABLES

Table 1. Developmental period (Mean $\pm$ SE) for nymphal stages of <i>Rhopalosiphum padi</i> at constant temperatures in the laboratory .....	17
Table 2. Adult longevity in days and fecundity of <i>Rhopalosiphum padi</i> at constant temperatures (Mean $\pm$ SE) .....	18
Table 3. Estimated parameters of a linear regression model for nymphal and total immature stages of <i>Rhopalosiphum padi</i> .....	20
Table 4. Estimated parameter values( $\pm$ SEM) for nymphal development model of <i>Rhopalosiphum padi</i> .....	21
Table 5. Estimated parameter values( $\pm$ SEM) for nymphal distribution model of development time of <i>Rhopalosiphum padi</i> .....	22
Table 6. Estimated parameter values for the adult aging rate, temperature-dependent total fecundity, age-specific oviposition rate, and age-specific survival rate of <i>Rhopalosiphum padi</i> .....	26
Table 7. The Life Table for <i>Rhopalosiphum padi</i> .....	29
Table 8. Temperature-dependent development data of <i>Rhopalosiphum padi</i> and source references in previous studies .....	32
Table 9. The changes of TSM values of <i>Rhopalosiphum padi</i> .....	35
Table 10. The number of generation and active period of <i>Rhopalosiphum padi</i> in relation to climate changes in Jeju .....	36

# LIST OF FIGURES

- Fig. 1. Developmental rate (1/days) curve for each developmental stage of *Rhopalosiphum padi* 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 4 for details). The dotted line on D is same with the estimated line on C, and was provided for the purpose of comparison with estimated lines using previously published data. .... 23
- Fig. 2. Cumulative proportions for the development completion time of *Rhopalosiphum padi* nymphs as a function of the physiological ages. A = small nymph (1+2 instar), B = large nymph (3+4 instar), and C = nymph (all instar). .... 24
- Fig. 3. Component models for oviposition model of *Rhopalosiphum padi*, A = adult aging rate, B = temperature-dependent total fecundity, C = age-specific cumulative oviposition rate, and D = age-specific survival rate. .... 27
- Fig. 4. A = Immature development time, B = apterous longevity, C = fecundity of *Rhopalosiphum padi* in the previous reports comparing with present study. The symbols of star and solid circle indicate the results based on present study and previous reports, respectively. .... 28
- Fig. 5. The relationship between temperature and intrinsic rate of natural increase ( $r_m$ ) of *Rhopalosiphum padi*. Estimated curve is based on the parameters of Lactin model (Lactin et al., 1995). TSM (thermal safety margin) indicates the difference between habitat temperature ( $T_{hab}$ ) and optimal temperature ( $T_{opt}$ ). .... 34

## ABSTRACT

Temperature-dependent development and fecundity of apterious *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) were examined at six constant temperatures (10, 15, 20, 25, 30 and  $35 \pm 1.0^\circ\text{C}$ , RH 50–70%, 16L:8D). Development time of nymphs decreased with increasing temperature and ranged from 42.9 days at  $10^\circ\text{C}$  to 4.7 days at  $30^\circ\text{C}$ . The nymphs did not develop until adult at  $35^\circ\text{C}$  because the nymphs died during the 2nd instar. The lower threshold temperature and thermal constant of nymph were estimated as  $8.3^\circ\text{C}$  and 101.6 degree days, respectively. The relationships between development rates of nymph and temperatures were well described by the nonlinear model of Lactin 2. The distribution of development times of each stage was successfully fitted to the Weibull function. The longevity of apterious adults decreased with increasing temperature ranging from 24.0 days at  $15^\circ\text{C}$  to 4.3 days at  $30^\circ\text{C}$ , with abnormally short longevity of 11.1 days at  $10^\circ\text{C}$ . *R. padi* showed the highest fecundity at  $20^\circ\text{C}$  (38.2) and the lowest fecundity at  $10^\circ\text{C}$  (3.9). In this study, we provided component sub-models for the oviposition model of *R. padi*: total fecundity, age-specific cumulative oviposition rate, and age-specific survival rate as well as adult aging rate based on the adult physiological age.

Additionally, the climate adaptation and annual multiplication ability of *R. padi* were evaluated using the parameters of life table according to RCP 8.5 climate scenario. The optimal temperature ( $T_{\text{opt}}$ ) of *R. padi* 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 the difference between  $T_{\text{opt}}$  and  $T_{\text{hab}}$  (habitat temperature), which indicates the tolerance range of  $r_m$  with increasing temperature. TSM showed positive value till 2100 along RCP 8.5 climate scenario, indicating the populations of *R.*

*padi* increase continuously. The relationship between the completion rate of generation time ( $1/\text{generation time}$ ) 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, *R. padi* is predicted to increase by global warming in Korea except of some regions, especially largely in spring and autumn seasons.



## I. 서론

기장테두리진딧물(*Rhopalosiphum padi* (Linne))은 노린재목(Hemiptera) 진딧물과(Sternorrhyncha)에 속한 곤충이다(Blackman and Eastop, 1985). 기주식물로 귀리, 밀, 보리, 옥수수 등의 농작물 기주와 귀룽나무, 벃나무, 왕벃나무 등의 기타기주를 가지며, 한국, 일본, 뉴질랜드, 동남아시아, 인도, 유럽, 러시아, 북아메리카, 하와이 등 세계 각지에 분포하는 것으로 알려져 있다(Reviewed in Kim, 2008). 이 진딧물은 귀룽나무(장미과) 등을 겨울(월동) 또는 1차 기주로 이용하고 넓은 범위의 벼과식물 등 목초를 여름철 2차 기주로 하는 완전생활 이주형 진딧물에 속한다(MAFF, 1982).

기장테두리진딧물은 식물의 체관부를 흡즙하여 직접적인 경제적 피해뿐만 아니라 감로의 배출로 인한 그을음병 유발과 바이러스를 매개하는 등의 간접적인 피해로 식물의 성장과 결실에 많은 피해를 주는 것으로 알려져 있다(Eastop, 1983). 진딧물은 가루이류나 멸구류보다 더 많은 바이러스를 매개하는 것으로 알려져 있는데, 보고된 4700종 이상의 진딧물들 가운데 190종 이상이 식물 바이러스를 옮기는 것으로 보고되었다(Blackman and Eastop, 1985; Emden and Harrington, 2007).

기장테두리진딧물은 전 세계적으로 곡류의 중요한 해충으로 취급되고 있으며(Villanueva and Strong, 1964; Sengonca et al., 1994; Asin and Pons, 2001; Auad et al., 2009; Taheri et al., 2010; Descamps and Chopa, 2011) 우리나라에서는 전국적으로 분포하는 종(KBIS, N.D.)으로, 진딧물의 생물적 방제에 이용되는 콜레마니진디벌의 개체군 유지를 위한 기주로도 많이 활용되고 있다(Lee et al., 1996). 제주에서는 귀리에서 다 발생하여 경제적 피해를 입히는 것으로 조사되었고 기타 보리와 오차드 그라스의 해충으로 보고되었다(Song et al., 2000).

곤충을 포함한 절지동물은 변온동물로서 기후변화에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Frazier et al., 2006). 우리나라 박과류 채소작물의 중요한 해충인 목화진딧물은 기후변화로 온도증가에 따라 환경 적합력(fitness)이 증가하는 반면

복숭아혹진딧물은 감소하는 것으로 분석되었다(Kim et al., 2009).

외국에서 곡류의 중요한 해충으로 알려져 있는 기장테두리진딧물의 발생 및 피해가 향후 기후변화에 따라서 어떻게 변동 될 것인지는 예상하기 힘들다. Macfadyen and Kriticos (2012)은 생활사가 복잡한 모델 해충으로 기장테두리진딧물을 선택하여 호주지역에서 기후변화에 따른 정착 적합도를 평가한 바 있다. 하지만, 지금까지 많은 연구자가 온도발육에 대한 실험 자료를 보고했음에도 불구하고 개체군 모형 작성에 필요한 기본적인 온도 발육모형은 제시한 바 없는 상태이다. 따라서 본 연구는 국내 기장테두리진딧물 개체군을 이용하여 옥수수를 기주식물로 10~35℃ 온도 범위에서 약충 발육과 무시성충의 수명 및 산자 특성을 조사하고, 기존 보고 자료와 비교하고 종합하여 개체군 모형 작성에 필요한 기본 모형을 제공하였으며, 생명표를 작성하고 RCP 8.5 기상시나리오에 따라 우리나라에서 기장테두리진딧물의 기후적응능력과 발생세대수를 평가하였다.

## II. 연구사

전 세계적으로 지구상에 알려져 있는 진딧물과에 속하는 곤충은 4,700여종으로, 한반도에서는 62종의 진딧물이 보고되어 있다(Kim, 2008). 4,700여종의 진딧물 중 250여종이 농업해충으로, 1,700여종이 산림해충으로 알려져 있다(Lee et al. 2002).

진딧물은 기주식물의 잎과 어린 순에 군집을 형성하여 흡즙하는 생태적 특징이 있는데 발생시기가 식물의 생육시기에 맞춰 상당히 빠르며 초기 발생이 식물의 성장부위에 집중되기 때문에 조기 발육에 큰 영향을 준다. 이러한 진딧물들은 보호색이 발달하거나 잎 뒷면과 같은 은밀한 부위에 서식하기 때문에 발생 초기에 발견하기가 어렵다. 또한, 1세대 간격이 5~7일 정도로 빠르고 무성생식을 통해 개체수가 빠르게 증가하며, 유시충의 발생으로 인해 인접한 기주식물로 전파가 쉽기 때문에 초기 밀도가 적을 때 방제하지 않으면 한 재배지역 내에 전체적인 피해를 입기 쉽다.

진딧물의 일차적인 피해 양상은 식물의 성장부위에 비정상적인 발육을 일으키는데 진딧물은 식물의 영양물질이 가장 많이 몰리는 순 부위나 어린잎을 흡즙하여 생장을 억제하고, 식물이 비정상적으로 자라게 만든다. 일차적인 피해는 감로(honeydew)에 의한 곰팡이, 세균병의 감염을 유도하거나 바이러스를 매개하여 병을 유발하는 것이다. 감로는 진딧물의 배설물으로써 소화되지 않은 이당류 화합물이고 끈적이는 성질이 있으며 단맛이 나는 물질이다. 이러한 감로가 진딧물로부터 배출되어 식물의 잎 표면 등에 곰팡이 병을 유도하며 각종 세균병에 감염되기 쉬운 원인이 된다. 무엇보다도 경제적으로 피해를 주는 것은 식물 병원성 바이러스를 매개하는 것이다(chan et al., 1991).

진딧물의 생활사는 기주식물의 활용방식에 따라 기주전환종(heteroecious)과 비기주전환종(autoecious)으로 구분할 수 있다(Blackman and Eastop, 2006). 기주전환종은 가을부터 다음 해 봄까지 일차기주(primary host)에서 월동 및 생활하며 여름에는 이차기주(secondary host)로 이동하여 번식하고 가을에는 다시 일차기주로 돌아온다. 예를 들어, 목화진딧물의 경우 주로 무궁화에서 월동한 후 봄

에 부화하고 여름이 되면 오이, 고추 등의 여러 초본식물로 이동하여 단위생식으로 번식하며 가을에는 다시 무궁화로 돌아온 후 유성형세대(sexual morphs)가 발생하여 월동을 준비한다(Shim et al., 1979). 비기주전환종은 기주전환종과 달리 목본류와 초본류 간의 이동 없이 한 종의 기주에서만 생활한다. 일반적으로 전체 진딧물종(species) 중 10%가 기주전환종으로 보고되었고 기주전환종 진딧물 중 63%가 5종 이상의 기주식물에서 생활하지만 기주식물 대부분이 같은 과(family)의 식물로 알려져 있다(Eastop, 1973; Hales et al., 1997). 진딧물이 기주전환을 통해 얻을 수 있는 이점은 개체군 확산, 천적으로부터의 회피, 종내경쟁 방지, 단일기주의존성 탈피 등이 있지만(Mackenzie and Dixon, 1992; Hales et al., 1997), 기주전환 과정에서 사망률이 급격히 높아지는 위험성도 내재한다. 예를 들어 기주전환종인 기장테두리진딧물(*Rhopalosiphum padi*)의 경우 기주전환 과정에서 약 0.6%의 진딧물만 기주이동에 성공하는 것으로 보고된 적이 있다(Ward et al., 1998). 이러한 기주전환 과정에서 개체수의 큰 손실에도 불구하고 이차기주로 기주전환에 성공한 개체군의 번식력 증대로 인하여 손실 이상으로 보상받는 것으로 보고되었다(Dixon and Ranajit, 1994).

기장테두리진딧물은 귀리, 밀, 보리, 옥수수 등의 농작물 기주와 귀룽나무, 뱃나무, 왕뱃나무, 이스라지, 창포, 포아풀, 피 등의 기타기주를 가지며 한국(북부, 중부, 남부, 제주도), 일본, 뉴질랜드, 동남아시아, 인도, 유럽, 러시아, 북아메리카, 하와이 등 전 세계적으로 분포하고 있다. 기장테두리진딧물은 일차기주인 Prunus속 식물에서 월동하고 이차기주인 벼과 식물류로 이동한다. 전 세계적으로 여러 가지 바이러스를 매개하며 그 중 대표적으로 Barley yellow dwarf virus(BYDV)를 매개하는 것으로 알려져 있다. 일차기주에서 5월 중순까지 잎 뒷면에서 서식하고 벼과 식물로 이동하여 잎 뒷면이나 줄기에서 흡즙하여 피해를 준다. 벼과 농작물에서 경제적으로 중요한 해충으로 알려져 있다.

기장테두리진딧물을 육안으로 관찰했을 때 무시충은 암녹색, 연녹색, 또는 녹색이며 빨판 아랫부분에 붉은 반점이 있다. 무시충과 무시충 약충은 표면에 흰 밀랍가루를 얇게 쓰고 있고, 유시형 약충은 북부 양측의 밀랍가루가 두터운 띠를 형성하고 있다(Reviewed in Kim, 2008).

### Ⅲ. 재료 및 방법

#### 1. 기주식물재배 및 실험용 진딧물사육

기장테두리진딧물 사육 및 온도실험용 기주식물로 옥수수 품종 중 하나인 '연농 1호'(Zea mays L.)를 이용하였다. 직사각형 화분(2.5리터)에 피트머스, 버미큘라이트, 펄라이트를 1:1:1 비율로 섞어 만든 상토를 넣고 옥수수 묘종을 이식하여 곤충 사육실에서의 진딧물 누대사육에 이용하였으며, 그 외에 개인 농장(제주시 아라동)에 옥수수 묘종을 20주식 3회 정식하여(2015년 6월 5일, 6월 28일, 7월 26일) 무농약으로 재배하면서 실험에 필요한 옥수수 잎을 마련하였다.

본 실험에 이용한 기장테두리진딧물은 2015년 6월 20일 제주대학교 인근 포장의 옥수수에서 채집하였으며 곤충사육실( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $55 \pm 5\%$  RH, 16L:8D)에서 기주식물로 재배하고 있던 옥수수에 접종하여 4~5세대 누대사육 한 후 실험에 이용하였다.

채집한 진딧물은 Kim (2008)에 따라 동정하였다. 기장테두리진딧물 표본의 무시충의 몸길이는 1.2~2.4 mm이며 더듬이와 복부 등면의 털은 매우 짧은 편이고 복부 등면에는 점선으로 다각형 모양에 작은 점이 안쪽에 있는 그물무늬가 뚜렷하게 관찰된다. 주둥이 끝은 가운데다리 밑마디를 약간 넘어서고, 4+5 마디의 길이는 뒷다리 제2발마디의 길이와 거의 비슷하다. 빨관은 검은색이고 길이는 끝편의 약 2배 정도이고 끝부분의 테두리는 크고 매우 뚜렷하다. 빨관의 아래쪽 1/2이 약간 부푼 개체도 있으나 대개는 평행한 것이 많다. 끝편은 검고 수축이 없으며 거의 삼각형 모양으로 6~10개의 털이 있다. 유시충의 더듬이 제 3, 4마디에는 각각 12~24, 3~9개의 이차감각기가 있다는 형태적 특징으로 확인하였으며, 대표 슬라이드 표본은 제주대학교(곤충생태학실험실)에 보관되어 있다.

## 2. 온도별 발육실험

### 2-1. 약충발육기간 조사

약충발육기간 조사를 위하여 곤충사육용기(직경 5.5 cm, 높이 1.5 cm)에 증류수를 적신 탈지면을 깔고, 그 위에 옥수수 잎을 잘라 올려놓아 진딧물을 사육할 수 있는 사육 장치를 마련하였다. 사육용기의 뚜껑은 통기가 가능하도록 얇은 면포로 처리한 직경 1.6 cm의 구멍이 나 있었다. 실험에 필요한 갓 출생한 1령 약충을 얻기 위하여 사육용기(총 36개)에 기장테두리진딧물 3령~성충을 3~5마리를 접종하여 2일 후에 건전한 무시성충만을 남기고 모두 제거하였다. 그 다음 3시간 이내 태어난 어린 약충을 실험에 사용하였다.

사육용기에 4 × 4 cm 옥수수 잎 절편을 올려놓고, 가는 붓을 이용하여 1령 약충을 1마리씩 접종하였다. 옥수수 잎은 정식 후 30일 이상 된 옥수수에서 상위엽을 이용하였다. 약충을 접종한 사육용기를 미리 10, 15, 20, 25, 30, 35 ± 1°C로 설정해 놓은 항온기(DS-8CL, (주)다솔과학)에 옮겨놓았다(RH 50~70%, 16L:8D).

온도별 각 30마리의 개체를 처리하였다. 12시간 간격으로 기장테두리진딧물 약충의 발육기간과 사망여부를 조사하였으며, 조사 때 마다 탈피각을 확인하여 영기를 구분하였다(해부현미경 10~50배, Nikon SMZ 745T).

### 2-2. 무시형 성충 수명과 산자수 조사

약충발육 실험과 같은 조건에서 성충의 수명과 산자수를 조사하였다. 매일 12시간 간격으로 생사를 확인하고 산자는 기록과 동시에 제거하였다. 성충의 생사유무는 가는 붓으로 진딧물 몸을 여러 차례 접촉하여 움직임이 전혀 없는 것을 죽은 것으로 판단하였다. 성충이 우발적으로 물에 빠져 죽거나 조기 사망한 개체는 분석에서 제외하였다.

## 2-3. 통계분석

약층의 발육기간, 성충수명, 산자수 자료의 온도별 유의성 검정을 위하여 일반 선형모형을 이용한 분산분석(GLM)을 실시하였으며, Tukey' Studentized Range Test (HSD)를 이용하여 평균간 비교(P = 0.05)를 실시하였다(SAS Institute, 1999).

## 3. 온도발육관련 모형의 매개변수 추정

### 3-1. 약층 온도발육모형

기장테두리진딧물 약층기간을 세분화해 전기약층(1령+2령)과 후기약층(3령+4령), 전체기간으로 구분하여 모형을 추정하였다.

### 3-2. 선형 발육모형

기장테두리진딧물의 약층기간에 역수(1/약층기간)를 취하여 약층 발육률로 추정하고 약층의 발육영점온도 및 발육완료에 필요한 적산온도를 추정하기 위하여 온도와 발육률(1/발육기간) 간의 직선회귀식을 구하였다.

$$r(T) = aT + b \quad \text{---- 식 1}$$

위 식에서  $r(T)$ 는 온도  $T$ 에서 발육률이고,  $T$ 는 실험온도,  $a$ 는 직선회귀식의 기울기이며,  $b$ 는  $y$ 절편이다. 이 식을 이용하여 발육영점온도( $-y$ 절편/기울기)와 적산온도(1/기울기)를 계산하였다. 또한 기존에 보고된 자료를 종합하여 발육영점온도와 유효적산온도를 추정하였다. 이 때 온도와 발육률 간 선형관계에서 벗어난 자료는 Ikemoto and Takai (2000)의 방식에 따라 D vs. DT 그래프를 작성하여 제거하였다(D = 발육기간, T = 처리온도).

### 3-3. 비선형 발육모형

기장테두리진딧물 약충의 온도와 발육률(1/약충기간) 사이의 관계를 경험적인 비선형발육모형인 Lactin-2(Lactin et al., 1995) 모형을 사용해 추정했다.

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

여기서  $r(T)$ 는 온도  $T$ 에서 약충의 발육률이며,  $\rho$ 는 효소가 촉매하는 생화학적 반응의 합성치,  $T_{max}$ 는 추정된 상한치사온도,  $\Delta$ 는 온도상한 부근에서 급격한 발육붕괴가 일어나는 온도범위,  $\lambda$ 는 저온영역에서 발육율과  $y$ 축이 교차하게 유도하는 매개변수를 나타낸다.

### 3-4. 발육완료 분포모형

기장테두리진딧물의 발육단계발육완료 분포모형을 설명하기 위하여 2개의 매개변수를 갖는 Weibull 함수 (Weibull 1951; Wagner et al., 1984)를 사용하였고 함수식은 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - \exp(-(x/\alpha)^\beta) \quad \text{---- 식 3}$$

$F(x)$ 는 표준화된 시간  $x$ 에서 같은 연령집단의 개체들 중 발육이 완료된 누적 개체들의 비율을 나타내며,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 추정해야할 매개변수이다.

## 4. 성충의 산자관련 모형

### 4-1. 성충 노화율 모형

온도( $T$ )와 성충의 노화율(1/성충수명)을 설명하기 위하여 Eyring 모형(Eyring,



1935; modified by Curry and Feldman, 1987)을 사용하였다.

$$r(T) = aT \exp(-b/T) \quad \text{---- 식 4}$$

위 함수식에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 추정해야 할 매개변수이며, 이 식을 이용하여 성충의 생리적 연령( $P_x$ )을 추정하였다

#### 4-2. 온도별 총산자수 모형

본 연구에서는 온도에 따라 암컷 성충이 평생(수명기간, longevity) 동안 낳을 수 있는 총산자수를 의미하는 모형으로 총산란수 모형으로 많이 이용되고 있는 다음 식을 이용하여 계산했다.

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

위 식에서 온도  $T$  및 총산자수  $f(T)$ 에서  $\omega$  = 경험적으로 추정된 상수,  $\epsilon$  = 최대 산자수가 나타나는 온도,  $\kappa$  = 총산자수 곡선의 분포를 조정하는 매개변수를 의미한다.

#### 4-3. 연령별 누적산자율 모형

연령별 누적산란율은 수명기간 동안 총 산자능력(산자 수) 중에서 어느 특정 연령시기에 산자하는 산자 수의 누적된 비율을 의미하며 2개의 매개변수를 갖는 Weibull 함수(식 3)를 사용하였다(단,  $x$ 는  $P_x$ 를 나타냄).

성충의 수명을 평균수명으로 나누어 표준화하였고(즉, 생리적 연령), 이에 대응하는 연령별 누적산자율을 계산해 수식의 매개변수 값을 추정하였다. 각 온도에 서 생리적 연령에 대응하는 누적산자율은 일별 산란수를 누적하여 각각 총 산자수로 나누어 구한 것으로 온도에 따른 산자곡선의 변이를 표준화해 온도와 독립

적인 누적산란율 곡선을 얻을 수 있었다.

#### 4-4. 연령별 생존율 모형

연령별 누적생존율(Age-specific survival rate)은 갓 성충이 된 집단이 시간이 경과하여 어느 생리적 연령에 도달했을 때 살아있는 개체수의 비율이다. 본 연구에서는 일반적으로 곤충의 생존율 모형으로 많이 활용되고 있는 시그모이드 함수를 이용하였다(Kim and Lee, 2003).

$$s(Px) = \frac{1}{1 + \exp[(\gamma - Px)/\delta]} \quad \text{---- 식 6}$$

여기서  $s(Px)$ 는 생리적 연령  $Px$ 에서 생존율이고,  $\gamma$  은 50% 생존율에 대응하는 생리적 연령,  $\delta$  는 매개변수를 의미하며, 성충의 수명을 생리적 연령으로 전환시키고 이에 대응하는 연령별 생존율 값을 이용해 수식의 매개변수 값을 추정하였다. 모든 수식의 매개변수는 Table curve(Jandel Scientific, 2002) 프로그램을 이용하여 추정하였다.

#### 5. 생명표 및 통계량

기장테두리진딧물의 생명표 통계량을 추정하기 위해 15°C에서 30°C까지의 약충의 발육기간, 사충률, 성충수명, 산자수를 이용하여 JackKnife 방법(Maia et al. 2000)으로 생명표 통계량을 작성하였다. 생명표의 매개변수인 총증식률(gross reproductive rate, GRR), 순증식률(net reproductive rate,  $R_0$ ), 세대기간(generation time, T), 내적자연증가율(intrinsic rate of increase,  $r_m$ ), 기간자연증가율(finite rate of increase,  $\lambda$ ), 배가기간(doubling time, DT)은 엑셀 프로그램을 사용하여 계산하였으며, SAS를 이용해 분산분석(GLM)과 Tukey's Studentized Range (HSD) Test를 이용한 유의성 검정을 하였다.

○ GRR(gross reproductive rate)

총 증식률

$$GRR = \sum m_x$$

○  $R_0$ (net reproductive rate)

순 증식률

$$R_0 = \sum l_x m_x$$

○  $T$ (generation time)

한 세대의 개체가 출현하여 다음 세대를 산란할 때까지의 기간

$$T = \frac{\sum l_x m_x x}{R_0}$$

○  $r_m$ (intrinsic rate of increase)

내적자연증가율

$$r_m = \frac{\log_e R_0}{T}$$

○  $\lambda$ (finite rate of increase)

각각의 기간 동안에 원래의 개체군 증가 요인

$$\lambda = e^{r_m}$$

○ DT(doubling time)

개체군 크기가 두 배가 되는 기간

$$DT = \frac{\log_e 2}{r_m}$$

## 6. RCP 8.5 기상시나리오에 따른 기후적응능력 및 발생세대수 평가

### 6-1 기후자료의 수집

기후변화정보센터로부터 한반도 상세 RCP8.5 기후변화 시나리오를 제공받았으며 2010년부터 2100년까지의 지점(76개 종관기상)별 온도자료를 추출하였다. 각 지점별 10년간 평균값을 산출하여 2010년부터 2100년까지 10년 단위로 분석에 이용하였다.

### 6-2 기후적응능력 및 발생세대수 평가

옥수수를 기주로 향온 조건에서의 실내실험을 통해 얻은 기장테두리진딧물의 생명표 통계량 중 내적자연증가율  $r_m$ 과 세대기간  $T$ 를 이용하였다(Table 8). 내적자연증가율과 온도와의 관계는 곤충의 발육모델의 하나인 Lactin-모형(Lactin et al., 1995)을 적용하여 매개변수를 추정하였다.

$$r_m(T) = \exp(aT) - \exp\left[ab - \frac{(b-T)}{c}\right] \quad \text{---- 식 7}$$

위 식에서  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 추정해야 할 매개변수이다. 각 실험온도(15~30°C)로부터 추정된  $r_m$ 의 평균값들을 이용하여 매개변수를 추정하였다.

RCP 8.5 기상시나리오에 따른 기상자료를 이용하여 10년 단위로 기장테두리진딧물의 내적자연증가율 변화를 비교하였다. 이 때 월별 평균온도자료를 이용하여 봄(3~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 분리하여 비교하였다. 서식처 온도와 기장테두리진딧물 최적온도(내적자연증가율이 최대값을 보이는 온도)와의 관계를 분석하여 향후 지구온난화에 따른 기장테두리진딧물의 온도환경에 대한 적응도 양상을 비교하였다. 위에서 추정한 Lactin 모형을 이용하여 최대 내적자연증가율을 나타내는 온도(28.7°C)를 추정하고, 이를 최적온도( $T_{opt}$ )로 간주하였다. 서식처 온도( $T_{hab}$ )와 최적온도의 차이를 나타내는

TSM(thermal safety margin)은 Deutsch et al.(2008)의 정의와 같이 향후 지구온난화에 따른 기장테두리진딧물의 증식률이 계속 증가되는 온도의 범위를 나타내는 지표 값으로 해석하였다(Fig. 5).

년간 발생세대수의 평가는 세대완료율 모형(1/T)을 작성하여 실시하였다. 온도와 세대완료율의 관계를 Lactin 모형(식 7)을 이용하여 적합시켰다. 일별 세대완료율을 누적하여 1.0이 되면 1세대가 완료되는 것으로 간주하였다. 제주 2010 평년온도(30년 평균온도, 1981~2010)를 기준으로 1~3℃까지 1℃ 씩 증가시키면서 발생세대수의 변화를 비교하였다. 기장테두리진딧물 불완전생활형에 적용하였으며 발생세대수 뿐만 아니라 발생초발일(the 1st day of occurrence), 발생종발일(the last day of occurrence) 및 발생기간(active period)을 추정하였다. 발생기간은 발생초발일부터 발생종발일까지 기간으로 정의하였다.

모든 수식의 매개변수는 Table curve(Jandel Scientific, 2002) 프로그램을 이용하여 추정하였다.

## IV. 결 과

### 1. 약충발육, 성충 수명 및 산자수

온도는 기장테두리진딧물 약충의 각 영기 발육에 통계적으로 유의하게 영향을 주었다(Table 1 : 1 instar  $df = 5, 154, F = 309.05, P < 0.0001$ ; 2 instar  $df = 4, 128, F = 596.31, P < 0.0001$ ; 3 instar  $df = 4, 118, F = 273.67, P < 0.0001$ ; 4 instar  $df = 4, 96, F = 140.20, P < 0.0001$ ; Total nymph  $df = 4, 96, F = 493.26, P < 0.0001$ ). 약충 발육기간은 10℃에서 42.9일로 길었고 30℃에서 4.7일로 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 처리온도 35℃의 경우 1령 이후 모두 사망하여 2령부터는 확인할 수 없었으며, 1령 기간을 이용하여 25℃, 30℃와 비교하였을 때 통계적 유의성은 없었지만 30℃ 보다 발육기간이 길었다.

기장테두리진딧물 무시성충 수명(Table 2)은 온도에 따라 통계적으로 유의하게 영향을 받았는데( $df = 4, 74, F = 9.46, P < 0.0001$ ), 15℃부터 감소하여 30℃에서는 4.3일로 가장 짧았다. 처리온도 10℃에서 비정상적으로 수명이 짧았는데, 산자전기간은 다른 온도보다 유의하게 길었다( $df = 4, 74, F = 73.97, P < 0.0001$ ). 이상치를 보이는 10℃의 수명은 성충 노화율 추정에서 제외하였다.

총산자수(Table 2)도 온도에 따라 통계적으로 유의하게 영향을 받았는데( $df = 4, 74, F = 13.00, P < 0.0001$ ), 실험온도 중 20℃에서 38.2 마리로 최대 산자수를 나타냈다. 일일 평균 산자수는 25℃에서 3.4 마리로 최대값을 보였다( $df = 4, 74, F = 20.88, P < 0.0001$ ).

Table 1. Developmental period (Mean  $\pm$  SE) for nymphal stages of *Rhopalosiphum padi* at constant temperatures in the laboratory

Temperature (°C)	Developmental stage									
	n <sup>1</sup>	1st instar	n	2nd instar	n	3th instar	n	4th instar	n	Total
10	21	10.24 $\pm$ 0.48a <sup>2</sup>	17	9.59 $\pm$ 0.32a	14	10.79 $\pm$ 0.55a	8	11.75 $\pm$ 20.6a	8	42.94 $\pm$ 2.06a
15	29	3.88 $\pm$ 0.16b	28	3.79 $\pm$ 0.13b	26	4.19 $\pm$ 0.17b	24	5.40 $\pm$ 0.64b	24	17.25 $\pm$ 0.64b
20	28	2.13 $\pm$ 0.06c	24	2.13 $\pm$ 0.09c	21	2.50 $\pm$ 0.11c	16	2.60 $\pm$ 0.22c	16	9.03 $\pm$ 0.22c
25	30	1.17 $\pm$ 0.04d	30	1.48 $\pm$ 0.05c	28	1.52 $\pm$ 0.12d	24	1.79 $\pm$ 0.16c	24	5.94 $\pm$ 0.16d
30	30	1.03 $\pm$ 0.02d	30	1.03 $\pm$ 0.04d	30	1.17 $\pm$ 0.05d	25	1.44 $\pm$ 0.09c	25	4.68 $\pm$ 0.09d
35	17	1.59 $\pm$ 1.59cd		- <sup>3</sup>		-		-		-

<sup>1</sup> Number of aphids examined.

<sup>2</sup> Means followed by same letters in a column are not significantly different by Tukey's HSD test(GLM) at  $P = 0.05$ : 1th instar (df = 5, 154,  $F = 309.05$ ,  $P < 0.0001$ ); 2nd instar (df = 4, 128,  $F = 596.31$ ,  $P < 0.0001$ ); 3rd instar (df = 4, 118,  $F = 273.67$ ,  $P < 0.0001$ ); 4th instar (df = 4, 96,  $F = 140.20$ ,  $P < 0.0001$ ); Total nymph (df = 4, 96,  $F = 493.26$ ,  $P < 0.0001$ ).

<sup>3</sup> No survived instars.

Table 2. Adult longevity in days and fecundity of *Rhopalosiphum padi* at constant temperatures (Mean  $\pm$  SE)

Temperature		Aperious Adult			
(°C)	n <sup>1</sup>	Pre-reproductive	Longevity	Fecundity	Nymphs/Female/Day
10	7	6.50 $\pm$ 0.91a <sup>2</sup>	11.07 $\pm$ 2.83b	3.86 $\pm$ 1.58c	0.35 $\pm$ 0.05c
15	23	1.46 $\pm$ 0.13b	24.04 $\pm$ 3.46a	24.26 $\pm$ 2.22b	1.01 $\pm$ 0.10c
20	13	0.62 $\pm$ 0.08c	15.58 $\pm$ 2.56ab	38.23 $\pm$ 5.63a	2.45 $\pm$ 0.28b
25	17	0.44 $\pm$ 0.10c	9.32 $\pm$ 1.07bc	31.71 $\pm$ 3.85ab	3.40 $\pm$ 0.39a
30	15	0.83 $\pm$ 0.12bc	4.30 $\pm$ 0.38c	11.33 $\pm$ 1.40b	2.64 $\pm$ 0.27ab

<sup>1</sup> Number of aphids examined.

<sup>2</sup> Means followed by same letters in a column are not significantly different by Tukey's HSD test (GLM) at  $p = 0.05$ : Pre-reproductive (df = 4, 74,  $F = 73.97$ ,  $P < 0.0001$ ), Longevity (df = 4, 74,  $F = 9.46$ ,  $P < 0.0001$ ), Fecundity (df = 4, 74,  $F = 13.00$ ,  $P < 0.0001$ ), Nymphs/Female/Day (df = 4, 74,  $F = 20.88$ ,  $P < 0.0001$ ).



## 2. 약충 온도발육 모형

기장테두리진딧물의 발육영점온도와 발육완료에 필요한 적산온도(선형모형)를 추정한 결과 전기약충 8.4℃와 44.3DD, 후기약충 8.2℃와 57.2DD이었으며, 약충 전체기간은 8.3℃, 101.6DD로 나타났다. 결정계수( $R^2$ )는 모두 0.99로 직선회귀식에 의하여 잘 설명되었다(Table 3). 기존 보고자료의 약충발육기간을 종합하여 추정한 결과 발육영점온도는 7.1℃, 유효적산온도는 94.3DD이었다.

기장테두리진딧물의 전기약충, 후기약충, 약충 전체기간의 온도별 발육모형(Lactin 2 model)의 추정된 매개변수 값은 Table 4와 같았다. 고온 임계(치사)온도를 나타내는 매개변수 ( $T_{max}$ ) 값은 36~38℃ 범위에 있었다. 약충의 발육률은 15℃부터 30℃까지 거의 선형적으로 증가하였으며, 그 이상에서는 고온 저해가 반영되어 비선형적으로 급격히 감소하였다(Fig. 1). 결정계수가 모두 0.99로 기장테두리진딧물 약충 발육률은 선택된 비선형 모형식으로 잘 설명되었으며 통계적으로 유의하다(전기약충  $df = 3, 2; F = 1,461.37; P = 0.00068; R^2 = 0.99$ , 후기약충  $df = 3, 2; F = 498.95; P = 0.00200; R^2 = 0.99$ , 전체약충  $df = 3, 2; F = 575.45; P = 0.00174; R^2 = 0.99$ ). 기존보고 자료를 종합하여 제시한 발육모형은 본 연구결과와 경향성은 유사하였으나 다소 차이가 있었다(Fig. 1D).

약충발육기간의 분포모형의 매개변수 추정값과 형태는 Table 5과 Fig. 2와 같았다. 약충의 발육이 완료되는 누적빈도 분포가 Weibull 함수에 잘 적합되었다. 즉, 결정계수( $R^2$ )가 0.92~0.93로 변이의 90% 이상을 설명하였다.

Table 3. Estimated parameters of a linear regression model for nymphal and total immature stages of *Rhopalosiphum padi*

Stage	Regression			Lower developmental threshold (°C)	Thermal constant (DD)
	Equation ( $y = ax + b$ ; $y =$ development rate, $x =$ Temperature)	df	R <sup>2</sup>		
Small nymph <sup>1</sup>	$y = 0.02256x - 0.18952$	4	0.99	8.4	44.3
Large nymph <sup>2</sup>	$y = 0.01749x - 0.14266$	4	0.99	8.2	57.2
Total <sup>3</sup>	$y = 0.00984x - 0.08200$	4	0.99	8.3	101.6
Nymph based on previous reports <sup>4</sup>	$y = 0.01061x - 0.07483$	25	0.88	7.1	94.3

<sup>1</sup>1st to 2nd instar (df = 1, 3;  $F = 328.43$ ;  $P = 0.00037$ ); <sup>2</sup>3rd to 4th instar (df = 1, 3;  $F = 533.06$ ;  $P = 0.00018$ ); <sup>3</sup>Total nymph (df = 1, 3;  $F = 548.48$ ;  $P = 0.00017$ ); <sup>4</sup>Nymph based on previous reports (df = 1, 25;  $F = 154.67$ ;  $P < 0.00001$ ).

Table 4. Estimated parameter values( $\pm$  SEM) for nymphal development model of *Rhopalosiphum padi*

Stage	$\rho$	$T_{max}$	$\Delta$	$\lambda$	R <sup>2</sup>
Small nymphs <sup>1</sup>	0.1515 $\pm$ 0.02200	37.1151 $\pm$ 1.83484	6.5675 $\pm$ 0.93288	-0.0416 $\pm$ 0.03579	0.99
Large nymphs <sup>2</sup>	0.1418 $\pm$ 0.03522	37.2492 $\pm$ 3.03780	7.0091 $\pm$ 1.69791	-0.0497 $\pm$ 0.05655	0.99
Total <sup>3</sup>	0.1551 $\pm$ 0.02906	36.4219 $\pm$ 2.12118	6.4342 $\pm$ 1.19414	-0.0175 $\pm$ 0.02149	0.99
Nymph based on previous reports <sup>4</sup>	0.1526 $\pm$ 0.03273	33.7778 $\pm$ 1.48353	6.5298 $\pm$ 1.37861	-0.0109 $\pm$ 0.03329	0.88

<sup>1</sup>1st to 2nd instars (df = 3, 2;  $F = 1,461.37$ ;  $P = 0.00068$ ); <sup>2</sup>3rd to 4th instars (df = 3, 2;  $F = 498.95$ ;  $P = 0.00200$ ); <sup>3</sup>Total nymphs (df = 3, 2;  $F = 575.45$ ;  $P = 0.00174$ ); <sup>4</sup>Nymph based on previous reports (df = 3, 27;  $F = 67.64$ ;  $P < 0.00001$ ).

Four-parameter model (Lactin-2) suggested by Lactin et al. (1995) was applied (Equation 2):  $T_{max}$  is a thermal maximum (i.e. the "lethal" temperature at which life processes can no longer be maintained for a prolonged period),  $\Delta$  is the temperature range over which 'hermal breakdown' becomes the overriding influence, and  $\rho$  can be interpreted as a composite value for critical enzyme-catalysed biochemical reactions and  $\lambda$  allows the curve to intersect the abscissa at suboptimal temperatures.

Table 5. Estimated parameter values( $\pm$  SEM) for nymphal distribution model of development time of *Rhopalosiphum padi*

Parameter	Small nymphs <sup>1</sup>	Large nymphs <sup>2</sup>	Total <sup>3</sup>
$\alpha$	1.0429 $\pm$ 0.01012	1.0622 $\pm$ 0.01317	1.0165 $\pm$ 0.00667
$\beta$	7.0723 $\pm$ 0.66347	5.1969 $\pm$ 0.49997	7.7416 $\pm$ 0.64653
R <sup>2</sup>	0.92	0.92	0.93

<sup>1</sup>1st to 2nd instars (df = 1, 32;  $F = 667.89$ ;  $P < 0.01$ ); <sup>2</sup>3rd to 4th instars (df = 1, 34;  $F = 407.03$ ;  $P < 0.01$ ); <sup>3</sup>Total nymphs (df = 1, 36;  $F = 503.26$ ;  $P < 0.01$ ).

Two-parameter Weibull function (Weibull 1951; Wagner et al., 1984) was applied (Equation 3):  $\alpha$  and  $\beta$  are parameters to be estimated.

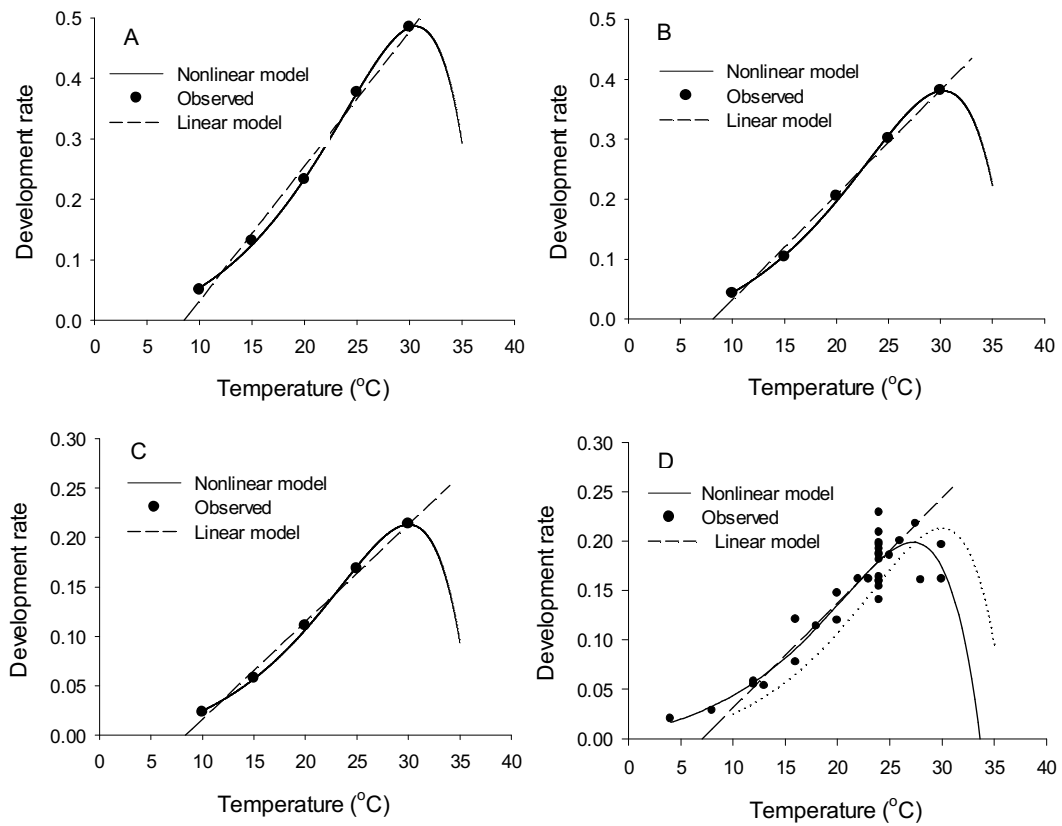


Fig. 1. Developmental rate (1/days) curve for each developmental stage of *Rhopalosiphum padi* at constant temperatures. A = small nymph (1+2 instar), B = large nymph (3+4 instar), C = nymph (all instar), and D = nymph (previous reports combined, see Table 4 for details). The dotted line on D is same with the estimated line on C, and was provided for the purpose of comparison with estimated lines using previously published data.

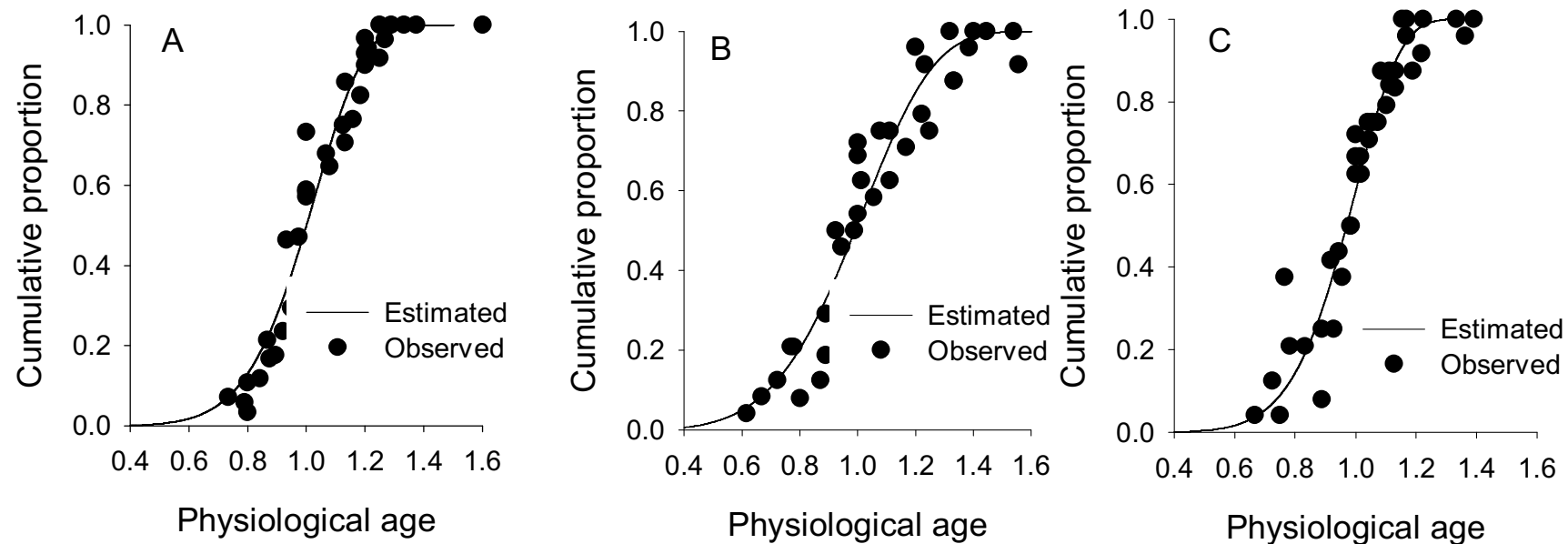


Fig. 2. Cumulative proportions for the development completion time of *Rhopalosiphum padi* nymphs as a function of the physiological ages. A = small nymph (1+2 instar), B = large nymph (3+4 instar), and C = nymph (all instar).

### 3. 성충 산자모형

무시성충노화율, 온도의존적 총 산자수, 연령별 누적산자율, 연령별 생존율 모형의 매개변수는 Table 6, 추정된 곡선은 Fig.3에 제시되었다. 성충 노화율은 온도에 따라서 지수함수적으로 증가하였는데 Eyring 모형에 잘 적합 되었다( $df = 1, 2, F = 36.175, P = 0.02655; R^2 = 0.95$ ). 온도별 총산자수 모형에서 최대 산자수는 39.3 ( $\omega$ )이었는데, 온도 19.7°C ( $\epsilon$ )에서 나타났으며 통계적으로 유의하였다( $df = 2, 2, F = 29.2535, P = 0.03305, R^2 = 0.97$ ). 연령별 누적산자율은 Weibull 모형에 적합 되었으며 통계적으로 유의하였다( $df = 1, 65, F = 391.545, P < 0.0001$ ). 온도별 변이가 표준화된 생리적 연령을 적용함으로써 효과적으로 수렴되었다( $R^2 = 0.85$ ). 생리적 연령에 따른 생존율 곡선(연령별 생존율)은 사망률이 처음에는 낮다가 급격히 증가하여 후기 연령에서는 다시 감소하는 양상을 보였다. 실측 생존율 자료는 시그모이드 모형에 잘 적합 되었으며 통계적으로 유의하였다( $df = 1, 56, F = 717.374, P < 0.0001, R^2 = 0.93$ ).

Table 6. Estimated parameter values for the adult aging rate, temperature-dependent total fecundity, age-specific oviposition rate, and age-specific survival rate of *Rhopalosiphum padi*

Models	Parameters	Estimated	SEM	R <sup>2</sup>
Adult aging rate <sup>1</sup> (1/longevity)	<i>a</i>	0.0463	0.03152	0.95
	<i>b</i>	54.8705	18.78855	
Temperature-dependent total fecundity <sup>2</sup>	<i>ω</i>	39.3439	3.33071	0.97
	<i>ε</i>	19.7455	0.55146	
	<i>κ</i>	5.6453	0.66352	
Age-specific cumulative oviposition rate <sup>3</sup>	<i>α</i>	1.3087	0.03563	0.85
	<i>β</i>	2.3911	0.21186	
Age-specific survival rate <sup>4</sup>	<i>γ</i>	0.9496	0.01904	0.93
	<i>δ</i>	-0.2841	0.02139	

<sup>1</sup>Adult aging rate (df = 1, 2,  $F = 36.175$ ,  $P = 0.02655$ ), E(Equation 4): *a* and *b* are parameters to be estimated; <sup>2</sup>Temperature-dependent total fecundity (df = 2, 2,  $F = 29.2535$ ,  $P = 0.03305$ ), (Equation 5): *ω* is the maximum reproductive capacity, *ε* is the temperature (°C) at which the maximum reproduction occurs and *κ* is the parameter that controls the width of the curve; <sup>3</sup>Age-specific cumulative oviposition rate (df = 1, 65,  $F = 391.545$ ,  $P < 0.0001$ ), (Equation 3), *α* and *β* are parameters to be estimated; <sup>4</sup>Age-specific survival rate (df = 1, 56,  $F = 717.374$ ,  $P < 0.0001$ ), (Equation 6): *γ* is physiological age at 50% survival and *δ* is parameter to be estimated.



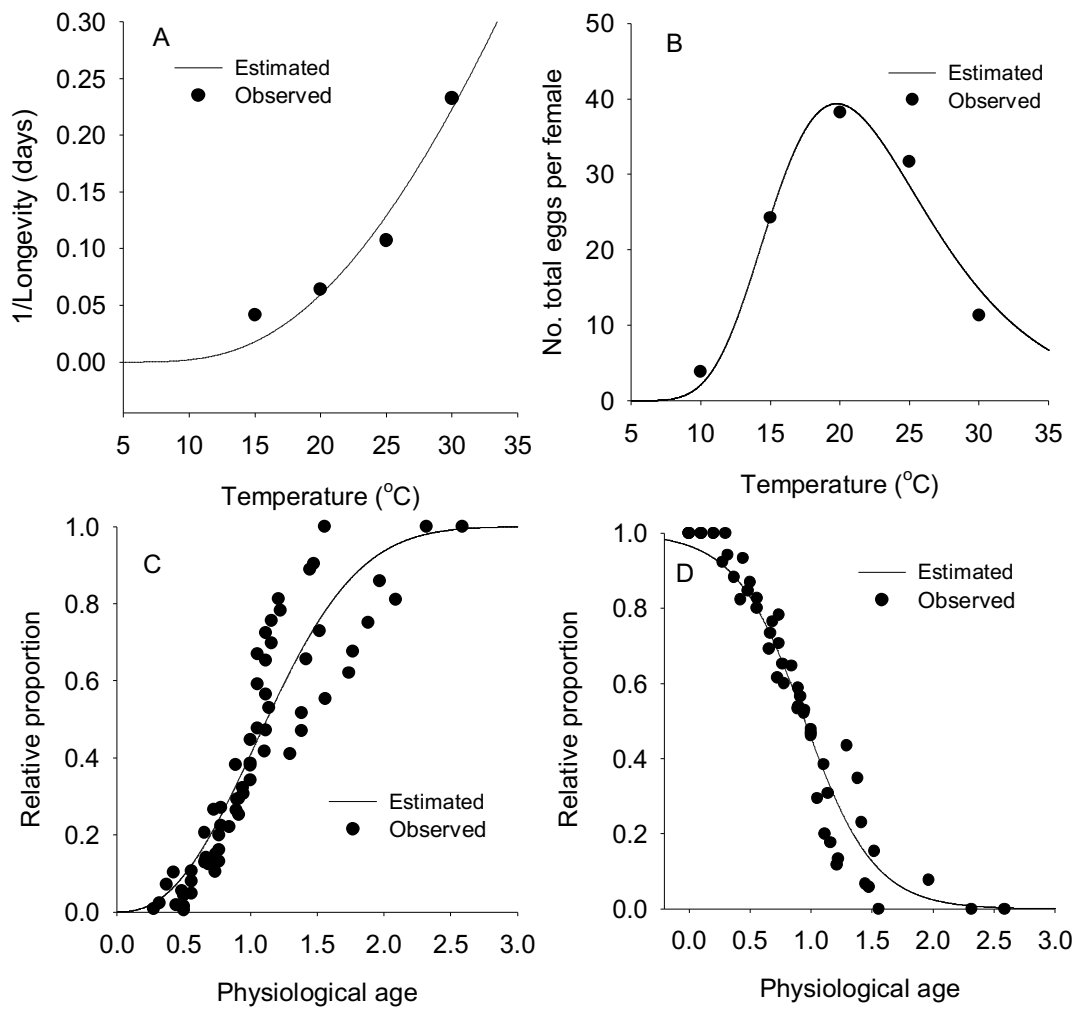


Fig. 3. Component models for oviposition model of *Rhopalosiphum padi*, A = adult aging rate, B = temperature-dependent total fecundity, C = age-specific cumulative oviposition rate, and D = age-specific survival rate.

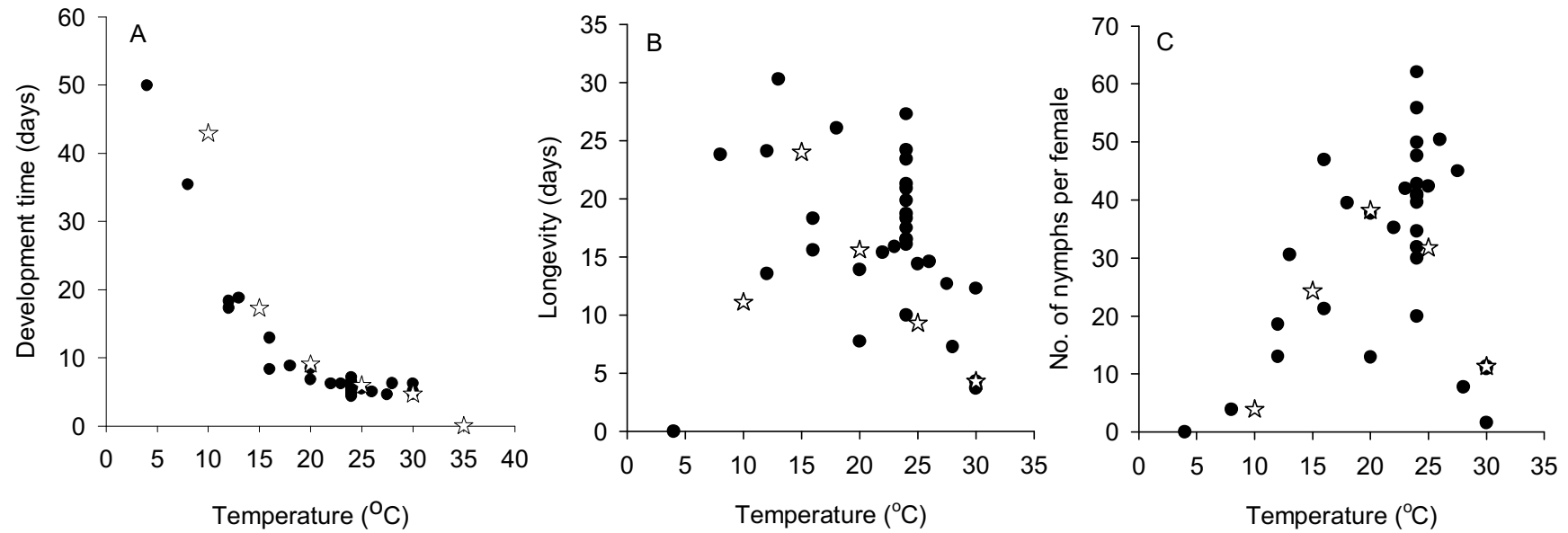


Fig. 4. A = Immature development time, B = apterous longevity , C = fecundity of *Rhopalosiphum padi* in the previous reports comparing with present study. The symbols of star and solid circle indicate the results based on present study and previous reports, respectively.

Table 7. Temperature-dependent development data of *Rhopalosiphum padi* and source references in previous studies

Temperature (°C)	Developmental period of nymphs	Adult longevity	Adult fecundity	Host plant	Country	Reference
4	49.9	- <sup>1</sup>	-	Barley	Germany	Sengonca et al. (1994)
8	35.4	23.8	7.8	Barley	Germany	Sengonca et al. (1994)
12	17.3	13.6	13.0	Signal grass	Brazil	Auad et al. (2009)
12	18.3	24.1	18.6	Barley	Germany	Sengonca et al. (1994)
13	18.8	30.3	30.5	Barley	United States	Villanueva and Strong (1964)
16	12.9	15.6	21.2	Signal grass	Brazil	Auad et al. (2009)
16	8.3	18.3	46.9	Barley	Germany	Sengonca et al. (1994)
18	8.8	26.1	39.5	Corn	Spain	Asin and Pons (2001)
20	8.4	7.7	12.9	Signal grass	Brazil	Auad et al. (2009)
20	6.8	13.9	37.7	Barley	Germany	Sengonca et al. (1994)
22	6.2	15.4	35.2	Corn	Spain	Asin and Pons (2001)
23	6.2	15.9	42.0	Barley	United States	Villanueva and Strong (1964)
24	7.1	10.0	20.0	Signal grass	Brazil	Auad et al. (2009)
24	6.3	20.9	41.0	Barley	Chile	Descamps and Chopa (2011)
24	6.1	16.5	31.8	Barley	Chile	Descamps and Chopa (2011)
24	5.1	16.6	39.6	Wheat	Chile	Descamps and Chopa (2011)
24	6.3	21.3	30.0	Wheat rye	Chile	Descamps and Chopa (2011)

24	5.4	18.3	31.9	Oat	Chile	Descamps and Chopra (2011)
24	6.5	18.7	34.6	Rye	Chile	Descamps and Chopra (2011)
24	4.4	27.3	62.1	Wheat ('Niknezhad')	Iran	Taheri et al. (2010)
24	5.1	23.4	49.9	Wheat ('Ghods')	Iran	Taheri et al. (2010)
24	5.4	17.5	42.8	Wheat ('Chamran')	Iran	Taheri et al. (2010)
24	4.8	24.2	55.8	Wheat ('Shiraz')	Iran	Taheri et al. (2010)
24	5.2	19.9	47.6	Wheat ('Marvdasht')	Iran	Taheri et al. (2010)
24	5.5	16.1	40.7	Wheat ('Darab 2')	Iran	Taheri et al. (2010)
25	5.4	14.4	42.4	Corn	Spain	Asin and Pons (2001)
26	5.0	14.6	50.4	Barley	United States	Villanueva and Strong (1964)
27.5	4.6	12.7	45.0	Corn	Spain	Asin and Pons (2001)
28	6.2	7.3	7.8	Signal grass	Brazil	Auad et al. (2009)
30	5.1	3.7	10.9	Barley	United States	Villanueva and Strong (1964)
30	6.2	12.3	1.6	Corn	Spain	Asin and Pons (2001)
32	-	-	-	Signal grass	Brazil	Auad et al. (2009)

<sup>1</sup> No survived

#### 4. 생명표 통계량 추정

Table 8은 기장테두리진딧물의 15℃에서 30℃까지의 온도별 생명표 통계량 값을 보여주고 있다. 총 증가율(GRR)은 25℃에서 가장 높게 나타났으며 세대증가율( $R_0$ )은 20℃에서 가장 높게 나타났다. 내적자연증가율( $r_m$ )과 기간증가율( $\lambda$ )은 15℃에서 30℃까지 온도가 상승 할수록 높아지는 경향을 보였으며 개체군 배가기간( $Dt$ )과 평균세대기간( $T$ )는 온도가 증가할수록 짧아지는 것으로 나타났다.

Table 8. The estimated values for the life table statistic of *Rhopalosiphum padi*

Temperature (°C)	$GRR(j)$	$Ro(j)$	$T(j)$	$r_m(j)$	$\lambda(j)$	$DT(j)$
15°C	18.5 ± 3.49a <sup>1</sup>	11.89 ± 1.84a	27.61 ± 1.24a	0.0902 ± 0.0019a	1.0944 ± 0.0021a	7.68 ± 0.16a
20°C	49.4 ± 7.11b	31.86 ± 4.69b	17.00 ± 0.99b	0.2039 ± 0.0090b	1.2261 ± 0.0111b	3.39 ± 0.15b
25°C	60.0 ± 12.44b	25.15 ± 9.39b	10.96 ± 0.52c	0.2945 ± 0.0136c	1.3423 ± 0.0183c	2.35 ± 0.11c
30°C	14.6 ± 2.59a	9.39 ± 1.15a	7.50 ± 0.23c	0.2997 ± 0.0153c	1.3493 ± 0.0206c	2.31 ± 0.12c

$GRR$  is the gross reproductive rate,  $Ro$  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.

<sup>1</sup>Means followed by same letters in a column are not significantly different by Tukey's HSD test(GLM) at  $p=0.05$ :  $GRR$  (df = 3, 63,  $F = 9.37$ ,  $P < 0.0001$ ),  $Ro$  (df = 3, 63,  $F = 14.21$ ,  $P < 0.0001$ ),  $T$  (df = 3, 63,  $F = 98.06$ ,  $P < 0.0001$ ),  $r_m$  (df = 3, 63,  $F = 103.29$ ,  $P < 0.0001$ ),  $\lambda$  (df = 3, 63,  $F = 86.36$ ,  $P < 0.0001$ ),  $DT$  (df = 3, 63,  $F = 368.35$ ,  $P < 0.0001$ ).

## 5. RCP 8.5 기상시나리오에 따른 기후적응능력 및 발생세대수 평가

기장테두리진딧물 내적자연증가율과 온도와의 관계는 Fig. 5과 같이 온도증가에 따라 서서히 증가하다가 28.7℃에서 최고점을 보인 다음 그 후 급격히 감소하였다. 각 추정된 매개변수 값은  $a = 0.1583$ ,  $b = 34.9858$ ,  $c = 6.2946$  로 추정되었다. 일별 세대완료율을 적산하여 구한 연간 잠재적 발생세대수는 16.2세대였다.

2010년 평년 기준 기장테두리진딧물의 계절별 TSM 값의 변화는 Table 9와 같았다. 국내 4개 지역(대표지역만 제시함)의 계절별 TSM은 봄철 15.3~22.6℃, 여름철 4.0~10.5℃, 가을철 10.3~20.4℃의 여유 폭을 보였다. 겨울철의 TSM 값은 크게 나타났다.

RCP 8.5에 따른 기장테두리진딧물 내적자연증가율은 2090년까지는 현재보다 지속적으로 증가하는 모습을 보였으나, 그 후 대관령을 제외한 지역에서는 2100년에서 다소 감소하는 경향을 나타내었고 현재수준(2010년 기준)보다 전체적으로 높은 것으로 나타났다.

불완전생활형을 기준으로 볼 때, 기장테두리진딧물의 첫 세대 발생시기는 평년 111일(Julian Date)에서 온도가 1, 2, 3 ℃ 증가 시 각각 102, 82, 66로 앞당겨지는 것으로 나타났으며, 그에 따라 연간 발생세대수는 온도가 1, 2, 3 ℃ 증가 시 평년 16.2 세대에서 각각 18.1, 20.3, 22.5 세대로 크게 증가하는 것으로 나타났다 (Table 10).

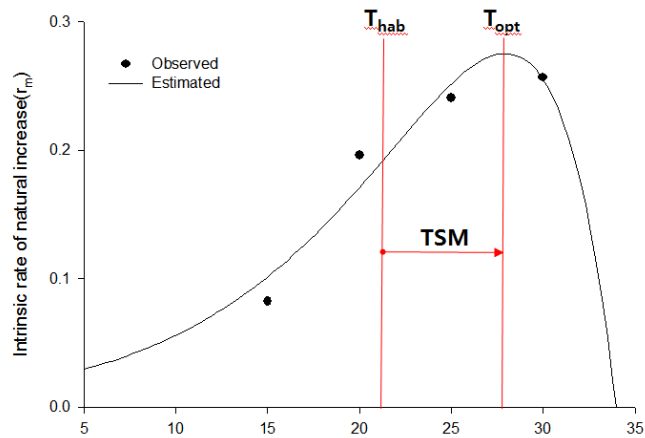


Fig. 5. The relationship between temperature and intrinsic rate of natural increase ( $r_m$ ) of *Rhopalosiphum padi*. Estimated curve is based on the parameters of Lactin model (Lactin et al., 1995). TSM (thermal safety margin) indicates the difference between habitat temperature ( $T_{hab}$ ) and optimal temperature ( $T_{opt}$ ).



Table 9. The changes of TSM values of *Rhopalosiphum padi*

RCP 8.5 senario		Jeju	Haenam	Cheongju	Daegwallyeong
2010	Spring	15.3	16.7	16.2	22.6
	Summer	4.8	5.1	4.0	10.5
	Fall	10.3	12.4	14.3	20.4
2020	Spring	15.6	17.0	16.3	22.0
	Summer	4.4	4.4	3.4	9.8
	Fall	11.0	13.1	13.9	19.6
2030	Spring	14.9	16.2	15.5	21.0
	Summer	3.8	3.8	3.0	9.3
	Fall	10.6	12.7	13.6	19.0
2040	Spring	15.0	16.3	15.7	21.2
	Summer	3.1	3.0	2.3	8.6
	Fall	10.2	12.2	13.1	18.7
2050	Spring	14.3	15.5	14.8	20.3
	Summer	2.4	2.2	1.5	7.9
	Fall	9.1	11.1	12.3	17.9
2060	Spring	17.2	19.4	20.0	25.1
	Summer	5.0	5.0	4.0	10.1
	Fall	4.0	5.0	5.2	11.4
2070	Spring	12.7	14.2	13.7	19.0
	Summer	1.3	1.2	0.7	6.5
	Fall	8.3	10.2	11.3	16.9
2080	Spring	12.3	13.7	13.0	18.1
	Summer	0.7	0.4	-0.2	5.9
	Fall	7.7	9.6	10.7	16.3
2090	Spring	12.0	13.3	12.5	17.6
	Summer	0.1	-0.2	-0.9	5.4
	Fall	7.0	8.7	9.7	15.5
2100	Spring	11.3	12.8	12.3	17.4
	Summer	-0.5	-0.6	-1.6	4.6
	Fall	6.4	8.6	10.1	15.1

Table 10. The number of generation and active period of *Rhopalosiphum padi* in relation to climate changes in Jeju

Climate change	The first occurrence date	The last occurrence date	Active period	Number of generation
30 yr average	April 21	Dec 13	237	16.2
1°C rise	April 12	Dec 26	259	18.1
2°C rise	March 23	- <sup>1</sup>	284	20.3
3°C rise	March 7	-	300	22.5

<sup>1</sup> Annual occurrence

## V. 고 찰

기장테두리진딧물은 저온성 진딧물로 알려져 있는데 본 연구의 실험 온도범위 중 하한인 10℃에서 약충이 성공적으로 발육하고 산자도 가능하였다. Villanueva and Strong (1964)은 발육 하한과 상한을 각각 8.0℃와 27.0℃, Elliotta and Kieckhefer(1989)는 각각 5.78℃와 25.09℃로 보고한 바 있다. 본 연구에서 발육 영점온도가 8.3℃로 추정되었는데 전자의 보고와 유사하였다. 하지만, Sengonca et al. (1994)는 저온인 4℃에서 약충의 발육(약충발육기간 49.9일)이 완료될 수 있음을 보여주고 있어(Table 7) 실제 생리적인 발육영점온도는 더 낮을 수도 있을 것으로 보이며, 연구자에 따라 기장테두리진딧물의 발육기간의 변이가 심한 것으로 볼 때 지역 개체군의 특성에 따라 차이가 발생할 수 있다는 것을 완전히 배제하기는 어려워 보인다. 기장테두리진딧물의 발육상한온도는 25.09℃ 또는 27.0℃로 제시되었는데, Table 7의 자료를 통하여 볼 때 이 보다는 훨씬 높을 것으로 판단된다. 본 연구에서 고온인 35℃에서 1령까지만 생존하였으며, Auad et al. (2009) 실험의 32℃ 처리구에서 2령기에 모두 사망하고 30℃에서 산자수가 급격히 감소하는 것으로 보아 기장테두리진딧물은 30℃ 이상 고온에서는 적응력이 많이 떨어지는 것으로 추정된다. 본 연구에서 1령 기간은 35℃에서 30℃보다 길게 나타났는데, 고온에 따른 발육의 저해로 보이고, 따라서 고온영역에서 발육률이 감소되는 부분을 반영할 수 있는 발육 모형식을 선택하였다. 선택한 모형(Logan-2)을 통하여 장기간 생존을 지속할 수 없는 온도로 정의(Lactin et al., 1995)되는 약충의 고온치사온도는 36.4℃( $T_{max}$ )로 추정되었다. 약충 발육기간 중 20℃ 이하에서는 기존 다른 연구자의 결과보다 본 실험의 결과가 다소 길게 나타났으며, 그 이상 고온에서는 크게 다르지 않았다. 전체적으로 온도에 따른 약충발육 기간의 경향성은 뚜렷하였고(Fig. 1A~D), 전체 약충기간의 발육을 곡선은 기존 보고 자료와 비교하여 다소 우측(고온영역)으로 치우치는 경향을 보였다(Fig. 1D). 이 형태로만 판단하면 제주 개체군은 저온보다는 고온에 좀 더 적응력을 보이는 것으로 보인다. 무시성충의 수명은 본 연구결과를 비롯하여 기존연구의 지역(연구자)과 기주식물에 따라 매우 변이가 심하였다. 특히, 밀의 품종별

발육평가를 위하여 24℃에서 실시한 Taheri et al. (2010)의 결과는 다른 결과보다 훨씬 더 수명이 길었고 품종별(감수성과 저항성 품종) 차이도 컸다. 고온에서 발육평가를 실시한 Asin and Pons (2001)의 결과는 대체적으로 평균 경향치보다 위쪽에 분포하였고, 반면 저온에서 발육평가를 실시하고자 수행한 Sengonca et al. (1994)의 결과는 아래쪽에 위치하였다(Fig. 4B). 본 연구결과의 기장테두리진딧물 수명은 Sengonca et al.(1994)와 Asin and Pons(2001) 결과의 사이에 위치하였다. 다만, 10℃에서 비정상적으로 짧은 수명을 나타냈다. 곤충의 수명은 저온에서 증가하는 것이 일반적이므로(Kim and Lee, 2003; Kang et al., 2015; Choi and Kim, 2016) 본 결과를 논리적으로 이해하는 데는 무리가 있다. 다만, 기존보고에서도 기장테두리진딧물 무시성충 수명이 저온에서 상대적으로 감소하는 경향을 보여주고 있고(see Table 7; Sengonca et al., 1994; Auad et al., 2009), 모든 온도에서 동일한 사망기준을 적용했으므로(재료 및 방법 참조) 실험상 오류가 크게 작용한 것으로는 보이지 않는다. 진딧물류는 고온에 직면했을 때 이에 저항하기 위하여 섭취한 에너지를 과도하게 소모하기 때문에 발육과 생식과 같은 생명현상이 저해를 받을 수 있는 것으로 보고되었는데(Reviewed in Ma et al., 2015), 저온에 직면되었을 때도 비슷한 기작이 일어나고 있는 것으로 보이며 지금까지 보고된 자료에 의하면, 진딧물류는 저온에 직면했을 때 빠르게 저온순화(cold acclimation) 반응(Powell and Bale, 2005)을 보이는 동시에 저온은 진딧물에 아치사효과(sub-lethal)를 유발하여 수명을 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Reviewed in Bale et al. 2007). 또한 곤충은 온도가 하강함에 따라 비행(fly) → 보행(walk) → 저온혼수(chill coma) → 냉각수축(cold shock) → 결빙회피(freeze avoidance(supercool, 과냉각)) → 결빙방어(freeze tolerance) 등 단계적으로 반응하는데(Lee, 1991), 저온혼수 또는 냉각수축 상태에 있을 때 붓으로 접촉해도 움직이지 않아 사망한 것으로 판단하여 수명이 과소평가 되었을 수도 있다. 곤충의 발육은 기주식물, 실험환경과 방법, 지역개체군의 유전적 특성 등 다양한 요인에 따라 다른 반응이 나타날 수 있으므로 10℃에서의 결과를 정확하게 해석하기는 어려워 보인다. 아직까지 저온에 대한 기장테두리진딧물의 반응이 정확히 구명되지 않았기 때문에 본 연구에서는 이상치를 보이는 10℃ 자료를 성충노화를 곡선 추정시 제외시켰다. 온도별 무시성충의 산자수 비교자료는 Table 7

과 Fig. 4C와 같았다. 성충수명 결과에서 나타난 것처럼 Taheri et al. (2010)의 결과는 타 연구와 비교하여 경향성에서 벗어난 높은 산자수를 나타냈다. 반면, Auad et al. (2009)의 결과는 산자수가 훨씬 낮은 경향을 보였다. 본 연구의 결과는 기존연구결과들과 비교했을 때 전체적으로 중간 부분의 범위에 위치하였다 (Fig. 4C). 기장테두리진딧물의 온도발육 특성에 대한 연구는 여러 나라에서 다양한 연구자가 수행하여 활용 가능한 자료가 존재하지만(Table 7), 본 연구는 10~35℃까지 동시에 넓은 온도범위에서 실시하였기 때문에 비교 자료로써 가치가 있다고 생각된다.

본 연구에서는 전체 약충 발육모형뿐만 아니라 전기약충(1~2령)과 후기약충(3~4령)을 구분하여 제시하고, 기존 발표된 자료를 종합한 전체 약충 발육모형을 제공하였으며 무시성충 산자모형 작성에 필요한 온도별 총산자수, 연령별 산자율, 연령별 생존율 모형을 작성하고, 성충의 생리적 연령 계산에 필요한 성충 노화율 (aging rate; 1/수명) 모형도 제시하여 기장테두리진딧물 무시충 개체군 모형에 필요한 기본적인 단위모형들을 모두 제공하였다.

본 연구결과를 바탕으로 기존 연구결과를 종합하여 개체군 모형 작성에 필수적인 온도발육모형의 제시는 이 분야에서 진전된 결과로 판단된다. 기존연구 자료와 비교하여 본 결과의 자료는 중위값의 위치에 있기 때문에 각 추정된 단위모형들은 기장테두리진딧물의 생물적 특성을 대표할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 사용자에게 따라 적당한 모형을 선택하여 발육단계전이 모형(Kim et al., 2001)에 사용할 수 있을 것이다.

또한 본 연구에서는 생명표를 작성하여 RCP 8.5 기상시나리오 하에서 기장테두리진딧물의 기후적응능력 및 발생세대수에 대한 평가를 실시하였다.

생명표 통계량의 내적자연증가율 ( $r_m$ )을 이용하여 기장테두리진딧물의 기후변화 적응능력을 추정했을 때 향후 RCP 8.5에 따른 국내기상환경에서 기장테두리진딧물의 증식률은 강원도 일부지역을 제외하고는 2090년까지 지속적으로 증가하였고, 그 후 2100년에는 약간 감소하는 경향을 보였으나 현재 수준보다는 높은 것으로 나타났다. 즉, 기장테두리진딧물은 온난화에 따라서 개체군이 증가하는 것으로 추정되었으며, 서식처 온도와 비교한 TSM 지표 값도 대부분 연도에서 양수 값을 보여 향후 온도가 높아짐에 따라 현재보다 높은 번식력을 발휘할 것

으로 예상되었다.

생명표 통계량 중 세대기간 (T)를 이용하여 향후 온도 변화에 따른 발생세대수를 추정된 결과 온도가 높아짐에 따라 연중 발생시기가 빨라지는 것으로 나타났으며 발생세대수 또한 점차 증가하는 것으로 나타났다.

내적자연증가율과 세대기간을 기준으로 기장테두리진딧물의 기후변화에 따른 발생양상을 종합적으로 평가한 결과, 앞으로 온난화에 따라서 기장테두리진딧물의 개체군은 일부 지역을 제외하곤 계속해서 증가할 것으로 예측되었으며 특히 봄과 가을철의 발생위험도가 크게 증가할 것으로 추정된다.

기장테두리진딧물은 제주지역에서는 귀리에 대한(Song et al., 2000) 피해 보고만이 있었으나 밀, 보리, 옥수수 등 주요 식량작물을 가해하고, 바이러스를 매개할 수 있는 중요한 해충이다. 본 연구의 결과는 기후변화에 따른 발생동태 및 생태적 변화의 예측과 대응방안 마련 등 다양한 방법으로 이용 가능할 것으로 생각된다.

## VI. 적 요

기장테두리진딧물의 온도의존적 발육과 산자(산란) 특성을 구명하기 위하여 6개의 항온조건(10, 15, 20, 25, 30, 35±1.0℃, RH 50~70%, 16L:8D)에서 실험을 실시하였다. 약충의 발육기간은 10℃에서 42.9일과 30℃에서 4.7일로 온도가 증가할수록 발육기간이 감소하였다. 약충은 35℃에서 2령기이후 성충까지 발육하지 못하였다. 선형모형 결과 약충의 발육영점온도는 8.3℃, 발육 유효적산온도는 101.6DD 이었다. 약충 발육율과 온도와의 관계는 비선형 Lactin 2 식으로 잘 설명되었다. 약충 발육기간의 분포는 Weibull 함수를 이용하여 분석하였다. 성충 수명은 온도가 증가함에 따라 감소하였는데, 15℃에서 24.0일, 30℃에서 4.3일의 범위에 있었고, 10℃에서 비정상적으로 수명이 짧았다 (11.1일). 총산자수는 20℃에서 38.2마리로 최대값을 보였고, 10℃에서 3.4마리로 최소값을 나타냈다. 본 실험의 결과를 통하여 무시 성충의 산자모형을 작성할 수 있는 온도별 총산자수 모형, 연령별 누적생존율 모형, 연령별 누적 산자율 모형 및 생리적 연령 계산을 위한 성충 노화율 모형을 제시하였다.

또한 생명표를 작성하고 RCP 8.5 기상시나리오에 따라 우리나라에서 기장테두리진딧물의 기후적응능력과 발생세대수를 평가하였다. 내적자연증가율( $r_m$ )이 최대일 때 온도를 최적온도( $T_{opt}$ )로 간주하였으며, 서식처 온도( $T_{hab}$ )와의 차이를 TSM(thermal safety margin)으로 정의하였다. TSM은 온도증가에 따라 증가율 증가 허용범위를 나타내는 지수로써 기장테두리진딧물은 RCP 8.5 기상 시나리오에 따라 2100년까지 계속 증가하는 것으로 나타났다. 세대기간 완료율 곡선( $1/T$ )을 추정하여 발생시기와 발생세대수를 추정한 결과 온도가 높아짐에 따라 연중 발생시기가 빨라지는 것으로 나타났으며 발생세대수 또한 점차 증가하는 것으로 나타났다. 결론적으로 우리나라 환경에서 기장테두리진딧물은 지구온난화에 따라 일부 지역을 제외하곤 계속해서 증가할 것으로 예측되었으며, 특히 봄과 가을철의 발생위험도가 크게 증가할 것으로 추정되었다.

## 인 용 문 헌

- Asin, L., Pons, X., 2001. Effect of high temperature on the growth and reproduction of corn aphids (Homoptera: Aphididae) and implications for their population dynamics on the northeastern Iberian peninsula. *Environ. Entomol.* 30, 1127-1134.
- Auad, A.M., Alves, S.O., Carvalho, C.A., Silva, D.M., Resende, T.T., Veríssimo, B.A., 2009. The impact of temperature on biological aspects and life table of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera:Aphidiade) fed with signal grass. *Fla. Entomol.* 92, 568-576.
- Bale, J.S., Ponder, K.L., Pritchard, J., 2007. Coping with stress, pp. 287-309. In: H.F. Van Emden, R. Harrington (Eds.), *Aphids as crop pests*. CAB International, Wallingford, UK.
- Blackman, R.L., Eastop, V.F., 1985. *Aphids on the world's crops: An identification guide*, John Wiley & Sons, England, pp. 341-342.
- Blackman, R.L. and Eastop, V.F., 2006. *Aphids of the World's Herbaceous Plants and Shrubs—an identification and information guide*. John Wiley, Inc.: New York, NY
- Chan, C.K., A.R. Forbes, and Raworth. 1991. *Aphid-transmitted viruses and their vectors of the world*. Research Branch, Agriculture Canada. Technical Bulletin 1991-3E. 216.



- Choi, K.S., Kim, D.-S., 2016. Effect of temperature on the fecundity and longevity of *Ascotis selenaria* (Lepidoptera: Geometridae): developing an oviposition model. *J. Econ. Entomol.* 2016. 1-6 doi:10.1093/jee/tow029.
- Curry, G.L., Feldman, R.M., 1987. *Mathematical foundations of population dynamics.* The Texas A&M University Press.
- Descamps, L.R., Chopa, C.S., 2011. Population growth of *Rhopalosiphum padi* L. (Homoptera: Aphididae) on different cereal crops from the semiarid pampas of Argentina under laboratory conditions. *Chil. J. Agr. Res.* 71, 390-394.
- 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.
- Dixon A.F.G. and Ranajit Kundu., 1994. Ecology of host alternation in aphids. *Eur. J. Entomol.* 91, 63-70.
- Eastop, V.F. 1973. Deductions from the present day host plants of aphids and related insects. In van Emden HF (ed.) *Insect/Plant Relationships.* Blackwell: Oxford, pp. 157-178.
- 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.
- Emden van H.F., Harrington, R., 2007. *Aphids as Crop Pests.* CABI, USA.

- Eyring, H., 1935. The activated complex in chemical reactions. *J. Chem. Physics* 3, 107-115.
- Frazier, M.R., Huey, R.B., Berrigan, D., 2006. Thermodynamics Constrains the Evolution of Insect Population Growth Rates: Warmer Is Better. *American Naturalist* 168, 512-520.
- Hales, D.F, Tomiuk J., Woehrmann K., Sunnucks P., 1997. Evolutionary and genetic aspects of aphid biology: a review. *Eur J Entomol* 94, 1-55.
- Ikemoto, T., Takai, K., 2000. A new linearized formula for the law of total effective temperature and the evaluation of line-fitting methods with both variables subject to error. *Environ. Entomol.* 29, 671 - 682.
- Jandel Scientific, 1996. TableCurve 2D. Automated Curve Fitting and Equation Discovery: Version 4.0. Jandel Scientific, Sam Rafael, CA, USA.
- 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, D.-S., Lee, J-H., Yiem, M.S. 2001. Temperature-dependent development of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae), and its stage emergence models. *Environ. Entomol.* 30, 298-305.
- Kim D.-S., Lee J.-H., 2003. Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Eco. Model.* 162, 145-153.

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. pp. 28 - 30.

Korea Biodiversity Information System (KBIS), N.D. Distribution map of *Rhopalosiphum padi* in Korea. <http://www.nature.go.kr/kbi/insct/pilbk/selectInsctDistrList.do> (accessed on 5 March, 2016).

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.

Lee, K.H., Shin, W.H., Kim, J.H., Lee, J.W., 1996. Mass rearing technology of *Aphidus Colemani* viereck (Hymenoptera:Aphidiidae) using *Rhopalosiphum padi* as a host aphid. Proceeding of KSAE (Korean Society of Applied Entomology) in 1996 (Autumn), pp. 65 (in Korean with title translated into English by the authors).

Lee, R.E. Jr., 1991. Principle of insect low temperature tolerance, In: Lee, R.E. Jr., Denlinger, D.L. (Eds.), *Insects at low temperature*. Chapman and Hall, New York and London, pp. 17-46.

Lee, S., J. Holman, and J. Havelka. 2002. Illustrated catalogue of Aphididae in the Korean peninsula. Part I, Subfamily Aphidinae (Hemiptera: Sternorrhyncha). Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology. Daejeon, Korea. 329.

Ma, G., Hoffmann, A.A., Ma, C.-S. 2015. Daily temperature extremes play an

- important role in predicting thermal effects. *J. Exp. Bio.* 218, 2289–2296.
- Macfadyen, S., Kriticos, D.J., 2012. Modelling the geographical range of a species with variable life-history. *PLoS One* 7(7), e40313. doi:10.1371/journal.pone.0040313.
- Mackenzie, A. and Dixon A.F.G., 1992. An ecological perspective of host alternation in aphid (Homoptera:Aphidinea:Aphididae). *Entomol Gen* 16, 265–284.
- MAFF., 1982. Reference Book 186. Cereal pests. HMSO, London. 124 pp.
- Powell, S.J., Bale, J.S., 2005. Low temperature acclimatd population of the grain aphid *Sitobion avenae* retain ability to rapidly cold harden with enhanced fitness. *J. Exp. Bio.* 208, 2615–2620.
- SAS Institute, 1999 SAS OnlinDoc®. Versin 8, SAS Institute Inc., Cary, NC. USA.
- Sengonca, V.C., Hoffmann, A., Kleinhenz, B., 1994. Laboruntersuchungen zur entwicklung, lebensdauer und fruchtbarkeit der getreideblattlausarten *Sitobion avenae* (F.) und *Rhopalosiphum padi* (L.) (Horn., Aphididae) bei verschiedenen tieferen temperaturen. *J. Appl. Ent.* 117, 224–233.
- Shim, J. Y., Park, J. S. Park, Paik, W. H., 1979. Studies on the life history of cotton aphid, *aphis gossypii* Glover(Homoptera) *Korean J. Pl. Prot.* 18(2), 85–83
- Song, J.H., Kang, S.H., Lee, K.S., Yiem, S.O., Han, W.T., 2000. Survey for

the pest of major crops on Jeju Island. Final research report of Cheju Provincial Institute for Agricultural Research (in Korean with title translated into English by the authors).

Taheri, S., Razmjou, J., Rastegari, N., 2010. Fecundity and development rate of the bird cherry-oat Aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hom.: Aphididae) on six wheat cultivars. *Plant Protect. Sci.* 46, 72-78.

Villanueva, B., J.R., Strong, F.E., 1964. Laboratory Studies on the Biology of *Rhopalosiphum padi* (Homoptera: Aphidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 57, 609-613.

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.

Ward. S.A. and Leather, S.R., Pickup J, Harrington R., 1998. Mortality during dispersal and the cost of host-specificity in parasites: how many aphids find hosts? *J Animal Ecol* 67, 763-773.

Weibull, W.A., 1951. Statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 18, 293-196.

## 감사의 글

벌써 졸업이 눈앞으로 다가왔습니다. 다니던 회사를 그만두고 교수님을 찾아가 대학원에 진학하겠다고 말씀을 드리던 때가 불현 듯 떠오릅니다. 2년이 안되는 짧다면 짧을 수도 있는 시간이었지만 대학원에 들어와 실험실에서 보냈던 시간들이 저에게는 좀 더 배우고 성장할 수 있는 큰 기회가 되었던 것 같습니다.

항상 부족한 저를 이끌어주신 김동순 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 교수님의 가르침과 배려 덕분에 석사과정을 무사히 마치고 생각했던 목표 또한 이룰 수 있었던 것 같아 너무나 감사하면서도 생각해 주신만큼 부응하지 못하여 죄송한 마음 또한 드는 것 같습니다.

또한 학부생 시절부터 지금까지 많은 가르침과 조언을 해주신 강영길 교수님, 송창길 교수님, 현해남 교수님, 전용철 교수님, 김주성 교수님께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

실험실 생활동안 항상 도움만 받은 것 같아 미안한 권순화, 김수빈 선생님, 태옥이, 성오, 경훈이, 명수 그리고 현승용 선생님께 고마운 마음을 전합니다. 그리고 많은 격려와 응원을 해주신 장용석, 김용근, 김정수, 신용균, 하영삼 선생님과 농학과 조교로 고생하고 계시는 이종훈, 이희선 선생님, 현도경, 김보화, 고희철 선배님들과 고성원, 고재범, 김민수, 차진우, 김승남 친구들, 최고봉, 현경아 후배들, 농업기술원동기분들, 농산물원종장 직원분들에게도 감사의 마음을 전합니다.

많은 분들의 격려와 응원 덕분에 이 논문을 완성할 수 있었고 이 논문이 나오기까지 도움을 주신 모든 분들께 짧게나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

마지막으로 항상 저를 믿음으로 지켜봐 주시는 아버지, 어머니와 우리 누나와 매형 그리고 저를 너무나 아껴주시는 할아버지, 할머니께 정말 감사드리며 이 논문을 바칩니다.