

방울토마토에서 잎 표면온도를 적용한 아메리카잎굴파리 (*Liriomyza trifolii*) 개체군 밀도변동 모형작성 및 평가

박정준 · 모형호¹ · 이두형² · 신기일³ · 조기종^{4*}

국립경상대학교 응용생물학과, ¹고려대학교 생명자원연구소, ²Department of Entomology, Cornell University, ³한국외국어대학교 통계학과, ⁴고려대학교 환경생태공학부

Modeling and Validation of Population Dynamics of the American Serpentine Leafminer (*Liriomyza trifolii*) Using Leaf Surface Temperatures of Greenhouses Cherry Tomatoes

Jung-Joon Park, Hyung-ho Mo¹, Doo-Hyung Lee², Key-Il Shin³ and Kijong Cho^{4*}

Department of Applied Biology, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

¹Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²Department of Entomology, Comstock Hall, Cornell University, Ithaca, NY 14850, USA

³Department of Statistics, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 449-761, Korea

⁴Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT: Population dynamics of the American serpentine leafminer, *Liriomyza trifolii* (Burgess), were observed and modeled in order to compare the effects of air and tomato leaf temperatures inside a greenhouse using DYMEX model builder and simulator (pre-programmed module based simulation programs developed by CSIRO, Australia). The DYMEX model simulator consisted of a series of modules with the parameters of temperature dependent development and oviposition models of *L. trifolii* were incorporated from pre-published data. Leaf surface temperatures of cherry tomato leaves (cv. 'Koko') were monitored according to three tomato plant positions (top, > 1.8 m above the ground level; middle, 0.9 - 1.2 m; bottom, 0.3 - 0.5 m) using an infrared temperature gun. Air temperature was monitored at the same three positions using a self-contained temperature logger. Data sets for the observed air temperature and average leaf surface temperatures were collected (top and bottom surfaces), and incorporated into the DYMEX simulator in order to compare the effects of air and leaf surface temperature on the population dynamics of *L. trifolii*. The initial population consisted of 50 eggs, which were laid by five female *L. trifolii* in early June. The number of *L. trifolii* larvae was counted by visual inspection of the tomato plants in order to verify the performance of DYMEX simulation. The egg, pupa, and adult stage of *L. trifolii* could not be counted due to its infeasible of visual inspection. A significant positive correlation between the observed and the predicted numbers of larvae was found when the leaf surface temperatures were incorporated into the DYMEX simulation ($r = 0.97$, $p < 0.01$), but no significant positive correlation was observed with air temperatures ($r = 0.40$, $p = 0.18$). This study demonstrated that the population dynamics of *L. trifolii* was affected greatly by the leaf temperatures, though to little discernible degree by the air temperatures, and thus the leaf surface temperature should be for a consideration in the management of *L. trifolii* within cherry tomato greenhouses.

Key words: *Liriomyza trifolii*, DYMEX, simulation, greenhouse leaf surface temperature, population dynamics model

초 록: 중요 시설채종인 아메리카잎굴파리(*Liriomyza trifolii* (Burgess))의 개체군 밀도변동모형을 방울토마토 온실내 대기온도와 잎 표면온도를 이용하여 모형 정확성을 비교하였다. 모형 개발에 이용된 생물적 변수들은 기존 발표된 자료들을 사용하였고 모형 작성은 DYMEX[®] 프로그램을 이용하였다. 온도에 따라 상이한 발육기간과 산란수는 생리적 연령으로 표준화시킨 발육완료 분포모형, 연령 특이적 산란수 및 생존율을 비선형회귀 모형에 적합시켜 밀도변동 모형을 개발하였다. 줄내림방식의 방울토마토에서 식물체를 3개의 위치(상단: 지상 1.6 m 이상, 중단: 지상 0.9 - 1.2 m 사이, 하단: 지상 0.3 - 0.5 m 사이)로 나누고 각 위치별로 온실 내 대기 온도와 잎 표면 온도를 기록하였다. 온실 내 잎 표면 최대온도는 대기중

*Corresponding author: kjcho@korea.ac.kr

Received February 15 2012; Revised June 1 2012

Accepted July 2 2012

최대온도보다 항상 낮게 유지되고 있었으며, 하단, 상단, 중단의 순으로 온도가 낮아지는 경향을 보였다. 개발된 모형검정을 위한 초기이입 시기와 밀도는 6월초 성충 5마리가 총 50개의 알을 잎에 산란한 것으로 설정하였다. 온실 내 대기 온도와 잎 표면 온도를 이용하여 아메리카잎굴파리 유충 발육모형과 성충의 산란모형을 DYMEX로 프로그래밍하고 모의실험을 하였다. 모의실험결과를 평가하기 위해 기상자료를 수집한 동일한 온실에서 아메리카잎굴파리 유충 밀도를 육안조사 하였으나, 알, 번데기, 성충의 경우 육안조사가 어려워 대상에서 제외하였다. 육안조사결과 밀도변동패턴이 방울토마토 잎 표면 온도를 이용한 모의실험결과 밀도변동패턴과 유사하였다. 육안조사결과와 육안조사시기의 DYMEX모의실험 결과값을 상관분석 한 결과, 육안조사결과와 잎 표면 온도를 이용한 모의실험 결과가 유의한 양의 상관관계를 보였다($r = 0.97, p < 0.01$). 대기 온도를 이용한 모의실험 결과와는 유의하지 않은 상관관계를 보였다($r = 0.40, p = 0.18$). 본 연구결과 방울토마토 온실에서 아메리카잎굴파리 개체군 밀도변동의 적절한 예측을 위해서는 잎 표면 온도를 고려해야 하는 것으로 나타났다.

키워드: 아메리카잎굴파리, DYMEX, 모의실험, 온실 내 잎 표면 온도, 개체군 밀도 변동모형

아메리카잎굴파리(*Liriomyza trifolii*) 개체군의 온도의존적 밀도변동 모형은 해충 방제 전략과 맞물려, 무분별한 화학적 방제의 남용을 예방 할 수 있고 경제적으로 의미 있는 방제를 가능하게 하는 초기 예찰을 위한 기초자료로 매우 중요하다 (Southwood, 1978). 특히 온실환경에서는 단기간 정확한 밀도변동 예측이 무엇보다 중요하게 되는데 농작물의 최적 생육을 유도하도록 조작하는 온실 내 기상조건이 아메리카잎굴파리 개체군 발육과 번식에 유리해 지는 경우 단기간에 폭발적인 밀도의 증가가 예상되기 때문이다(Ferro *et al.*, 1979; Parrella, 1987; Wagner *et al.*, 1984).

온실 내 기상조건은 온실 내의 작물 및 토양과 직사광선을 포함한 빛의 역할을 포괄한 결과로 나타나는 것이며(Ferro *et al.*, 1979; Rosenberg *et al.*, 1983), 온실 내 위치별, 각 식물체내 위치별 온도는 각각 상이하다(MRI-KMA, 1990, 1991). 아메리카잎굴파리처럼 난과 유충이 식물체 잎 표면과 엽육 사이에서 성장을 하게 되는 미소해충의 경우 해충이 직접적으로 영향을 받는 온도는 온실 내 대기 온도가 아닌 잎 표면 온도로 보는 것이 타당하다. 이와 관련하여 몇몇 선행연구에서는 시설온실 내 작물을 가해하는 식물병과 해충의 발생과 실제 살고 있는곳의 조건(actual living area condition)과는 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌다(Classen *et al.*, 2005; MRI-KMA, 1990, 1991; Park *et al.*, 2011b; Willmer, 1982). 특히 Ferro *et al.*(1979)은 식물체 잎표면 온도와 대기 온도 차이가 일출 후 7-10시간 동안 최대 8-13℃의 차이를 보인다고 하였다. 일반적으로 해충개체군의 온도의존적 밀도변동모형은 온실 내 일중 최대, 최소 대기 온도자료를 이용하므로 해충 개체군이 서식하는 장소의 온도와 대기온도의 상이함은 모형의 결과와 실제 밀도변동 결과가 상이하게 되는 대표적 원인이 된다(Ferro *et al.*, 1979; Wagner *et al.*, 1984). 현재 한국 방울토마토 온실의 재배형태는 온실내 최상단 지지대(지상 약 1.8 m 이상)에 줄을 매어 재배하는 줄내림방식이 대부분이고 이 경우 동일한 연령의 잎이 항상 동일한 높이에 위치하게 된다(Kim *et al.*, 1999, 2001; Park *et al.*,

2011a, b). 아메리카잎굴파리는 줄내림 방식 방울토마토에서 상단에 있는 어린 잎에 구멍을 내어 산란하고, 번데기 시기전까지 엽육내에서 발육하므로 동일한 높이에 비슷한 시기의 발육태가 있는 상태가 된다(Kim *et al.*, 1999; Parrella, 1987). 따라서 아메리카잎굴파리 밀도변동모형을 작성하여 적절하게 적용하기 위해서는 각 태별 연령에 영향을 주는 온도조건을 대기온도가 아닌 방울토마토 각 식물의 높이위치별 잎 표면 온도로 재해석 해야만 한다.

본 연구는 시설 해충인 아메리카잎굴파리의 온도변화에 따른 밀도변동모형을 기존에 발표되었던 논문과 연구자료에 기초하여 종합적으로 정리된 모형을 온실 내 대기 온도자료와 식물체 위치별 잎 표면 온도자료를 이용하여 예측하고 육안조사결과와 비교, 분석하여 실제 서식 장소 온도의 중요성을 파악하고자 실시되었다. 아메리카잎굴파리 밀도변동 모의실험은 상용프로그램인 DYMEX[®] (version 3)(Maywald *et al.*, 2007a, b)를 이용하여 각각 다른 온도조건으로 실시하였다.

재료 및 방법

아메리카잎굴파리 개체군 밀도 변동 모형 개발

DYMEX[®] 프로그램

아메리카잎굴파리 개체군 밀도변동모형을 이용한 모의실험 평가에 사용된 DYMEX[®] 프로그램은 호주 CSIRO에서 개발한 상용 프로그램으로, Builder(Maywald *et al.*, 2007a)와 Simulator(Maywald *et al.*, 2007b)로 구성되어 있다. DYMEX[®]는 동일연령 집단(cohort)을 기반으로 개체군의 각 성장태별 발육 및 개체군 밀도 변동 모형에 사용할 수 있는 모듈들(modules)을 제공한다. 사용자는 제공된 모듈을 대상 개체군, 혹은 대상 기후지역에 맞게 고쳐서 사용할 수 있다(Park *et al.*, 2011b; Maywald *et al.*, 2007a, b).

온도 발육 모형 및 발육 완료 모형

본 연구에서 아메리카잎굴파리의 온도변화에 따른 온도발육 모형과 발육 완료 모형은 총 3가지 수식을 사용하였다. 먼저 수식 (1)은 섭씨온도에 의해 변화되는 아메리카잎굴파리 유충의 발육율(developmental rate)과 성충의 수명률(longevity rate)을 구하는 수식이다.

$$R(T) = \begin{cases} 0 & T < T_0 \\ aT(T - T_0)(T_L - T)^{1/m} & T_0 \leq T \leq T_L \\ 0 & T > T_L \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $R(T)$ 는 아메리카잎굴파리 유충의 경우 섭씨 T 도($^{\circ}\text{C}$)에서의 발육율(1/발육일수)이고, 성충의 경우 수명률(1/성충수명)이다. 또한 T_L 은 유충시기 발육최고 임계온도(성충시기 생존최고 임계온도), T_0 은 유충시기 발육최저 임계온도(성충시기 생존최저 임계온도)이고 a 와 m 은 비선형회귀를 이용하여 추정된 매개변수이다 (Briere *et al.*, 1999). 본 연구에서 발육(생존)최저, 최고임계온도는 Parrella(1987)가 제시한 결과 중, 토마토에서 실험결과인 9.1°C 와 37°C 를 사용하였다.

성충의 온도에 따른 총 산란수는 수식 (2)를 사용하였다.

$$y(T) = \frac{\varepsilon}{\delta} \left(\frac{T - \gamma}{\delta} \right)^{\varepsilon - 1} \exp \left(- \left[\frac{T - \gamma}{\delta} \right]^{\varepsilon} \right) \theta \quad (2)$$

여기서 $y(T)$ 는 섭씨 T 도($^{\circ}\text{C}$)에서 보이는 아메리카잎굴파리 암컷 성충의 총 산란수이고, γ , δ , ε , θ 는 각각 비선형 회귀에서 추정되어진 매개변수인데(Campbell and Madden, 1990), 이중 γ 는 앞서 수식 (1)에서 사용한 최저임계온도인 9.1°C 로 고정하여 계산하였다(Parrella, 1987).

수식 3은 생리적 연령(physiological age)을 독립변수로 하여 추정된 발육완료 분포 함수, 성충의 연령특이적 생존율 함수 및 누적 산란율 함수식이다.

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left[\frac{x}{\alpha} \right]^{\beta} \right) \quad (3)$$

여기서 $F(x)$ 는 아메리카잎굴파리 유충의 경우 정규화된 생리적 연령 x 에서 발육을 완료하여 다음 태로 넘어가는 개체들의 비율이며 아메리카잎굴파리 성충의 경우 생리적 연령 x 에서 연령특이적 생존율과 누적 산란율을 나타내며 α 와 β 는 각 비선형회귀를 이용하여 구하는 수리적 상수이다(Weibull, 1951).

아메리카잎굴파리 성충의 경우 총 산란수(fecundity; 수식

(2)를 먼저 구하고, 수명률(longevity rate; 수식 (1))을 이용하여 온도에 따른 생리적 연령을 계산한 이후 암컷성충의 수명에 따른 연령특이적 생존율(age specific survival rate; 수식 (3))과 누적 산란율(age specific cumulative oviposition rate; 수식 (3))을 계산하였다.

본문에 제시한 수식에 따라 추정되어야할 매개변수값을 계산하기 위한 자료는 Leibe(1984), Parrella(1987), Minkenberg (1988), Zoebisch *et al.* (1992), RDA (2002)가 제시한 실험 결과 및 모형식에 온도를 임의로 대입하여 자료들을 재추정 하였다. 재추정된 자료를 종합하고 온도 및 생리적 연령에 따른 결과값을 재계산하여 본문에 제시된 모형식에 필요한 자료를 얻었다. 이후 자료들을 비선형회귀법을 이용하여 매개변수값을 재추정하여 사용했다(SAS PROC NLIN ; SAS Institute, 2004).

모형 평가자료 수집실험

시험포장

기상자료와 모형 평가자료는 2010년 충청남도 아산시 영인면 신봉리($36^{\circ} 52' 34'' \text{N}$, $126^{\circ} 59' 41'' \text{E}$)에 위치한 방울토마토 (*Lycopersicon esculentum*) 재배 비닐온실 2곳에서 실시하였다. 온실 1은 10년이상 농약을 사용하지 않은 곳으로 240 m^2 의 단동($6 \times 40 \text{ m}$)이 5연동으로 총 1200 m^2 면적에 약 4500주의 방울토마토를 정식했으며, 온실 2는 5년이상 농약을 사용하지 않은 곳으로 250 m^2 의 단동($5 \times 50 \text{ m}$)이 2연동으로 총 500 m^2 면적에 약 2000주의 방울토마토를 정식하였다. 온실1, 2의 정식시기는 2010년 4월 20일로 동일하였고 재식밀도는 비슷하였으며($3.75\sim 4 \text{ plants/m}^2$) ‘꼬꼬’ (cv. ‘Koko’) 품종의 방울토마토를 줄내림방식으로 관비재배하는 포장이었다.

온실 내 대기 온도와 잎 표면 온도자료수집

각 온실을 $4 \times 12 \text{ m}$ 의 가상의 격자로 나누고 각 격자의 중심 부근에 있는 방울토마토 1주를 선정하여 조사하였으며 포장당 15개체의 방울토마토가 선정되었다. 선정된 방울토마토 식물의 상단 지지대에 리본을 묶어 실험기간 동안 온실 내 동일한 위치에서 온도조사를 하였다. 선정된 방울토마토 식물 내 위치를 상단(지상에서 1.8 m 이상), 중단(지상에서 $0.9\sim 1.2 \text{ m}$ 사이), 하단(지상에서 $0.3\sim 0.5 \text{ m}$ 사이)으로 구분하였다. 구분된 각 단 중간 위치마다 기록식 전자온도계(Hobo[®] data logger)를 설치하여 1시간 단위로 대기 온도를 측정하였다. 잎 표면 온도의 측정은 비접촉식 레이저측정 온도계(Raynger[®] MXTM, Raytek

Co., USA)를 이용하였다. 기록식 온도계가 설치된 방울토마토 식물의 상, 중, 하단에서 3개의 잎을 임의로 선정하여 각 잎의 앞, 뒷면 온도를 가장 온도가 높은 오후 2시경 측정하였다. 특히 식물체 잎 표면 온도는 빛의 유무, 강우의 유무에 크게 영향을 받으므로(Rosenberg *et al.*, 1983), 이들의 영향을 상쇄하기 위해 표본의 수를 늘이는 것이 필요하여 대상 온실들의 방울토마토 수확시기(2010년 6 - 8월) 동안에 일주일당 한번씩 총 6번의 표면 온도를 측정하였다.

아메리카잎굴파리 밀도조사

아메리카잎굴파리 밀도조사는 트랩으로 성충을 유인하여 초기발생밀도를 조사하는 황색 점착트랩 조사와 모형을 이용한 예측 결과평가를 위한 실내 유충 육안조사로 나누어 진행하였다. 먼저 온실 1과 온실 2의 총 7개의 단동에서 각 단동 당 2주의 방울토마토를 선정하였는데 조사 식물간 거리는 공간분포를 고려하여 20 m 이상으로 하였다(Lee, 2004). 선정된 식물체의 최상단에 시판되는 황색점착트랩(9.6 × 16.0 cm; Min Seng Co., Korea)을 둥글게 원통형으로 긴 쪽을 약 2 cm 겹치게 말아 반지름을 약 2.2 cm 되도록 하여 세워진 형태로 설치하였으며(실제 점착트랩크기: 9.6 × 14.0 cm) 일주일 단위로 점착트랩에 포획된 아메리카잎굴파리 성충의 밀도를 확인하여 발생시기 및 초기밀도를 파악하였다. 모형 평가를 위한 육안 밀도 조사의 경우 일주일 단위로 온실 1과 2에서 각 단동 당 20개의 방울토마토 잎을 임의로 표본추출 한 후(총 7개 단동에서 140개), 감염된 방울토마토 잎에 있는 유충 밀도를 기록하였다. 육안조사 대상을 유충으로 한정하는 이유는, 성충의 경우 점착 트랩을 이용한 조사 이외에 육안조사가 매우 힘들고, 알의 경우 매우 작아서 육안으로 식별이 불가능하였으며, 번데기는 토양에 존재하여 육안조사대상에서 제외되었기 때문이었다.

DYMEX프로그램을 이용한 개체군 밀도 변동 모형의 평가

Fig. 1은 방울토마토의 일반적인 재배 형태인 줄내림방식을 보여주는 모식도와 온도에 따른 아메리카잎굴파리 밀도변동모형의 개요도이다. 온도에 따른 밀도변동모형은 크게 미성숙시기모형(immature stages; 알-유충-번데기)과 성충시기모형으로 나눌 수 있다. 미성숙시기 발육 모형은 각 태별 온도발육률(수식(1))을 계산하고 각 태별 사망률을 추가한 후 발육완료 분포 모형을 이용하여 태별 발육을 완료하였다. 성충산란모형은 수명-산란수 생존율이 생리적 연령과 온도에 따라 변화되는 모형으로 통합하였으며 성충이 산란한 알은 다시 알 초기값으로

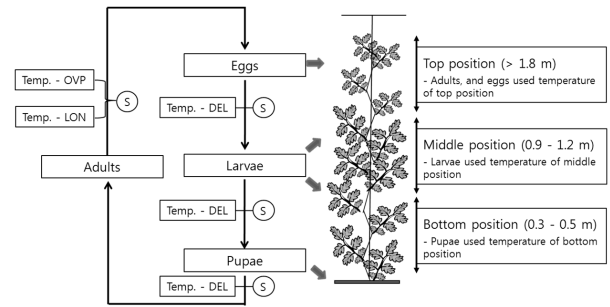


Fig.1. Schematic diagram illustrating the population simulation modules and three plant positions for *Liriomyza trifolii* in cherry tomato greenhouse. S: survival rate. Temp.-DEL: temperature dependent development model. Temp.-OVP: temperature dependent oviposition model. Temp.-LON: temperature dependent longevity model.

주어지게끔 모형을 작성하였다(Fig. 1).

아메리카잎굴파리 개체군 밀도 변동 모형 구동에 온실내 대기 온도를 이용하는 경우 방울토마토 식물내 위치에 따른 대기 온도자료를 이용하였으며, 잎 표면 온도를 이용하는 경우 줄내림방식의 재배특성에 따라 Fig. 1처럼 성충은 상단, 유충은 중단, 번데기는 최하단(토양) 주변 잎 표면온도를 이용하였다(Fig. 1). 번데기의 경우, 토양 주변 잎 표면 온도를 사용하였는데 온신토양의 열기가 대기중으로 방사되는 경우 방울토마토 온실의 토양온도와 최하단 토양주위의 잎 표면 온도가 동일하게 유지되기 때문이다(MRI-KMA, 1990). 실험시기는 온실로 아메리카잎굴파리 성충이 이입되는 시기인 6월초부터 방울토마토 수확이 종료되는 8월말까지 3개월로 하였다.

모형을 이용한 밀도 예측 값과 육안 밀도 조사 결과 값의 상관관계를 알아보기 위해 상관분석 하였다(SAS PROC CORR; SAS Institute, 2004).

결과 및 고찰

아메리카잎굴파리 개체군 밀도변동 모형 개발 및 평가자료 수집

아메리카잎굴파리의 유충과 성충의 개체군 특이적인 온도-발육모형의 모든 함수와 추정된 계수값을 DYMEX 모의실험을 위한 모형식으로 사용하였다. 모든 모형은 온도 혹은 온도에 의해 정해지는 발육율(유충시기), 수명률(성충시기)이 함수의 독립변수로 사용되었으며 아메리카잎굴파리 성충의 성비는 Parrella(1987), Speyer and Parr(1949)가 공통적으로 제시한 1:1(암컷:수컷)을 사용하였다(Tables 1 and 2).

온실내 대기 온도가 가장 높은 시간(오후 2시경) 식물체 잎

Table 1. Estimated parameters of temperature dependent models of *Liriomyza trifolii* immature for DYMEX simulation

Models	Stage	Mortality (%) (SE ¹)	a (SE) (10 ⁻⁴)	m (SE)	r^2	Data ²
Mortality and temperature dependent developmental rate (Equation 1)	Eggs	21.3 (2.65)	0.79 (0.23)	0.96 (0.10)	0.95	Zoebisch <i>et al.</i> (1992) Parrella (1998)
	Larvae	51.1 (5.56)	0.53 (0.18)	1.04 (0.16)	0.95	Zoebisch <i>et al.</i> (1992) RDA (2002)
$R(T) = aT(T - T_0)(T_L - T)^{1/m}$	Pupae	10.5 (1.93)	0.60 (0.09)	1.69 (0.16)	0.98	Minkenberg (1988)
	Total	82.9 (12.21)	0.21 (0.03)	1.27 (0.27)	0.94	Data pooled
	Stage	α (SE)	β (SE)	r^2	Data	
Completion of development (Equation 3)	Eggs to larvae	0.94 (0.03)	4.63 (1.18)	0.98	Zoebisch <i>et al.</i> (1992) Parrella (1998)	
	Larvae to pupae	0.87 (0.05)	2.08 (0.35)	0.94	Zoebisch <i>et al.</i> (1992) RDA (2002)	
	Pupae to adults	1.01 (0.08)	10.98 (1.62)	0.92	Minkenberg (1988)	
	Eggs to adults	0.96 (0.07)	4.13 (1.86)	0.92	Data Pooled	

¹Standard Error of Mean.

²The origin sources of data. All of data for estimated parameters in this study were regenerated by pre-published models and pooled.

Table 2. Estimated parameters of temperature dependent models and sex ratio of adult *Liriomyza trifolii* for DYMEX simulation

Model	a (SE ¹) (10 ⁻⁹)		m (SE)	r^2	Data ²	
Temperature dependent longevity rate (Equation 1)	6.01 (4.34)		0.24 (0.03)	0.72	Leibee (1984) Parrella (1987) Minkenberg (1988)	
	$R(T) = aT(T - T_0)(T_L - T)^{1/m}$					
Model	γ	δ (SE)	ε (SE)	θ (SE)	r^2	Data
Temperature dependent fecundity (Equation 2)	9.1	13.65 (0.22)	5.47 (1.73)	748.8 (60.47)	0.82	Leibee (1984) Parrella (1987) Minkenberg (1988)
	$y(T) = \frac{\varepsilon}{\delta} \left(\frac{T - \gamma}{\delta} \right)^{\varepsilon - 1} \exp\left(-\left[\frac{T - \gamma}{\delta}\right]^{\varepsilon}\right) \theta$					
Model	α (SE)		β (SE)	r^2	Data	
Survival rate and cumulative oviposition rate (Equation 3)	Survival rate		0.64 (0.03)	- 1.86 (0.16)	0.97	
	Cumulative oviposition rate		0.85 (0.05)	1.40 (0.18)	0.96	Leibee (1984) Parrella (1987) Minkenberg (1988)
$F(x) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x}{\alpha}\right]^{\beta}\right)$						

¹Standard Error of Mean.

²The origin sources of data. All of data for estimated parameters in this study were regenerated by pre-published models and pooled.

표면 온도와 온실 대기온도는 Fig. 2A, B에 나타내었다. 해가 진후부터 다음날 해가 뜨기 전까지의 일 온도는 대기 온도와 거의 비슷한 경향을 보이고 있거나, 외부온도보다 낮아지는 온도 역전 현상이 벌어진다는 보고가 있어(MRI-KMA, 1990), 본 연구에서 최저온도의 경우 대기 온도만을 이용하였다. 최고 온도

의 경우 대기 온도와 일 표면 온도를 사용하여 그 결과를 비교 하였다(Fig. 2).

본 실험결과 7월초 이후 온실내 대기 최고 온도가 아메리카 잎굴파리의 발육최고 임계온도인 37°C 이상 이었다(Fig. 2A). 하지만 대기 온도가 급격히 높아지는 시점에서, 토마토 잎 표

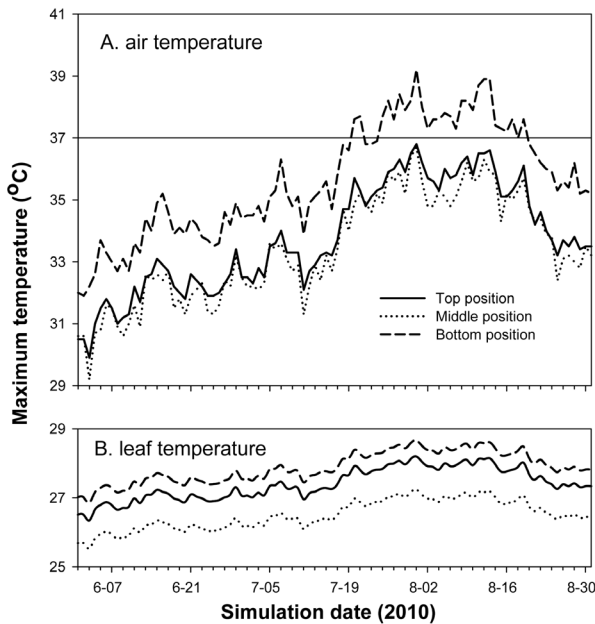


Fig. 2. Daily maximum air (A) and leaf surface temperature (B) fluctuations in cherry tomato grown in greenhouses from June 1 to August 31 at Asan city, Korea in 2010. A horizontal solid line in graphic panel A indicates the maximum development temperature (37°C) for *Liriomyza trifolii*. Top position is > 1.8 m, middle position is 0.9 - 1.2 m, and bottom position is 0.3 - 0.5 m height from the ground level, respectively.

면 온도는 항상 잎굴파리 발육가능 온도역 사이에 머무르고 있었다(Fig. 2B). 또한 방울토마토 식물 내 위치별 잎 표면 온도는 태양광에 직접 노출되는 부위인 상단온도보다, 하단온도가 조금 높았고, 중단온도가 상대적으로 낮았으며, 이러한 현상은 대기 온도에서도 비슷하게 나타났다. 하지만 대기 온도의 경우 하단이 상단과 중단에 비해 상대적으로 높은 온도를 보였다(Fig. 2). MRI-KMA(1990)의 연구결과에 의하면 온도의 일변화에서 중요한 역할은 토양의 열 공급 이라고 하였다. 한낮의 높은 온도와 맞물려, 토양의 온도가 올라가는 사실을 감안한다면, 본 실험결과 토양에 가까운 하단부위의 온도가 높은 것은 태양광선에 의한 직접적인 온도의 변동보다, 토양의 복사열로 인한 온도의 증가가 하단의 온도를 높이는 요인으로 생각된다. 아메리카잎굴파리 개체군의 온도 발육은, 대기 온도가 매우 높은 경우 발육이 느려지거나, 사망률이 증가해야 정상이지만(Table 1과 Table 2), 실제 개체군이 서식하고 있는 부근인 잎 표면 온도는 대기 온도가 높아져서 발육이 느려지는 범위에서도 최적온도에 가까운 값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 2A, B; Tables 1 and 2). 이 결과는 온실내 해충개체군 밀도 증가 속도가 감소하게 되는 여름에도 해충 개체군의 밀도가 지속적으로 증가하는 현상을 설명한다(Fig. 2A, B).

초기발생밀도 설정을 위한 황색점착트랩의 밀도조사 결과

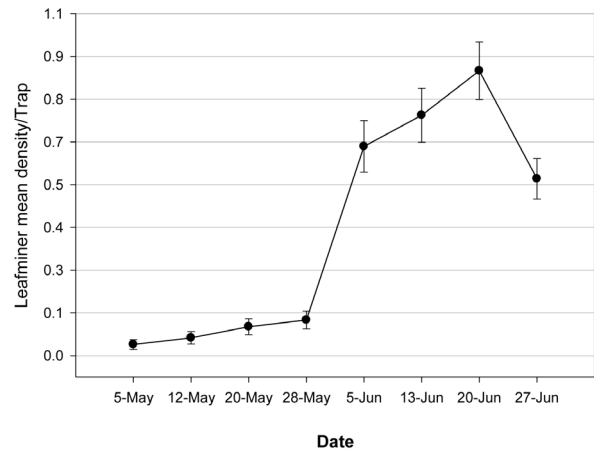


Fig. 3. A change of *Liriomyza trifolii* adult numbers (mean ± SE) caught on yellow sticky traps (size: 9.6 cm × 14.0 cm).

는 Fig. 3에 나타났다. 실제 온실에서 아메리카잎굴파리 성충은 6월초 트랩당 약 0.7마리 정도의 아메리카잎굴파리 성충이 포획되었다. 온실의 총 14개 트랩에서 10마리의 아메리카잎굴파리 성충이 유인되었으며, 아메리카잎굴파리의 성비를 고려하여 암컷 성충 5마리로 초기 발생밀도를 선정하였다.

모의실험은 이입에 성공한 아메리카잎굴파리 암컷 성충 5마리가 각 알10개(총 50개)를 산란한 후 사망하고 산란된 알 50개 모두 부화하는 경우를 가정하였다.

아메리카잎굴파리 유충의 밀도는 초기에 매우 미미하다가, 7월 중반을 넘어서면서 증가하였으며, 그 이후 밀도가 낮은 수준을 유지하다, 8월 중반에 갑자기 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 5).

DYMEX 프로그램을 이용한 아메리카잎굴파리 개체군 밀도변동 모형평가

알, 유충, 번데기, 성충의 밀도변동 모의실험결과는 Fig. 4A-D에 나타내었다. 초기밀도를 알 50개로 가정하고 3개월간의 모의실험을 하였다. 모의 실험결과에 따르면 3개월 이후 알은 최대 20배 이상 증가하였고 다른 발육태도 이입 후 일주일 정도 지나서 밀도가 증가하는 것으로 나타났고 모의실험시작 25일후인 6월 25일경에 최초로 성충으로 우화하는 개체가 나오는 결과를 보였다(Fig. 4A-D). 그 이후 대기온도의 급격한 변화에 의해 아메리카잎굴파리 밀도 변동은 모의실험 후반부로 갈수록 급격하게 되었는데, 잎 표면 온도 변화에 따른 밀도의 변동은 지속적인 증가 패턴을 보이고 있었다(Figs. 2, 4). 이것은 식물체 위치별 대기중 최대 온도의 급격한 변화와는 다르게, 식물체의 위치별 잎 표면 온도가 급격한 변화가 없었기 때문

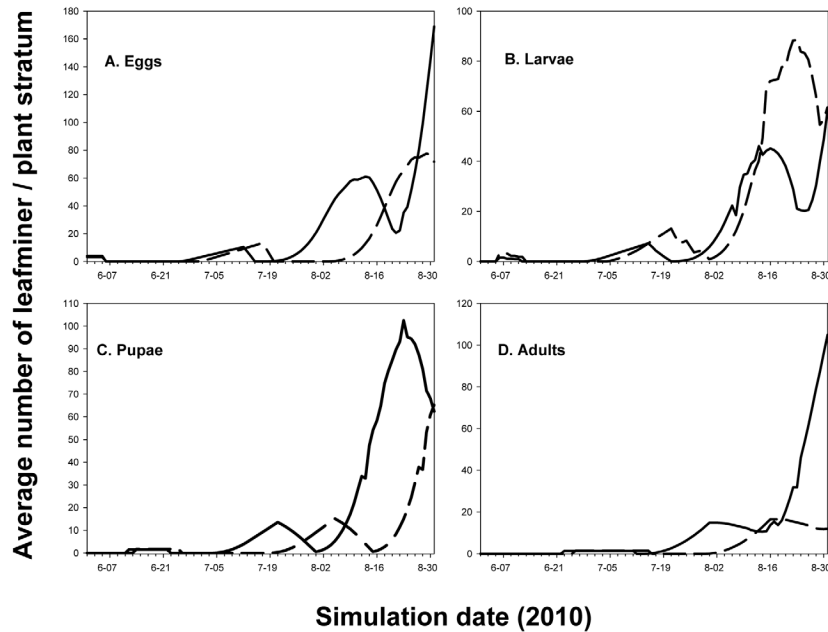


Fig. 4. Comparison of DYMEX simulation of *Liriomyza trifolii* average numbers per plant stratum between model employment of air (solid line) and leaf surface temperatures (dashed line). Eggs and adults are from the top plant stratum (> 1.8 m height from ground level), larvae are from the middle plant stratum (0.9 - 1.2 m height from ground level), and pupae are from the bottom plant stratum (0.3 - 0.5 m height from the ground level), respectively.

로 설명할 수 있다(Fig. 2A, B). 식물체 위치별 대기중 최대 온도가 잎 표면 최대온도보다 높아서 생기는 온일도 차이에 의해, 모의실험이 진행되었던 3개월간 아메리카잎굴파리 개체군 밀도변동은 대기 온도를 기반으로 한 경우보다 잎 표면 온도를 기반으로 하는 경우 상대적으로 느린 밀도의 변동 패턴을 보였다(Fig. 4A-D). 7월 중반에 진행된 아메리카잎굴파리 유충의 육안조사결과와 동일한 시기의 모의실험 결과를 비교해 보았을 때, 대기 온도가 아닌 잎 표면 온도를 기반으로 하는 모의실험 결과와 그 변동패턴이 매우 유사함을 알 수 있었다(Fig. 5). 동일 시기에 조사된 육안조사 밀도와 모의실험결과 밀도간 상관관계 분석결과 대기 온도를 이용한 모의실험결과는 유의하지 않은 양의 상관관계를 보였으나($r = 0.40, p = 0.18$), 잎 온도를 이용한 모의 실험결과의 경우 유의한 양의 상관관계를 보이고 있었다($r = 0.97, p < 0.01$). 이 결과는 아메리카잎굴파리가 대기 온도보다 잎 표면 온도에 영향을 많이 받고 있다는 것을 보여주는 증거이며, 실제 줄내림방식의 방울 토마토 온실에서 해충인 아메리카잎굴파리의 밀도변동패턴에 영향을 주는 온도조건은 대기 온도가 아닌 개체군이 서식하는 장소(알, 유충, 성충), 혹은 그와 유사하게 가까운 장소(번데기)인 잎 표면 온도임을 알 수 있었다(Fig. 5). 본 연구에서 아메리카잎굴파리 각 태별 위치에 따라 방울토마토 식물체 다른 위치별 잎 표면 온도조건을 사용함으로써 보다 정확한 밀도변동패턴을 예측할 수 있

었으며, 이러한 결과는 개체군 밀도 변동의 모의실험시 개체군이 서식하는 장소인 잎 표면 온도조건에 의해 온실 내 방울토마토의 해충방제를 위해 매우 중요하다는 것을 반증하고 있다(Figs. 2, 4, 5).

해충밀도변동과 초기 발생 예찰과 관련하여 영향을 주는 주요 기상인자는 온도, 습도, 풍속 및 방사로 요약 될 수 있다(Ferro *et al.*, 1979). 시설온실에서 해충 개체군의 온도-발육에 영향을 줄 수 있는 주요 기상 인자는 일중 최고기온을 보이는 시기의 잎 표면 온도가 된다. 본 연구에서 일중 잎 표면 최고온도는 온실 내 대기중 최고온도보다 낮게 유지되고 있었다(Fig. 2A, B). 특히 한여름 대기 최고온도는 아메리카잎굴파리 개체군의 발육을 저하시키는 고온 범위(>30°C; Table 1)에 머무르고 있음에도 불구하고, 실제 아메리카잎굴파리 개체군이 대기 온도가 높은 한여름에도 온도에 크게 영향을 받지 않고 발육할 수 있다는 것을 설명하고 있다(Table 1, Fig. 2A, B). 이러한 결과는 Ferro *et al.*(1979)이 발표한, 실제 대기 온도와 식물체의 잎, 줄기면의 온도차이와 같은 양상이다. 따라서 해충개체군의 밀도변동 추정을 위한 모의실험에 사용되는 온도자료는 서식하는 곳의 온도자료를 사용하는 것이 상대적으로 더욱 정확한 것으로 사료된다. (Table 1, Figs. 2, 4, 5). 또한 초기 아메리카잎굴파리 발생과 산란을 가정하여 예측한 아메리카잎굴파리 개체군의 밀도변동패턴과 포장 육안조사 밀도변동 패턴을 비교

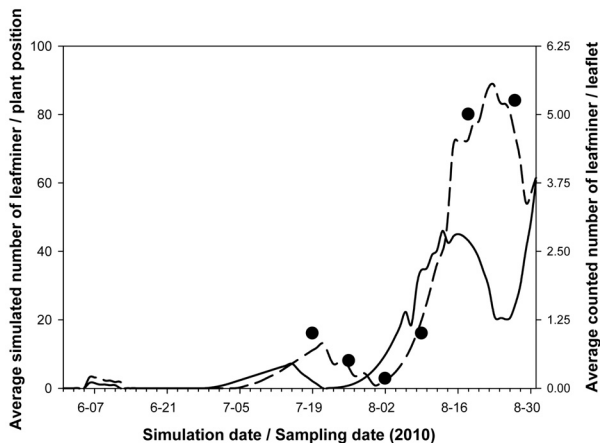


Fig. 5. Comparison between visual count (closed circle) and DYMEX simulation predictions of *Liriomyza trifolii* larvae population of the middle plant stratum (0.9 - 1.2 m height from ground level) using air (solid line) and leaf surface temperature (dashed line).

하여 그 상관관계를 살펴 본 결과, 포장에서 실시한 육안조사 밀도자료는 대기 온도가 아닌 방울토마토 식물체 위치별 잎 표면 온도를 사용한 모의실험결과에서 도출된 밀도자료와 매우 높은 상관관계를 가지고 있었다(Fig. 5).

방울토마토 온실재배에서 육묘에서 수확시기까지 한국의 여름을 기준으로 80일-110일이 소요된다(RDA, 2001). 본 모의실험결과 매우 낮은 밀도일지라도 이입이 초기에 이루어진다면, 각 세대마다, 실험결과에 의한 온도변동에 따른 밀도가 매우 가파르게 증가하므로, 방울토마토 수확시기에 커다란 문제로 작용하게 될 가능성이 매우 높음을 알 수 있었다(Figs. 4, 5). 따라서 아메리카잎굴파리의 적절한 방제를 위해 초기에 이입되는 아메리카잎굴파리의 모니터링과 온도변동에 따른 밀도변동예측은 매우 중요하며, 특히 초기 해충개체군 이입 모니터링에 의한 밀도변동예측에 사용하는 온도조건은 아메리카잎굴파리가 서식하는 장소인 방울토마토 잎 표면 온도로 하는 것이 보다 정확한 예측을 할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 잎 표면 온도와 더불어 Ferro *et al.*(1979)과 Rosenberg *et al.*(1983)이 언급한 습도, 풍속, 방사 등 다른 기상인자에 대한 합리적 제어연구가 필요할 것이며, 시설 내 식물의 생육 및 병, 해충관련연구와 맞물린 종합적인 방제 대책연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

사사

이 연구는 농촌진흥청 지리정보시스템 및 IT기반 현장 밀착형 돌발 병해충 예찰 모형 개발 사업(R1003852)의 지원으로 수

행되었습니다. 두 익명의 논문 심사자에게 감사합니다.

Literature Cited

- Briere, J.-F., P. Pracros, A.-Y. Le Roux and J.-S. Pierre. 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28: 22-29.
- Campbell, C.L. and L.V. Madden. 1990. *Introduction to Plant Epidemiology*. 532 pp. Wiley-Interscience, New York.
- Classen, A.T., S.C Hart, T.G. Whitman, N.S. Cobb and G.W. Koch. 2005. Insect infestations links to shifts in microclimate: Important climate change implications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 2045-2057.
- Ferro, D.N., R.B. Chapman and D.R. Penman. 1979. Observations on insect microclimate and insect pest management. *Environ. Entomol.* 8: 1000-1003.
- Kim, J.-K., J.-J. Park, H. Park and K. Cho. 2001. Unbiased estimation of greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*, mean density using yellow sticky trap in cherry tomato greenhouses. *Entomol. Exp. Appl.* 100: 235-243.
- Kim, J.-K., J.-J. Park, C.H. Pak, H. Park and K. Cho. 1999. Implementation of yellow sticky trap for management of greenhouse whitefly in cherry tomato greenhouse. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 40: 549-553.
- Lee, D.H. 2004. Spatial patterns of *Liriomyza trifolii* and *Trialeurodes vaporariorum* and their spatial associations in tomato greenhouses. Thesis of MS degree, Korea University. Seoul, Korea.
- Leibee, G.L. 1984. Influence of temperature on development and fecundity of *Liriomyza trifolii* (Burgess) on celery. *Environ. Entomol.* 13: 497-501.
- Maywald, G.F., D.J. Kriticos, R.W. Sutherst and W. Bottomley. 2007a. DYMEX model builder, version 3: user's guide. 166pp. Hearne Scientific Software Pty. Ltd. Melbourne 3000, Australia.
- Maywald, G.F., W. Bottomley and R.W. Sutherst. 2007b. DYMEX Model simulator, version 3: user's guide. 163pp. Hearne Scientific Software Pty. Ltd. Melbourne 3000, Australia.
- Minkenber, O.P.J.M. 1988. Life history of the agromyzid fly *Liriomyza trifolii* on tomato at different temperatures. *Entomol. Exp. Appl.* 48: 73-84.
- MRI-KMA (Meteorological Research Institute - Korea Meteorological Administration). 1990. Simulation of the greenhouse and plant canopy microclimates (I) - Studies on the meteorological elements and heat fluxes. 81pp. MRI-KMA, Seoul, Korea.
- MRI-KMA (Meteorological Research Institute - Korea Meteorological Administration). 1991. Simulation of the greenhouse and plant canopy microclimates (II). 58pp. MRI-KMA, Seoul, Korea.
- Park, J.-J., J.-H. Lee, K.-I. Shin, S.E. Lee and K. Cho. 2011a. Geostatistical analysis of the attractive distance of two different

- sizes of yellow sticky traps for greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Homoptera: Aleyrodidae), in cherry tomato greenhouses. *Aust. J. Entomol.* 50: 144-151.
- Park, J.-J., K.W. Park, K.-I. Shin and K. Cho. 2011b. Evaluation and comparison of effects of air and tomato leaf temperatures on the population dynamics of greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) in cherry tomato grown in greenhouses. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29: 420-432.
- Parrella, M.P. 1987. Biology of *Liriomyza*. *Annu. Rev. Entomol.* 32: 201-224.
- RDA (Rural Development Administration). 2001. Tomato cultivation. 270pp. RDA, Suwon, Korea.
- RDA (Rural Development Administration). 2002. Compilation of Agricultural Science and Technology in Korea. Vol. 21. 929pp. RDA, Suwon, Korea.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad and S.B. Verma. 1983. Microclimate: The Biological Environment. 2nd ed. 495pp. Wiley, New York.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT 9.1 User's guide. 4420pp. SAS Institute, Cary, North Carolina.
- Southwood, T.R.E. 1978. Ecological methods. 2nd ed. 524pp. Chapman and Hall, London.
- Speyer, E.R. and W.J. Parr. 1949. Animal pests. I. Tomato leaf-miner (*Liriomyza solani*, Hering). *Rep. Exp. Res. Stn. Cheshunt.* 35: 48-56.
- Wagner, T.L., H.I. Wu, P.J.H. Sharpe, R.M. Schoolfield and R.N. Coulson. 1984. Modeling insect development rates: A literature review and application of a biophysical model. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 77: 208-225.
- Weibull, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 18: 293-297.
- Willmer, P.G. 1982. Microclimate and the environmental physiology of insects. *Adv. Insect Physiol.* 16: 1-57.
- Zoebisch, T.G., D.J. Schuster, G.H. Smerage and J.L. Stimac. 1992. Mathematical descriptions of oviposition and egg and larval development of *Liriomyza trifolii* on tomato foliage. *Environ. Entomol.* 21: 1341-1344.