

시설내 대기 온도와 방울토마토 잎 온도가 온실가루이(*Trialeurodes vaporariorum*) 개체군 발달에 미치는 영향 비교

박정준¹ · 박권우² · 신기일³ · 조기종^{4*}

¹고려대학교 생명자원연구소, ²고려대학교 생명공학부, ³한국의국어대학교 통계학과, ⁴고려대학교 환경생태공학부

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

Jung-Joon Park¹, Kuen Woo Park², Key-Il Shin³, and Kijong Cho^{4*}

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

²Division of Biotechnology, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³Department of Statistics, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 449-791, Korea

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

Abstract. Population dynamics of greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), were modeled and simulated to compare the temperature effects of air and tomato leaf inside greenhouse using DYMEX model simulator (pre-programed module based simulation program developed by CSIRO, Australia). The DYMEX model simulator consisted of temperature dependent development and oviposition modules. The normalized cumulative frequency distributions of the developmental period for immature and oviposition frequency rate and survival rate for adult of greenhouse whitefly were fitted to two-parameter Weibull function. Leaf temperature on reversed side of cherry tomato leaves (*Lycopersicon esculentum* cv. Koko) was monitored according to three tomato plant positions (top, > 1.6 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 same three positions using a Hobo self-contained temperature logger. The leaf temperatures from three plant positions were described as a function of the air temperatures with 3-parameter exponential and sigmoidal models. Data sets of observed air temperature and predicted leaf temperatures were prepared, and incorporated into the DYMEX simulator to compare the effects of air and leaf temperature on population dynamics of greenhouse whitefly. The number of greenhouse whitefly immatures was counted by visual inspection in three tomato plant positions to verify the performance of DYMEX simulation in cherry tomato greenhouse where air and leaf temperatures were monitored. The egg stage of greenhouse whitefly was not counted due to its small size. A significant positive correlation between the observed and the predicted numbers of immature and adults were found when the leaf temperatures were incorporated into DYMEX simulation, but no significant correlation was observed with the air temperatures. This study demonstrated that the population dynamics of greenhouse whitefly was affected greatly by the leaf temperatures, rather than air temperatures, and thus the leaf surface temperature should be considered for management of greenhouse whitefly in cherry tomato grown in greenhouses.

Additional key words: adult oviposition model, Aleyrodidae, DYMEX simulation, greenhouse microclimate temperature, population phenology model, temperature dependent development model

서 언

온실 재배에 있어서 중요한 해충인 온실가루이[*Trialeurodes*

vaporariorum (Westwood)]는 국내에 1977년 외국에서 도입된 난대성 해충이지만 시설 재배 면적의 확대로 방울토마토를 포함한 여러 채소류에 큰 피해를 주는 전국적으로 분

*Corresponding author: kjcho@korea.ac.kr

※ Received 19 July 2011; Accepted 1 September 2011. 이 연구는 농촌진흥청 지리정보시스템 및 IT기반현장 밀착형 돌발 병해충 예찰모형 개발사업(R1003852)의 지원으로 수행되었습니다.

포하는 해충이다(Choi et al., 1991). 온실가루이는 알, 1령충-4령충(유충), 번데기와 성충 등의 4단계를 거치며, 성충과 1령충을 제외한 모든 온실가루이의 발육태는 고착 생활을 하는데 이들의 피해는 유충과 성충이 식물체액을 흡즙하여 직접적 수량 감소와 감로(honeydew)를 분비하여 그을음병을 유발시켜 작물의 생육과 상품 가치를 저하시킨다. 아울러 때때로 바이러스병을 매개하기도 하며(Brown, 1990), 시설 내에서 채소류와 관상식물의 생산에 있어 제한적인 요인이 되기도 한다(Muniyappa, 1980). 또한 온실가루이 약충과 번데기는 외부 보호를 위해 왁스층(wax layer)을 형성하므로, 화학적 방제가 매우 어려운 해충이므로 초기 발생 예찰이 무엇보다 중요한 해충이다(Byrne et al., 1986). 해충 개체군의 온도 변화에 의한 밀도 증감 모형은 시설 원예에서 해충 방제 전략과 맞물려, 무분별한 화학적 방제의 남용을 예방할 수 있고, 경제적으로 의미 있는 방제를 가능하게 하는 초기 예찰을 위한 기초자료로 매우 중요하다(Southwood, 1978).

해충 개체군은 외부 온도에 맞추어 발육과 번식을 하는 변온동물(poikilotherm)이며, 외부 온도 변화는 해충 대사에 영향을 주게 되어, 발육율과 번식률을 결정한다. 해충 개체군의 밀도 증감은 외부 온도에 따라 변화하므로, 생존 가능한 온도 범위에서 온도에 의한 발육율과 번식률을 수리화하고 이를 바탕으로 모형 작성이 가능하다(Wagner et al., 1984). 따라서 방울토마토를 재배하는 온실에서 온실가루이의 온도 변화에 의한 밀도 증감 모형은 온실가루이의 발육율과 번식율의 온실 내 온도에 의한 수리화 모형을 기본으로 한다. 온도 변화에 의한 밀도 증감 모형을 이용한 온실 내 온실가루이 개체군 밀도 예측은 온실 내 온도 조건에 따라 매우 민감하게 반응하므로(Rosenberg et al., 1983; van Lenteren, 1989; van Roermund and van Lenteren, 1999), 환경을 인위적으로 조작하여 농작물의 최적 생육을 유도하는 온실 환경에서 온실가루이 개체군의 최적 발육이 유도되는 경우 폭발적인 밀도의 증가가 예상된다(MIFAFF, 2002).

온실 내 기상 조건은 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 식물체 내 위치별 온도는 각각 상이하다(MRI-KMA, 1990, 1991). 온실가루이처럼, 유충이 잎 뒷면에 부착되어 성장을 하게 되는 미소곤충의 경우, 곤충에 직접적으로 영향을 주는 온도는 온실 내 대기 중 온도가 아닌 잎 뒷면 온도로 보는 것이 타당하며, 이와 관련하여 몇몇 선행 연구에서는 시설 온실 내 실제 작물과 작물을 가해하는 식물병, 해충의 발생이 미기상조건(microclimate condition)과 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌다(Classen et al., 2005; MRI-KMA,

1990, 1991; Willmer, 1982). 특히 Ferro et al.(1979)은 식물체 엽 표면과 대기 중 온도 차이가 일출 후 7-10시간 동안 최대 8°C-13°C의 차이를 보인다고 보고하였다. 일반적으로 해충 개체군의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형은 온실 내 일중 최대, 최소 대기 중 온도 자료를 이용하게 되므로, 해충 개체군이 서식하는 장소의 온도와 대기 온도의 상이함은 모형의 결과와 실제 밀도 변동 결과가 상이하게 되는 대표적 원인이 된다(Ferro et al., 1979). 따라서 시설 원예에 해충 개체군의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형의 적용은 실제 해충이 살고 있는 서식 장소의 온도를 기준으로 하여 재해석하는 것이 무엇보다 중요하게 된다. 특히 한국 온실에서 방울토마토의 재배 형태는 줄내림 방식이 대부분을 차지하고 있는데(modified vertical cordon system; Kim et al., 1999, 2001; Park et al., 2004, 2009, 2011). 줄내림 방식은 온실 내 최상단의 지지대(지상에서 약 1.8m 이상)에서 각 토마토 식물에 위치에 줄을 내려 방울토마토가 그 줄을 타고 자라게 하는 방식으로, 수확기의 방울토마토의 경우 일정한 시기(1-2주)마다 방울토마토 식물을 줄을 따라 내림 재배하기 때문에, 방울토마토 식물 내 위치가 상단(top position; 지상에서 1.6-1.8m 이상)이면 어린 잎이, 중단(middle position; 지상에서 1-1.2m 사이)에서 하단(bottom position; 지상에서 0.3-0.5m 사이)까지는 그보다 연령이 높은 성숙한 잎으로 구성된다. 해충인 온실가루이의 산란은 어린 잎에 집중되고, 2령 이후 유충은 잎 뒷면에서 고정태로 움직이지 않으므로, 줄내림 방식의 방울토마토 재배가 이루어지는 온실에서 항상 동일한 식물체 높이에 동일한 온실가루이 발육태가 있는 특이한 형태가 된다(Kim et al., 1999). 따라서, 온실가루이를 방제하고자 온도에 따른 밀도 변동 모형을 작성하여 적절하게 적용하기 위해서는, 유충의 연령에 영향을 주는 온도 조건을 대기 온도가 아닌 방울토마토 각 식물의 높이 위치별 엽 뒷면의 온도가 더욱 적절하며, 기존에 개발된 모형처럼 대기 중 온도 자료를 이용한 온도 변화에 따른 밀도 증감 추정은 실제 밀도 변동과 다른 예측 오류를 보이게 된다. 온실가루이 밀도의 증가는 온실 내 온도에 맞춰 급격하게 이루어지므로, 밀도 변동의 예측 오류는 온실가루이 방제 시점을 파악함에 있어 문제가 되며, 특히나 현재 시설 내 해충 방제가 관리(insect pest management)적인 측면이 부각되는 상황에서 해충 방제를 위한 정확한 시기를 파악하기가 어렵게 된다.

본 연구는 온실에서 재배하고 있는 방울토마토에 피해를 주는 대표적인 해충인 온실가루이(greenhouse whitefly)의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형을 개발하고, 실제 줄내림 방식의 방울토마토 온실 내 대기 중 온도 자료와 방울토마

토 식물체 내 위치별 서식 장소의 온도 자료를 이용하여 온실 내 온실가루이의 밀도 변동을 모의 실험하고, 비교 분석하여, 줄내림 방식을 사용하는 방울토마토에서 주요 해충인 온실가루이의 밀도를 정확히 추정할 수 있는 방법을 개발하여, 방제 전략 기초를 세우는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

방울토마토 재배 온실 선정

시험 대상 포장은 2010년 충청남도 아산시 영인면 신봉리의 비닐 온실 2곳에서 실시하였다. 온실 1은 10년 이상 유기 농법을 유지한 곳으로 240m²의 단동(6m × 40m)이 5연동으로 총 1200m² 면적에 약 4500주의 방울토마토를 재식했다. 온실 2는 5년 이상 유기 농법을 유지한 곳으로 250m²의 단동(5m × 50m)이 2연동으로 총 500m² 면적에 약 2000주의 방울 토마토를 재식했다. 온실 1, 2의 정식 시기는 2010년 4월 20일로 일정하였고, 재식 밀도는 비슷하게 되도록 하였다(3.75-4plants/m²). 온실 1과 온실 2는 모두 ‘꼬꼬’ 품종의 방울토마토(*Lycopersicon esculentum* cv. Koko)를 줄내림 방식의 관비 재배 온실이었다. 온실 실험은 두 가지로 나누어서 진행하였다. 첫 번째 온실 내 대기 중 온도와 방울토마토 잎 뒷면 온도와와의 관계를 위한 자료 수집이고, 두 번째는 온도 변화에 따른 온실가루이 밀도 변동 모형의 모의 실험을 위한 밀도 조사이다. 밀도 조사는 초기 이입 밀도 설정을 위한 황색 점착 트랩을 이용한 온실가루이 밀도 조사와 모의 실험 결과의 검증에 위한 온실가루이 각태별 육안 밀도 조사의 두 가지 조사가 실시되었다. 온도 조사는 온실 1과 온실 2 두 곳에서 이루어졌고, 밀도 조사는 온실 1에서만 이루어졌다.

온실 내 대기 중 온도와 잎 뒷면 온도 상관 관계 정립을 위한 온도 자료 수집

각 온실을 4m × 12m의 가상의 격자로 나누고 격자로 구성된 중심 부근의 방울토마토 주를 선정하여 조사하였는데, 온실 1과 2에서 각각 15개체의 방울 토마토가 선정되었다. 선정된 방울 토마토 식물의 상단 지지대에 리본을 묶어 실험 기간 동안 온실 내 동일한 위치에서 온도 조사를 하였다. 선정된 방울토마토 식물 내 위치를 상단(top position; 지상에서 1.6-1.8m 이상), 중단(middle position; 지상에서 1-1.2m 사이), 하단(bottom position; 지상에서 0.3-0.5m 사이)으로 구분한 이후, 각 방울토마토 식물 중단의 위치마다 기록식 온도계(data logger)를 설치하여 1시간 단위로 대기 중 온도를 실험 기간 동안 지속적으로 측정하였다. 미세 기온 측정

을 위한 엽면 온도는 비접촉식 레이저 측정 온도계인 Raynger[®]MX[™](Raytek Co., USA)를 이용하였는데, 기록식 온도계가 설치된 방울토마토 식물의 상, 중, 하단에서 3개의 단엽을 임의로 지정하여 각 잎 뒷면의 온도를 측정·기록하였다. 특히 미세 기후는 빛의 유무, 강우의 유무에 크게 영향을 받으므로(Rosenberg et al., 1983), 이들의 영향을 상쇄하기 위해 표본의 수를 늘려야 한다. 따라서, 대상 온실들의 방울토마토 수확 시기(2010년 6-8월)에 일주일에 한 번씩 총 6주간 자료를 측정하였다. 측정 시간 단계는 일출에서 일몰까지를 5단계로 나누어 시간에 맞추어 온도를 관찰하였는데, 다음과 같다: 일출-오전 7시 사이(early morning), 오전 8시-10시 사이(morning), 오전 11시-오후 1시(near noon), 오후 2시 30분-4시 30분(afternoon), 그리고 오후 6시 30분 이후-일몰 전(before sunset).

온실 내 대기 중 온도는 기록계를 이용하여 지속적으로 측정할 수 있지만, 비접촉식 온도계를 이용하여 측정한 잎 뒷면 온도는 측정하는 기간(방울토마토 수확 시기인 2010년 6-8월, 총 6주) 매주 1회 지정된 시각에 기록되므로, 대기 중 온도와 차이가 있을 경우 모형식 작성에 어려움이 크게 된다. 따라서 대기 중 온도와 잎 뒷면 온도를 DYMEX 모의 실험에 사용하기 위해 상관 관계 수식이 필요하다. 본 실험에서는 온실 내 대기 중 온도와 잎 뒷면 온도의 상관 관계 수식화를 위해 획득된 대기 중 온도 자료와 잎 뒷면 온도 자료를 이용하여 최적의 비선형 상관 관계식을 찾아내는 함수 프로그램인 Table Curve 2D(Jandel Scientific, 1996)를 이용해서 상관 관계식을 유도하였다.

온실가루이 밀도 조사

DYMEX 모의 실험을 위한 온실가루이 밀도 조사는 트랩으로 성충을 유인하여 초기 이입 밀도를 조사하는 황색 점착 트랩 조사와, 모의 실험 결과 검증을 위해 온실 1에서 각 단동당 2주의 방울토마토를 임의로 선정하였다. 선정 기준은 Park et al.(2011)의 연구 결과에 따라, 황색 점착 트랩의 온실가루이 유인 가능 거리인 15m 이상으로 설정하였다. 선정된 식물체의 최상단에 시판되는 황색 점착 트랩(9.6 cm × 16.0cm; MinSeng Co., Korea)을 둥글게 원통형으로 긴 쪽을 약 2cm 겹치게 말아서 반지름을 약 2.2cm 되도록 하여 세워진 형태로 설치하였으며(실제 점착 트랩 크기: 9.6cm × 14.0cm; Park et al., 2011), 일주일 단위로 점착 트랩에 유입된 온실가루이 성충의 밀도를 확인하여, 유입 시기 및 초기 밀도를 파악하였다. 방울토마토 식물 내의 위치별(상단, 중단, 하단) 복엽들은 7개 단엽으로 구성된 10개 내외의 복엽으로 이루어져 있었고, 각 위치별 임의로 3개 단엽씩

표본 추출하여 온실가루이 밀도를 육안 조사하여 기록하였다(Kim et al., 1999; Park et al., 2004, 2009, 2011). 육안 조사 대상은 온실가루이의 1-2령충, 3-4령충, 번데기, 성충이며, 알의 경우 매우 작아서 육안으로 식별이 불가능하므로 육안 조사 대상에서 제외되었다. 특히 육안 조사의 경우, 기온이 높고, 습도가 낮은 경우, 성충이 방울토마토 식물의 작은 움직임으로도 비산하므로, 조사 시간은 일출 시기(오전 6시경)로 하여 성충의 비산을 최소화하였다.

온실가루이의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형 개발을 위한 비선형 수식

본 연구에서 온실가루이의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형 개발을 위한 비선형 수식은 다음의 4가지 수식을 이용했다. 먼저 식 1과 식 2는 섭씨 온도(T , °C)에 의해 변화되는 온실가루이 유충의 발육율과 발육 최적 온도를 구하는 수식이다. 식 3은 온실가루이 성충의 생존, 산란과 관련된 수식이고, 식 4는 변화하는 온도에 따른 발육 및 생존을 표준화한 생리적 연령(physiological age)을 이용하여 유충의 발육 완료 분포 모형 및 성충의 연령 특이적 생존율과 누적 산란율 모형이다.

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

여기서 $R(T)$ 는 온실가루이 유충의 경우 섭씨 T (°C)에서의 발육율(1/발육일수)이고, 온실가루이 성충의 경우 수명률(longevity rate)(1/성충수명)이다. 또한 T_L 은 유충 시기 발육 최고 임계 온도(성충 시기 생존 최고 임계 온도), T_0 은 유충 시기 발육 최저 임계 온도(성충 시기 생존 최저 임계 온도)이고 a 와 m 은 비선형 회귀를 이용하여 구하는 매개 변수이다(Briere et al., 1999).본 실험에서 발육(생존) 최저, 최고 임계 온도는 Osborne(1982)과 Evert and Schutte(1983)이 제시한 8.3°C와 35°C를 사용하였으며, 발육 최적 온도는 식 2와 같이 구하였다.

$$T_{opt} = \frac{2mT_L + (m+1)T_0 + \sqrt{4m^2T_L^2 + (m+1)^2T_0^2 - 4m^2T_0T_L}}{4m+2} \quad (2)$$

여기서 T_{opt} 는 발육 최적 온도이고 각 상수는 식 1의 비선형 회귀식에서 계산된 계수들이다.

온실가루이 성충의 경우 유충과는 다르게, 성충의 수명(longevity), 총 산란수(fecundity), 산란 빈도(oviposition frequency)를 먼저 구하고, 수명 비율(longevity rate)을 이용하여 온도에 따른 수명을 수식으로 나타낸 이후 암컷 성충

의 수명에 따른 연령 특이적 생존율(age specific survival rate)과 누적 산란율(age specific cumulative oviposition rate)의 계산이 이루어져야 하는데, 수명 비율의 경우 식 1을 사용하였으며, 성충의 수명, 총 산란수 및 산란 빈도는 다음의 식 3을 이용하여 모형화하였다.

$$y(T) = \frac{\epsilon}{\delta} \left(\frac{T-\gamma}{\delta} \right)^{\epsilon-1} \exp \left(- \left[\frac{T-\gamma}{\delta} \right]^\epsilon \right) \theta \quad (3)$$

여기서 $y(T)$ 는 섭씨 T (°C)에서 보이는 온실가루이 암컷 성충의 수명, 총 산란수 및 산란 빈도이며, ν , δ , ϵ , θ 는 각각 비선형 회귀에서 추정되어야 할 계수인데, 이 중 γ 는 치사 저온(lower lethal temperature)으로서 Weber(1931), Pravisani(1981), van Roermund and van Lenteren(1992)가 각각 제안한 값인 7.5°C로 고정되어서 계산하였다. 치사 저온 7.5°C는 발육 최저 임계 온도 8.3°C보다 낮게 정하였는데 그 이유는 최저, 최고 발육 임계 온도 영역은 치사 저온과 치사 고온(upper lethal temperature) 영역보다 좁은 범위에 있기 때문이다(Campbell and Madden, 1990; Weibull, 1951). 참고로 치사 고온은 발육 최고 임계 온도인 35°C보다 높은 37.5°C로 알려져 있다(Pravisani, 1981).

생리적 연령으로 표준화시키는 모형은 다음의 식 4를 이용하였다.

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left[\frac{x}{a} \right]^\beta \right) \quad (4)$$

여기서 $F(x)$ 는 온실가루이 유충의 경우 정규화된 생리적 연령 x 에서 발육을 완료하여 다음 태로 넘어가는 개체들의 비율이며, 온실가루이 성충의 경우 연령 특이적 생존율과 누적 산란율을 나타내며 a 와 β 는 각 비선형 회귀를 이용하여 구하는 수리적 상수이다(Kim and Lee, 2010; Weibull, 1951).

각 비선형 회귀식에서 추정되어야 할 매개 변수값은 Wagner et al.(1984)이 개발한 SAS 프로그램을 변형시켜 초기값을 산출하여 SAS PROC NLIN 을 이용하여 추정하였다(SAS Institute, 1995).

온실가루이의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형 개발

Fig. 1은 방울토마토의 일반적인 작형인 줄내림 방식을 보여주는 모식도와 온도 변화에 따른 온실가루이 밀도 증감 모형의 개요도이다. 온실가루이의 온도 변화에 따른 밀도 변동 모형은 크게 미성충 시기 모형(immature stages; 알-유충-번데기)과 성충 시기 모형으로 나눌 수 있다. 먼저 미성충 시기의 각 태별 온도 발육 모형(식 1)과 그 결과 계수를 이용한 발육 최적 온도(식 2)를 계산하고, 이후 각 태별 사망

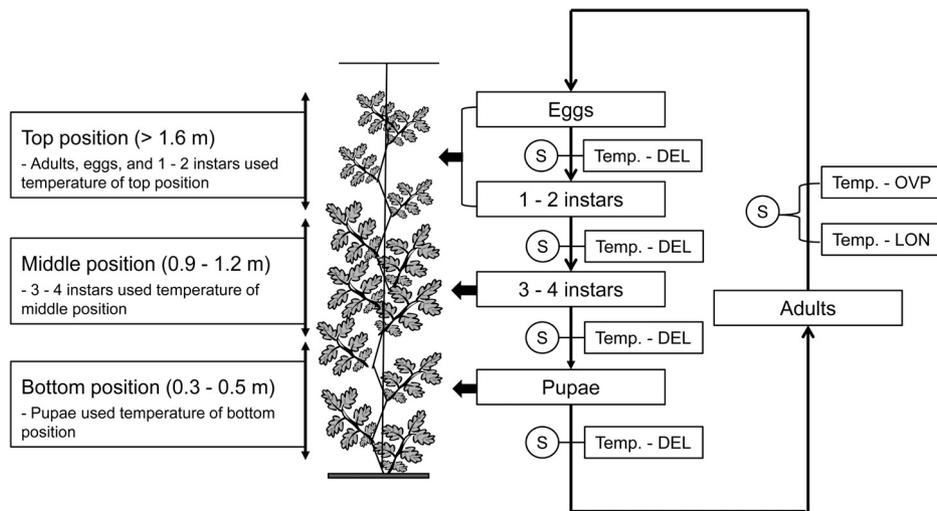


Fig. 1. Schematic diagram illustrating the population simulation modules and three plant positions for *Trialeurodes vaporariorum* in cherry tomato greenhouse. S, survival rate; Temp.-DEL, temperature dependent development model; Temp. - OVP, temperature dependent oviposition model; Temp. - LON, temperature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

를 실험 자료를 이용하여 분석하고, 이전 태에서 다음 태로 넘어가는 발육 완료 분포 모형은, 온도의 변화에 따라 연령이 달라지는 것을 감안하여 생리적 연령으로 표준화시켜 모형을 정리하였다(식 4). 성충 시기는 온도의 변화에 따른 성충의 수명(식 4)을 수명 비율로 변환하여 비선형 회귀로 적합시켰다(식 1). 생리적 연령으로 표준화한 모형과 성충의 총 산란수를 계산하여 모형식에 적합하였다(식 3). 성충이 된 이후 온도의 변화에 따른 일 산란수를 모형식에 적합하였고(식 3), 연령 특이적 생존율(식 4)과 누적 산란율(식 4)을 더하였다. 이 모든 모형식의 적합 결과를 이용하여 성충 시기의 수명-산란수-생존율이 생리적 연령과 온도에 따라 변화되는 모형으로 통합하여, 성충이 산란한 알은 다시 알-유충-번데기 시기 모형의 초기값으로 주어지게끔 모형을 작성하였다(Fig. 1).

DYMEX 프로그램을 이용한 방울토마토 온실 재배에서 잎 뒷면 온도를 적용한 온실가루이 밀도 변동 모형 모의 실험

DYMEX 프로그램은 호주 CSIRO에서 개발한 프로그램으로서, 미리 여러 가지 모형에 적합할 수 있는 모듈들(modules)을 제공한다. 사용자는 제공된 모듈을 대상 개체군, 혹은 대상 기후 지역에 맞게 고쳐서 사용할 수 있다. DYMEX 프로그램을 이용하여 모의 실험하기 위하여 필요한 것은 다음의 3가지이다. 첫째, 기후 관련 자료, 둘째, 곤충 개체군의 온도에 따른 발육 모형과 모형 계수, 셋째, 개체군 밀도 변동에 영향을 줄 특별한 이벤트와 관련된 자료이다(Maywald et al., 2007). 먼저 기후 관련 자료는 2010년 충남 아산 지역의 최고, 최저 온도를 이용하였다. 확보된 대

기 중 온도를 실제 잎 뒷면 온도와 비선형 상관 관계식으로 변환하여 잎 뒷면 온도 자료를 따로 준비하였다. 개체군 밀도 변동과 관련한 발육 모형과 모형 계수는 본 실험실에서 선행 실험한 연구 결과를 이용하였고(MIFAFF, 2002), 선행된 연구 결과를 참고하였는데(Evert and Schutte, 1983; Osborne, 1982; Pravisani, 1981; van Roermund and van Lenteren, 1992; Weber, 1931), 만약 연구 결과가 상이한 경우에는 실험실에서 선행 실험한 연구 결과를 이용하였다. 두 가지 온도 조건(대기 중 온도; 잎 뒷면 온도)을 각각 이용하여 모의 실험을 실시하였으며, 그 결과를 비교하였다. 본 모의 실험에서 대상 온실은 유기농 재배를 하므로, 농약의 살포와 같은 특별한 이벤트는 없는 것으로 하였다.

대기 중 온도를 이용하는 경우, 방울토마토 식물 내 위치 별로 상관 없이 대기 온도 자료를 이용하여 모의 실험을 하였으며, 잎 뒷면 온도를 이용하는 경우 줄내림 방식의 재배 특성을 이용하였는데, 온실 내 방울토마토는 Fig. 1의 재배 모식도처럼 지지줄을 타고 자란 후, 최상단까지 자란 상태에서 2주에 약 30cm 정도 내려 주면서 고정하게 되는데, 이 경우, 상단 부위(지면에서 1.6m 이상 높이)는 항상 새로운 엽들이, 하단 부위(지면에서 0.3-0.5m 높이)에는 수확이 가능한 방울토마토가 있게 된다. 온실가루이의 경우 유충은 고정태이고, 성충은 새로운 잎에 산란을 하므로, Fig. 1처럼 상단에는 성충, 알 및 1-2령충이 많이 분포하고, 중단(지면에서 0.9-1.2m 높이)에는 3-4령충이, 하단에는 번데기와 우화한 성충이 가장 많이 관찰된다(Kim et al., 2001). 따라서, 잎 뒷면 온도를 이용하는 경우 온실가루이 개체군의 온도-발육 모형을 구현하기 위해서 성충과 1-2령충은 상단, 3-4령

층은 중단, 번데기는 하단에서 발육하는 것으로 하여, 모의 실험을 실시하였다(Fig. 1). 모의 실험 결과와 육안 조사 결과의 비교를 위해 각 태별 육안 조사 결과와 공기중, 잎 뒷면 온도 조건에 따른 각 태별 모의 실험 결과와의 상관 관계를 알아보기 위해 SAS PROC CORR을 이용하여 상관 분석하였다(SAS Institute, 1995).

결과 및 고찰

방울토마토 온실에서 식물체 엽온 및 대기 중 온도

Table curve 2D에서 제시한 가장 적절한 비선형 회귀 모형의 경우 일출-오전 7시까지, 오전 8시-10시 사이, 오후 6시 30분 이후-일몰 전과 같이 일출과 더불어 대기가 가열되기 전과 일몰 전 열 방사가 시작되는 순간의 경우, 최대치에 증가 수렴하는 다음의 3차항 지수 모형(3 parameter exponential model; 식 5)이 적절하게 설명하였다. 다음으로 오전 11시-오후 1시, 오후 2시 30분-4시 30분과 같이 대기 중 온도가 태양의 방사열에 의해 가장 높은 경우 3차항 시그모이드 모형(3 parameter sigmoidal model; 식 6)이 적절하게 설명하였다(Table 1).

$$T_{leaf} = a + b(1 - \exp(-cT_{air})) \quad (5)$$

$$T_{leaf} = a / (1 + \exp(-(T_{air} - \beta) / \gamma)) \quad (6)$$

여기서 T_{leaf} 는 줄내림 방식으로 재배되는 방울토마토 잎 뒷 표면의 온도이고 T_{air} 는 대기 중 온도이며, 식 5의 a , b , c 와 식 6의 a , β , γ 는 비선형 회귀로 각각 추정되는 계수이다 (Jandel Scientific, 1996).

본 실험 결과에서 무엇보다 중요한 점은, 아침나절과 저녁나절의 온도가 비슷한 패턴을 보인 점이고, 한낮의 가장 온도가 높을 때의 온도는 다른 패턴을 보인다는 점일 것이다. 특히 해가 진 후부터 다음 날 해가 뜨기 전까지의 잎 뒷면 온도는 대기 중 온도와 거의 비슷한 패턴을 보이고 있거나, 외부 온도보다 낮아지는 온도의 역전 현상이 벌어진다는 보고가 있으므로(MRI-KMA, 1990), 결과적으로 하루를 3가지 온도 변화 형태로 구분하여, 모형식을 작성하는 것이 가장 적절한 것으로 사료된다. 즉 일몰 후부터 일출까지 시설 내 대기 중 온도를 그대로 모형에 사용하고, 일출 약 1.5-2시간 이후에서 오전 10-11시까지, 일몰 전 2시간은 3차항 지수 모형을, 한낮에서 오후까지는 3차항 시그모이드

Table 1. Modeling a relationship between air and leaf temperature and its model parameters at various time frames in cherry tomato grown in greenhouses.

		3-parameter exponential model ^z			
Time frame	Cherry tomato plant position ^y	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ²
Early morning (-07:00)	Top	-419512.69	419540.14	0.47	0.76
	Middle	-62975.03	63003.12	0.38	0.78
	Bottom	-18817.49	18846.15	0.33	0.77
Morning (10:00 - 11:00)	Top	-143.87	178.04	0.11	0.49
	Middle	-4909.68	4942.22	0.22	0.55
	Bottom	-2686.76	2718.84	0.20	0.54
Before sunset (18:30 - 17:30)	Top	-6986.17	7015.50	0.27	0.85
	Middle	-3775.67	3805.63	0.24	0.87
	Bottom	-7808.37	7837.66	0.28	0.82
		3-parameter sigmoidal model ^x			
Time frame	Cherry tomato plant position	<i>a</i>	β	γ	<i>r</i> ²
Near noon (12:30 - 13:30)	Top	35.23	3.46	27.80	0.49
	Middle	35.21	3.65	27.27	0.50
	Bottom	34.45	3.24	26.41	0.33
Afternoon (14:30 - 16:00)	Top	36.94	5.84	26.44	0.52
	Middle	35.75	4.35	27.92	0.54
	Bottom	38.01	4.90	28.48	0.52

^z $T_{leaf} = a + b(1 - \exp(-cT_{air}))$, where T_{leaf} is a tomato leaf temperature and T_{air} is an air temperature, respectively. Parameters a , b , and c were estimated by nonlinear regression fitting.

^y Top: > 1.6 m; Middle: 0.9-1.2 m; Bottom: 0.3-0.5 m above the ground level height in cherry tomato plant, respectively.

^x $T_{leaf} = a / (1 + \exp(-(T_{air} - \beta) / \gamma))$, where T_{leaf} is a tomato leaf temperature and T_{air} is an air temperature, respectively. Parameters a , β , and γ were estimated by nonlinear regression fitting.

Table 3. Estimated parameters of temperature-dependent developmental model of adult of *Trialeurodes vaporariorum* in cherry tomato grown in greenhouses for DYME X simulation.

Temperature-dependent longevity, fecundity, and oviposition frequency ^z					
Parameters	γ	δ (SE ^y)	ε (SE)	θ (SE)	r^2
Longevity	7.5	12.53 (0.25)	1.17 (0.03)	539.68 (13.12)	0.98
Fecundity	7.5	13.01 (0.63)	3.48 (0.47)	8695.64 (329.12)	0.93
Oviposition frequency	7.5	18.20 (0.07)	2.24 (0.02)	108.43 (0.75)	0.99
Temperature-dependent longevity rate ^x					
a (SE) ($\times 10^{-4}$) = 1.34 (0.13); m (SE) = 4.53 (0.90); r^2 = 0.83					
Age specific survival rate and cumulative oviposition rate ^w					
	a (SE)		β (SE)		r^2
Age specific survival rate	0.946 (0.012)		- 8.813 (1.127)		0.97
Age specific cumulative oviposition rate	1.089 (0.019)		2.320 (0.137)		0.99

^z $y(T) = \frac{\varepsilon}{\delta} \left(\frac{T-\gamma}{\delta} \right)^{\varepsilon-1} \exp\left(-\left[\frac{T-\gamma}{\delta}\right]^{\varepsilon}\right) \theta$, where T is temperature (°C) and γ is fixed lower lethal temperature (7.5°C), respectively.

Parameters δ , ε , and θ were estimated by nonlinear regression fitting.

^yStandard Error of Mean.

^x $R(T) = \begin{cases} 0 & T \leq T_0 \\ aT(T-T_0)(T_L-T)^{1/m} & T_0 \leq T \leq T_L \\ 0 & T \geq T_L \end{cases}$, where T is temperature (°C), T_0 is minimum developmental temperature (8.3°C), and T_L is maximum developmental temperature (35°C), respectively. Parameters a and m were estimated by nonlinear regression fitting.

^w $F(x) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x}{a}\right]^{\beta}\right)$, where x is physiological age. Parameters a and β were estimated by nonlinear regression fitting.

모형을 사용하여, 식물체 잎 뒷면 온도를 적용시켜 실제와 가장 근사한 온도 변화에 따른 온실가루이 밀도 증감 모형

Table 2. Estimated parameters of temperature-dependent developmental model of immature of *Trialeurodes vaporariorum* in cherry tomato grown in greenhouses for DYME X simulation.

Stage specific developmental rate (equation 1 ^z), $R(T) = \begin{cases} 0 & T \leq T_0 \\ aT(T-T_0)(T_L-T)^{1/m} & T_0 \leq T \leq T_L \\ 0 & T \geq T_L \end{cases}$					
Parameters	Eggs	1-2 instars	3-4 instars	Pupae	Total
a (SE ^y) ($\times 10^{-4}$)	1.44 (0.26)	1.03 (0.34)	0.23 (0.10)	0.90 (0.38)	0.13 (0.03)
m (SE)	2.30 (0.49)	1.50 (0.35)	0.85 (0.13)	1.02 (0.19)	1.04 (0.13)
r^2	0.99	0.97	0.97	0.96	0.98
Optimum temperature (°C) ^x	29.60	27.47	23.89	25.13	25.27
Stage specific mortality (%) (SE)	27.8 (1.65)	18.6 (1.15)	12.2 (7.15)	9.5 (1.43)	68.1 (2.21)
Stage specific distribution of completion of development (equation 4 ^w), $F(x) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x}{a}\right]^{\beta}\right)$					
Parameters	Eggs → 1-2 instars	1-2 → 3-4 instars	3-4 instars → Pupae	Pupae → Adults	Eggs → Adults
a (SE)	0.96 (0.02)	0.90 (0.01)	1.02 (0.02)	0.91 (0.01)	1.00 (0.01)
β (SE)	8.80 (1.95)	4.10 (0.30)	4.39 (0.49)	4.13 (0.36)	12.59 (1.11)
r^2	0.95	0.99	0.96	0.99	0.97

^zWhere T is temperature(°C), T_0 is minimum developmental temperature (8.3°C), and T_L is maximum developmental temperature (35°C), respectively. Parameters a and m were estimated by nonlinear regression fitting.

^yStandard Error of Mean.

^xEquation 2, $T_{opt} = \frac{2mT_L + (m+1)T_0 + \sqrt{4m^2T_L^2 + (m+1)^2T_0^2 - 4m^2T_0T_L}}{4m+2}$, where T_0 , T_L , a , and m are derived from the results of equation 1.

^wWhere x is physiological age. Parameters a and β were estimated by nonlinear regression fitting.

을 작성하는 것이다(Table 1).

온실가루이의 온도 변화에 따른 밀도 증감 모형 개발

각 온도별, 유충의 영기별 발육 기간과 온도와 발육율의 상관 관계식(식 1)의 비선형 회귀 계수 추정 결과와 각 태별 자연 사망률 및 온도의 변화에 따른 발육 완료 시기를 생리적 연령으로 변환시켜 다음 영태로 넘어가는 발육 완료 모형식(식 4)의 비선형 회귀 계수 추정 결과는 Table 2에 정리하였다. 실험실 실험에서 우화한 온실가루이 성충 1000여 개체의 성비를 조사한 결과 전체의 53.8%가 암컷으로 나타났으며, 온실에서 온실가루이 성충이 가장 많이 보이는 부분인 상단의 성충을 수거해서 조사한 결과 전체의 70.2%가 암컷으로 나타났다. 이렇게 실험실과 온실에서 채집한 온실가루이 성충의 성비가 다른 이유는 앞서 언급한 바와 같이 시설 방울토마토의 작형은 대부분 줄내림 방식으로 이루어지고 있으며, 온실의 방울토마토 상단 부위의 앞에서 채집한 온실가루이 성충의 경우 수컷보다는 산란을 시도하는 암컷이 대부분이므로 실험실 결과보다 높은 암컷 비율이 관찰되었다(Kim et al., 1999, 2001). 특히 이른 아침을 제외한 시간에 온실가루이 성충 채집은 성충이 많이 모이는 상단 부근의 앞에 집중되었으므로, 온실에서 채집된 온실가루이 성충의 성비는 실제 온실가루이 개체군의 성비와 다르다고 판단하였다. 따라서 DYMEX 모형에 적용할 성비는 실험실에서 우화한 결과값인 암컷 53.8%를 사용했다.

온실가루이 암컷 성충의 수명 비율을 식 1에 적합시킨 결과와 암컷 성충의 온도별 평균 수명과 산란율 및 일당 산란빈도수를 비선형 회귀식(식 3)에 적합시킨 결과 그리고 연령 특이적 생존율과 누적 산란수를 식 4에 적합시킨 결과는 Table 3에 정리하였다.

온실가루이의 유충과 성충의 개체군 특이적인 온도-발육 모형의 모든 함수와 추정된 계수값을 DYMEX 모의 실험을 위한 모형식으로 사용하였다. 모든 모형은 온도 혹은 온도에 의해 정해지는 발육율(유충시기), 수명율(성충시기)이 함수의 독립 변수로 사용되었다(Tables 2 and 3).

DYMEX 프로그램을 이용한 방울토마토 재배 온실에서 미기상을 적용한 온실가루이 밀도 변동 모형 모의 실험

Fig. 1에 나타난 온실가루이 개체군 모형의 순서도를 기준으로 하여 DYMEX 모의 실험을 구현하였다. 온실가루이의 발육은 알, 1-2령충, 3-4령충, 번데기의 성충 이전 시기와, 암컷 성충의 산란으로 구분하여 작성되었으며, 수리적인 부분은 본 실험에서 사용된 온도-발육의 모형식과 도출된 계수 결과를 이용하였다. 온도자료는 2010년 충청남도 아산

지역을 기준 자료로 하여 모형을 이용한 모의 실험을 실시하였다. 모의 실험 시기는 실제 온실에서 온실가루이 성충의 밀도가 이입되는 시기인 6월 초부터 방울토마토 수확이 종료되는 8월 말까지 3개월간(92일)으로 하였다.

모의 실험을 위한 초기 이입 밀도를 위한 황색 점착 트랩의 설치 결과는 Fig. 2에 나타났다. 실제 온실에서 온실가루이 성충은 5월 초부터 관측은 되지만 트랩에 유인되는 밀도는 미미하였으며, 6월 초 트랩당 2마리 정도의 온실가루이 성충이 관찰되었다. 온실의 총 10개 트랩에서 총 20마리의 온실가루이가 트랩에 유인되었으며, 온실가루이 성비를 고려하여 이입된 온실가루이의 암컷 성충은 10마리로 하였다. 모의 실험은 이입에 성공한 온실가루이 성충 10마리가 각 알 10개(총 100개)를 산란한 후 사망하고 산란된 알 100개 모두 부화하는 경우를 가정하였다(Fig. 4).

Fig. 3은 온실 내 방울토마토 잎 위치별 대기 중 온도의 최고값의 변화에 따른 식물체 잎 뒷면 미세 기상 온도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 발육 최고 임계 온도인 35°C는 가로선으로 따로 나타내었다. 대기 중 최고온도는 7월 초 이후 온실가루이의 발육 최고 임계 온도인 35°C를 넘어가고 있으며, 시기에 따라 치사 고온인 37.5°C에 근접하기도 했다. 하

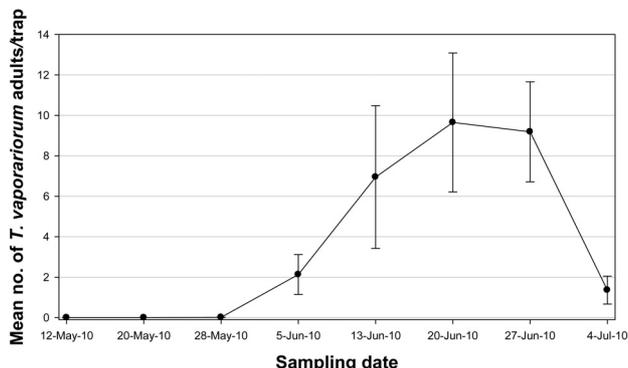


Fig. 2. Mean (\pm SE) number of *Trialeurodes vaporariorum* adults caught on yellow sticky traps (size: 9.6 cm \times 14.0 cm).

지만 7월 초 이후 대기 중 온도가 급증하는 시점에서, 잎 뒷면 온도는 급격한 증가를 보이지 않았으며, 항상 발육 최저, 최고 임계 온도 사이에 머무르고 있었다. 또한 방울토마토 식물 내 위치별 잎 뒷면 온도는 태양광에 직접 노출되는 부위인 상단 온도보다, 하단 온도가 조금 높았으며, 중단 온도가 상대적으로 낮았으며, 이러한 현상은 대기중 온도에서도 비슷하게 나타났지만, 대기 중 온도의 경우 하단이 중단과 중단에 비해 상대적으로 높은 온도를 보였다(Fig. 3). MRI-KMA(1990)의 연구 결과에 의하면 온도의 일 변화에서 중요한 역할은 토양에서 열 공급이라고 하였다. 한낮의 높은 온도와 맞물려, 토양의 온도가 올라가는 사실을 감안

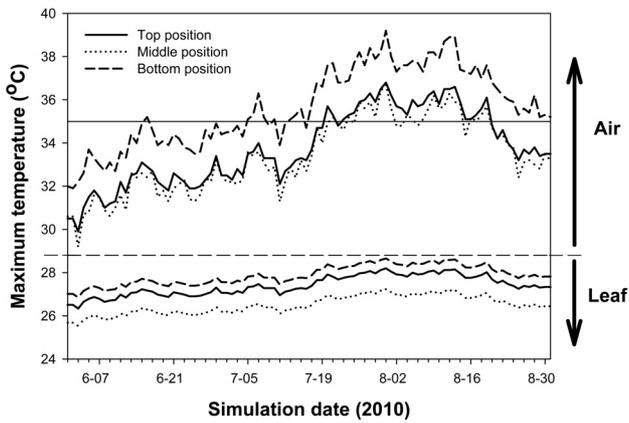


Fig. 3. Maximum air and leaf temperature fluctuations in cherry tomato grown in greenhouses from June 1 - August 31st at Asan city, Korea in 2010. A horizontal solid line indicates the maximum development temperature (35°C) for *Trialeurodes vaporariorum*. A horizontal dashed line separates air and leaf temperatures.

한다면, 본 실험 결과 토양에 가까운 하단 부위의 온도가 높은 것은 태양 광선에 의한 직접적인 온도의 증감보다, 토양의 복사열로 인한 온도의 증가가 하단의 온도를 높이는 요인으로 생각된다. 온실가루이 개체군의 온도 발육은, 대기 중 온도가 매우 높은 경우 발육이 느려지거나, 사망률이 증가해야 정상이지만(Table 1), 실제 개체군이 서식하고 있는 부근인 잎 뒷면 온도는 대기 중 온도가 높아져서 발육이 느려지는 범위에서도 최적 온도에 가까운 값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3 and Table 1). 이러한 잎 뒷면 미기상 최고 온도의 분포는 실제 온실에서 기존의 대기 중 온도를 이용한 밀도 변동 예측이 틀릴 수 있는 것을 보여주는 증거이며, 실제 시설 원예에서 한여름 매우 높은 온도 범위에서도 해충 개체군 밀도가 지속적으로 증가하는 원인이다 (Fig. 3).

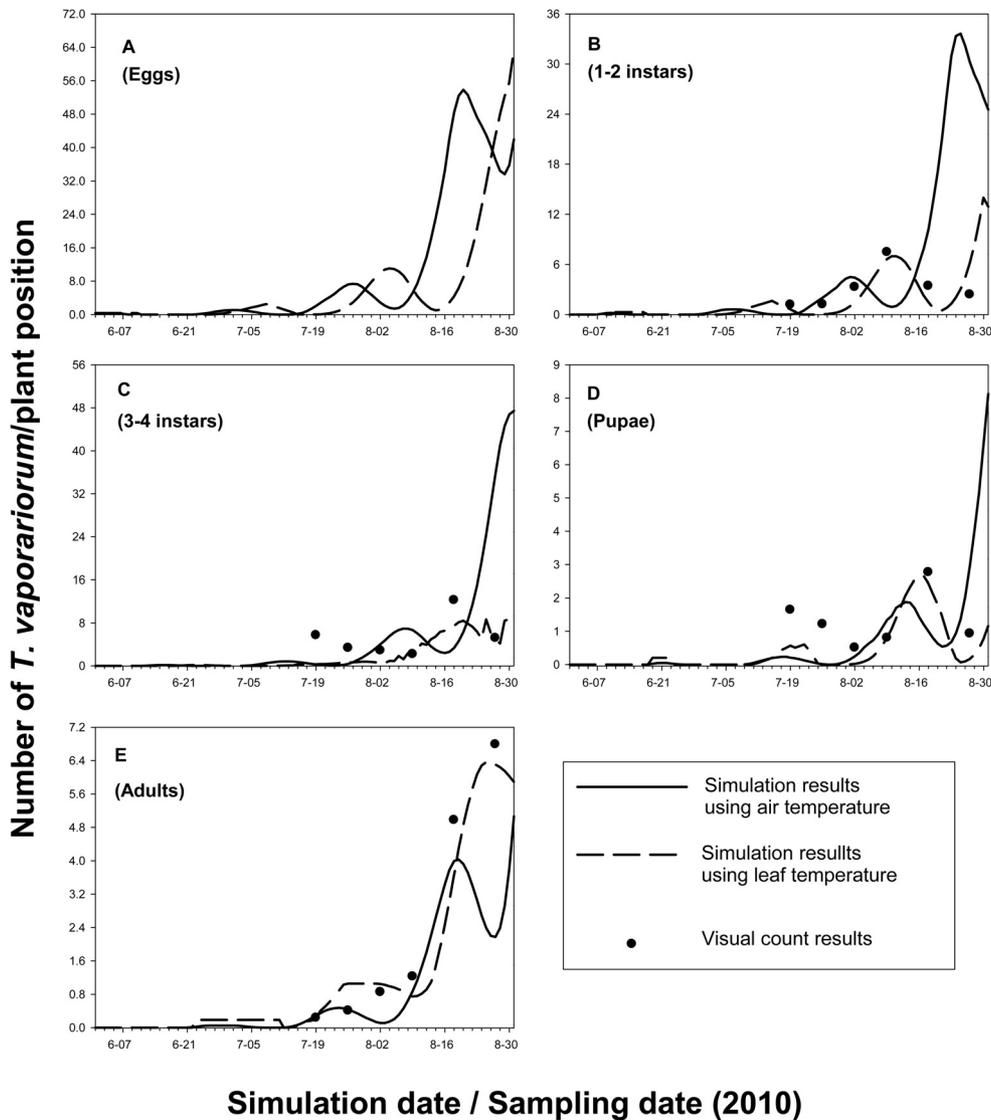


Fig. 4. DYMEX simulation results of eggs (A), 1 - 2 instars (B), 3 - 4 instars (C), pupae (D), and adults (E) number per plant position with air (solid line), leaf temperatures (dashed line) and actual counts (closed circle) per plant position.

DYMEX를 이용한 알, 1-2령충, 3-4령충, 번데기, 성충의 밀도 변동 모의 실험 결과는 Fig. 4로 정리하였다. 본 모의 실험은 초기 밀도가 산란되어 부화한 알 100마리였으며, 3개월간의 모의 실험 결과, 알은 최대 150배 이상 증가하였으며, 다른 발육태도 이입후 10일 정도 지나서 관찰되기 시작하여, 3주 후인 6월 21일경에 최초로 성충으로 우화하는 개체가 나오기 시작했다. 대기 온도의 급격한 변화에 의해 대기 중 온도에 따른 온실가루이 밀도의 변동은 모의 실험 후반부로 갈수록 급격하게 되었는데, 미세 기상 온도의 변화에 따른 밀도의 변동은 부드럽게 증감을 반복하며 꾸준한 밀도 증가 패턴을 보이고 있었다(Fig. 4). 이것은 식물체의 위치별 대기 중 최대 온도의 급격한 변화와는 다르게, 식물체의 위치별 앞 뒷면 온도 변동이 급격한 변화가 없었기 때문으로 설명할 수 있다(Fig. 3). 식물체의 위치별 대기 중 최대 온도가 앞 뒷면 최대 온도보다 높아서 생기는 온일도의 변화에 의해(Fig. 3), 모의 실험이 진행되었던 3개월간 온실가루이 개체군 밀도 변동은 대기 중 온도를 기반으로 한 경우보다 앞 뒷면 온도를 기반으로 하는 경우 상대적으로 느린 밀도의 증감 패턴을 보였다(Fig. 4). 하지만, 모의 실험 후기에 동시에 진행된 온실가루이 육안 조사 결과와 비교해 보았을 때, 육안 조사가 불가능했던 알을 제외한 모든 발육태에서, 육안 조사 밀도 증감 결과는 앞 뒷면 온도를 기반으로 하는 모의 실험 결과와 그 변동 패턴이 매우 유사함을 알 수 있었다(Figs. 4B-E). 육안 조사 결과와 육안 조사 시기의 모의 실험 결과 밀도간 상관 관계 분석은 Table 4에 정리하였다. 육안 조사한 각 태별 밀도와 대기 중 온도를 이용한 모의 실험 결과간 상관 계수는 성충을 제외하고는 모두 음의 상관 관계를 보여서 서로 상관 관계가 없는 것으로 나타났으나, 앞 뒷면 온도를 이용한 모의 실험 결과간 상관 계수는 모두 양의 상관 관계를 보였다. 성충의 육안 조사 결과와 대기 중 온도를 이용한 모의 실험 결과만 양의 상관 관계($r = 0.82$)를 보였으나, 앞 뒷면 온도를 이용한 결과는 보다 높은 양의 상관 관계($r = 0.98$)를 보였다(Table 4). 성충의 경우, 온실가루이 전 연령태 중에서 알에서 부화한 직후 보이는 'crawler'를 제외하고 이동이 가능한 점을 감안한다면

(van Roermund and van Lenteren, 1992) 대기 중 온도의 영향을 받을 확률이 다른 유충태보다 높다. 하지만, Fig. 4E에서 보이는 온실가루이 성충의 밀도 증감 패턴은 대기 중 온도를 이용한 모의 실험 결과보다는 앞 뒷면 온도를 이용한 모의 실험 결과와 동일한 증감 패턴을 모의 실험 후반부에 보여주고 있다(Fig. 4E). 온실가루이 성충의 육안 조사 밀도 변동 패턴과 모의 실험 밀도 변동 패턴의 유사함과 상대적으로 높은 양의 상관 관계는 온실가루이 성충 역시 대기 중 온도보다 앞 뒷면 온도에 영향을 많이 받고 있다는 것을 보여주는 증거이다. 따라서 실제 줄내림 방식의 방울 토마토 온실에서 해충인 온실가루이의 밀도 변동 패턴에 영향을 주는 온도 조건은 대기 중 온도가 아닌 앞 뒷면 온도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다(Table 4 and Figs. 4B-E). 또한 본 연구에서 온실가루이 각 태별 위치에 따라 다른 앞 뒷면 온도 조건을 사용함으로써 보다 정확한 밀도 변동 패턴을 예측할 수 있었으며, 이러한 결과는 미기상 온도 조건의 이해가 온실 내 방울토마토의 해충 방제를 위해 매우 중요하다는 것을 반증하고 있다(Figs. 3 and 4).

해충과 관련하여 영향을 주는 미기상 인자는 온도, 습도, 풍속 및 방사로 요약될 수 있다(Ferro et al., 1979). 환경의 인위적인 조작에 의한 온실 내 기상 조건(macroclimate)의 조절은 전체적으로 농작물의 최적 생육을 유도하는 방향으로 발전하였으며, 이와 관련된 식물병, 해충의 방제 역시 대기 중 온도를 기준으로 실시되어 왔다(Rosenberg et al., 1983). 온실 내 해충의 밀도 변동을 모의 실험하는 경우, 해충 개체군의 온도-발육 관계에서 가장 많은 영향을 주게 되는 것은 일 중 최대, 최저 온도가 된다(Wagner et al., 1984). 일 중 최저 온도는 앞 표면 온도와 대기 중 온도의 차이가 없으므로(MRI-KMA, 1990), 시설 온실에서 해충 개체군의 온도-발육에 영향을 줄 수 있는 미기상 인자는 일 중 최고 기온을 보이는 시기의 앞 뒷면 온도가 된다. 본 실험에서 일 중 앞 뒷면 최고 온도는 온실 내 대기 중 최고 온도보다 낮게 유지되고 있었다(Fig. 3). 특히 한여름 대기 중 최대 온도는 온실가루이 개체군의 발육을 저하시키는 범위(> 30°C; Table 2)에 머무르고 있음에도 불구하고, 실제 온실가루이

Table 4. Correlation coefficients (r) between the actual and the predicted numbers of *Trialeurodes vaporariorum*² with a variable of air or leaf temperature for DYMEX simulation in a cherry tomato greenhouse.

Temperature	<i>T. vaporariorum</i> stage			
	1 - 2 instars	3 - 4 instars	Pupae	Adults
Air	-0.15 (0.78) ^y	- 0.04 (0.94)	- 0.11 (0.84)	0.82 (0.05)
Tomato leaf	0.69 (0.13)	0.78 (0.07)	0.88 (0.02)	0.98 (< 0.01)

²The egg stage of greenhouse whitefly in greenhouse was not counted due to its small size.

^yValue in parenthesis is the probability that correlation coefficient is zero.

의 생활이 이루어지는 잎 뒷면 온도는 오히려 발육에 가장 적절한 정도의 온도로 유지되고 있었다(Table 2 and Fig. 3). 이러한 결과는 Ferro et al.(1979)가 발표한, 실제 식물체의 잎, 줄기 등의 온도 차이와 같은 결과이다. 본 실험 결과 발육이 매우 느려지고, 사망률이 매우 높아지는 30°C 이상 대기 중 온도 영역에서 예상되는 온실가루이 개체군의 매우 낮은 발육율과 높은 사망률은 실제 온실가루이 개체군이 존재하고 살아가는 식물체 잎 뒷면 온도가 발육 최적 온도에 근사하므로, 실제 시설내 해충인 온실가루이의 밀도는 대기 온도의 급격한 변화에 크게 영향을 받지 않게 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 해충 개체군의 밀도 변동 추정을 위한 모의 실험에 사용되는 온도 자료는 서식하는 곳의 온도 자료를 사용하는 것이 상대적으로 더욱 정확하다(Tables 2 and 4, Figs. 3 and 4). 초기 온실가루이 이입과 산란을 가정하여 본 DYMEX 모의 실험 결과 온실가루이 개체군의 밀도 변동 패턴과 실제 포장에서 육안 조사 밀도 변동 패턴을 비교하여 그 상관 관계를 살펴본 결과, 실제 포장에서 실시한 육안 조사 밀도 자료는 대기 중 온도가 아닌, 식물체 잎 뒷면 온도를 사용한 모의 실험 결과에서 도출된 밀도 자료와 매우 높은 상관 관계를 가지며, 유사한 밀도 변동 패턴을 보이고 있었다(Table 4 and Figs. 4B-E). 방울토마토 온실 재배에서, 여름을 기준으로 하면, 육묘에서 수확시기까지 80일-110일이다(RDA, 2001). 본 모의 실험 결과 매우 낮은 밀도 일지라도 이입이 초기에 이루어진다면, 각 세대마다, 실험 결과에 의한 온도 변동에 따른 밀도가 암컷 성충의 경우 10배 정도 증가하므로(Tables 2 and 3), 방울토마토 수확 시기에 커다란 문제로 작용하게 될 가능성이 매우 높음을 알 수 있었다(Fig. 4). 따라서 온실가루이의 적절한 방제를 위해 초기에 이입되는 온실가루이의 모니터링과 온도 변동에 따른 밀도 변동 예측은 매우 중요하게 된다. 온실가루이의 밀도 변동은 육안 조사 밀도 변동과 각 온도 조건별 밀도 변동과 상관 분석하였을 때, 대기 중 온도가 아닌 실제 서식하는 장소인 방울토마토 잎 뒷면 온도에 의한 밀도 변동 모의 실험과 높은 양의 상관 관계가 있었고(Table 4), 밀도 변동 패턴 역시 이를 뒷받침해 주었다(Figs. 4B-E). 이러한 실험적이고 분석적인 사실에 비추어 볼때, 초기에 온실가루이의 이입모니터링에 의한 밀도 변동 예측을 위한 온도 조건은 온실가루이가 서식하는 장소인 방울토마토 잎 뒷면 온도로 하는 것이 보다 정확한 예측을 위한 선택이 된다.

본 실험 결과 시설 내 해충 방제 전략 수립을 위한 온도-발육 모형의 개발 및 적용은 일반적인 대기 온도보다는 실제 해충 개체군의 서식 장소 온도를 기준으로 하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 따라서 해충 개체군에 직접적인 영

향을 미치는 서식 장소 온도 조건의 이해는 시설 내 해충 방제 전략 수립에 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 제시한 미기상 온도와 더불어 Ferro et al.(1979)과 Rosenberg et al.(1983)이 언급한 습도, 풍속, 방사 등 다른 미기상 인자에 대한 합리적 제어 연구가 필요할 것이며, 또한 토양 이외의 인공 생육 시스템(Fukumoto et al., 2010)도 포함한 연구와 더불어, 시설 내 식물의 생육 및 병, 해충 관련 연구와 맞물린 종합적인 방제 대책 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

초 록

방울토마토(*Lycopersicon esculentum* cv. Koko) 재배 온실에 피해를 주는 온실가루이 개체군(*Trialeurodes vaporariorum* (Westwood))의 온도 발육 모형과 암컷 성충 산란 모형을 작성하여 시설 내 대기 중 온도와 미기상 온도인 잎 뒷면 온도를 적용한 DYMEX 프로그램(호주 CSIRO에서 개발한 미리 탑재된 모듈들을 사용하는 모의 실험 프로그램)으로 밀도 변동을 모의 실험하였다. 온도에 따라 상이한 발육 기간과 산란수를 각각 표준화시킨 발육 완료 분포 모형과 연령 특이적 산란수와 생존율을 비선형 회귀 모형에 적합시켜 밀도 변동 모의 실험을 하였다. 실제 줄내림 방식의 방울 토마토에서 토마토 식물체를 3위치(상단: 지상 1.6m 이상, 중단: 지상 0.9-1.2m 사이, 하단: 지상 0.3-0.5m 사이)로 나누어 각 위치별로 온실 내 대기 중 온도와 잎 뒷면 온도를 기록하였다. 온실 내 대기 중 온도와 잎 뒷면 온도간의 상관 관계를 비선형 회귀로 적합하여, 온실 내 미기상 온도 자료를 만들었다. 온실 내 미기상 온도 자료인 잎 뒷면 최대 온도는 대기 중 최대 온도보다 항상 낮게 유지되고 있었으며, 하단, 중단, 중단의 순으로 온도가 낮아지는 현상을 보였다. 모의 실험을 위한 시기와 초기 이입 밀도의 설정은 황색 점착 트랩을 이용하여 실제 온실에서 이입되는 시기(6월초)에 유인된 암컷 성충 10마리를 사용하였다. 온실 내 대기 중 온도 자료와 잎 뒷면 온도 자료를 각각 이용하여 온실가루이 유충의 발육 모형과 성충의 산란 모형을 DYMEX 프로그램으로 모의 실험하였다. 모의 실험 결과 검증을 위해 대기 중 온도와 잎 뒷면 온도를 조사한 온실에서 토마토 식물체 3위치별, 각 태별 온실가루이 밀도의 육안 조사도 실시하였다. 알의 경우 크기로 인해 육안 조사 대상에서 제외되었다. 육안 조사 결과와 육안 조사 시기의 DYMEX 모의 실험 결과값을 상관 분석하였다. 육안 조사 온실가루이 밀도와 잎 뒷면 온도를 이용한 모의 실험 결과 밀도가 모든 발육태에서 항상 양의 상관 관계를 보였다. 육안 조사 결과 밀도 변동 패턴도

방울토마토 잎 뒷면 온도를 이용한 모의 실험 결과 밀도 변동 패턴과 유사하였다. 본 연구 결과 방울토마토 온실에서 온실가루이 개체군 밀도 변동의 적절한 예측을 위해서는 잎 뒷면 온도를 고려해야 하는 것으로 나타났다.

추가 주요어 : 성충 산란 모형, 가루이과, DYMEX 모의실험, 온실 내 미기상 온도 조건, 개체군 발생 모형, 온도 발육 모형

인용문헌

- 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.
- Brown, J.K. 1990. An update on the whitefly-transmitted geminiviruses in the Americas and Caribbean Basin. *FAO Plant Prot. Bull.* 39:5-23.
- Byrne, D.N., P.K. Von Brezttel, and C.J. Hoffman. 1986. Impact of trap design and placement when monitoring for the bandedwing whitefly and the sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *Environ. Entomol.* 15:300-304.
- Campbell, C.L. and L.V. Madden. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. Wiley Interscience, N.Y.
- Choi, K.M., S.B. Ahn, W.S. Cho, S.H. Lee, S.C. Han, and M.H. Lee. 1991. The illustrated guide to Korean vegetable insect pests. NongJinHoe, Suwon, Korea.
- 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. Amer. J.* 69:2045-2057.
- Evert, C. van and H. Schutte. 1983. Enige aspecten van de biologie van *Trialeurodes vaporariorum* en *Encarsia formosa*. M. Sc. Thesis, University of Leiden, The Netherlands.
- Ferro, D.N., R.B. Chapman, and D.R. Penman. 1979. Observations on insect microclimate and insect pest management. *Environ. Entomol.* 8:1000-1003.
- Fukumoto, Y., K. Hashizume, and Y. Nishimura. 2010. Development of supply system of microbubble ozonated water in agriculture. *Hort. Environ. Biotechnol.* 51:21-27.
- Jandel Scientific. 1996. TableCurve 2D. Automated curve fitting and equation discovery: version 4.0. Jandel Scientific, San Rafael, C.A.
- Kim, D.-S. and J.-H. Lee. 2010. A population model for the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae), in a Korean orchard system. *Ecol. Model.* 221:268-280.
- 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.
- 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.
- Maywald, G.F., D.J. Kriticos, R.W. Sutherst, and W. Bottomley. 2007. DYMEX model builder version 3: User's guide. Hearne Scientific Software Pty. Ltd., Melbourne, Australia.
- Meteorological Research Institute - Korea Meteorological Administration (MRI-KMA). 1990. Simulation of the greenhouse and plant canopy microclimates (I) - Studies on the meteorological elements and heat fluxes. MRI-KMA, Seoul, Korea.
- Meteorological Research Institute - Korea Meteorological Administration (MRI-KMA). 1991. Simulation of the greenhouse and plant canopy microclimates (II). MRI-KMA, Seoul, Korea.
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF). 2002. Development of expert system for commercial greenhouse insect pest. MIFAFF, Seoul, Korea.
- Muniyappa, V. 1980. Whiteflies, p. 39-85. In: K.F. Harris and K. Maramerosch (eds.). *Vectors of plant pathogens*. Academic press, N.Y.
- Nechols, J.R. and M.J. Tauber. 1977. Age-specific interaction between the greenhouse whitefly and *Encarsia formosa*: Influence of host on the parasite's oviposition and development. *Environ. Entomol.* 6:143-149.
- Osborne, L.S. 1982. Temperature-dependent development of greenhouse whitefly and its parasite *Encarsia formosa*. *Environ. Entomol.* 11:483-485.
- Paravisani, L. 1981. Influenza delle temperature sui rapporti ospite-parassita in *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) in *Encarsia formosa* Gahan. *Mem. Soc. Ent. Ital. Genova* 60:299-303.
- Park, J.-J., J.-H. Lee, K.-I. Shin, S.E. Lee, and K. Cho. 2011. 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.-I. Shin, and K. Cho. 2004. Evaluation of data transformations and validation of a spatial model for spatial dependency of *trialeurodes vaporariorum* populations in a cherry tomato greenhouse. *J. Asia Pac. Entomol.* 7:289-295.
- Park, M.K., I.G. Kim, Y.H. Song, J.-H. Lee, K.-I. Shin, and K. Cho. 2009. Effect of nitrogen levels of two cherry tomato cultivars on development, preference and honeydew production of *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae). *J. Asia Pac. Entomol.* 12:227-232.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad, and S.B. Verma. 1983. *Microclimate: The Biological Environment*. Wiley, N.Y.
- Rural Development Administration (RDA). 2001. *Tomato cultivation*. RDA, Suwon, Korea.
- SAS Institute. 1995. *SAS user's guide*, 6.13 ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Southwood, T.R.E. 1978. *Ecological methods*. 2nd ed. Chapman and Hall, London.
- van Lenteren, J.C. 1989. Modelling population growth of greenhouse whitefly. *Agricultural University Wageningen Papers* 89-2.
- van Roermund, H.J.W. and J.C. van Lenteren. 1992. The parasite - Host relationship between *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae) and *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae) XXXIV. Life-history parameters of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* as a function of host plant and temperature. *Agricultural University Wageningen Papers* 92-3.

- 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. Amer.* 77:208-225.
- Weber, H. 1931. Lebensweise und Umweltbeziehungen von *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hymenoptera: Aleyrodina). Erster Beitrag zu einer Monographie dieser Art. *Zoomorphology* 23:575-753.
- Weibull, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.-T. ASME* 18:293-297.
- Willmer, P.G. 1982. Microclimate and the environmental physiology of insects, p. 1-57. In: M.J. Berridge, J.E. Treharne, and V.B. Wigglesworth (eds.). *Advances in insect physiology*. Vol. XVI. Academic Press, N.Y.