

## 적엽작업을 반영하기 위한 시설토마토 생육모형(GreenTom) 개선 및 검증

김연욱<sup>1</sup> · 김진현<sup>2</sup> · 이변우<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농업생명과학연구원, <sup>2</sup>국립원예특작과학원 시설원예연구소, <sup>3</sup>서울대학교 식물생산과학부  
(2019년 12월 6일 접수; 2019년 12월 19일 수정; 2019년 12월 20일 수락)

## Improving and Validating a Greenhouse Tomato Model “GreenTom” for Simulating Artificial Defoliation

Yean-Uk Kim<sup>1</sup>, Jin Hyun Kim<sup>2</sup> and Byun-Woo Lee<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Haman 52054, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Plant Science, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

(Received December 6, 2019; Revised December 19, 2019; Accepted December 20, 2019)

### ABSTRACT

Smart-farm has been spreading across Korea to improve the labor efficiency and productivity of greenhouse crops. Although notable improvements have been made in the monitoring technologies and environmental-controlling systems in greenhouses, only a few simple decision-support systems are available for predicting the optimum environmental conditions for crop growth. In this study, a tomato growth model (GreenTom), which was developed by Seoul National University in 1997, was calibrated and validated to examine if the model can be used as a decision-supporting system. The original GreenTom model was not able to simulate artificial defoliation, which resulted in overestimation of the leaf area index in the late growth. Thus, an algorithm for simulating the artificial defoliation was developed and added to the original model. The node development, leaf growth, stem growth, fruit growth, and leaf area index were generally well simulated by the modified model indicating that the model could be used effectively in the decision-making of smart greenhouse.

**Key words:** Tomato, Growth model, Defoliation, Smart-farm

### I. 서 언

우리나라에서 토마토(*Solanum lycopersicum*)는 과

채류 생산량의 20.7%(39만톤)를 차지하며, 재배면적이 꾸준히 증가하고 있는 주요 원예작물이다(Lee and Kim, 2017). 현재 토마토 재배면적은 6,000ha 정도이



\* Corresponding Author : Byun-Woo Lee  
(leebw@snu.ac.kr)

며 대부분이 시설에서 재배되고 있다(KOSIS, 2019). 이와 같은 중요성에도 불구하고 국내 토마토 생산성은 낙후된 시설과 여름철 고온 및 연작장해 등으로 인해 농업선진국으로 알려진 네덜란드의 54%에도 미치지 못하는 것으로 알려져 있다(Jeon, 2011; MAFRA, 2014; Yeo *et al.*, 2016). 이에 따라 농촌진흥청은 노동력과 농자재의 사용은 줄이면서 온실의 생산성과 시설 자재의 품질을 제고하기 위한 ‘스마트팜 기술 국산화·표준화’ 프로젝트를 추진하고 있는 중이다.

스마트팜은 온실 내 환경과 작물의 생육상태를 모니터링하여, 작물에게 최적화된 생육환경을 모의한 뒤, 온실의 환경을 최적상태로 제어 및 관리하는 시스템이다. 하지만 실제 이용 가능한 국내 스마트팜 서비스는 온실 내 환경 모니터링과 단순한 제어기 구동 등에 한정되어 있다. 즉, 국내 스마트팜의 제한요인은 센서로부터 수집된 자료들을 이용한 의사결정 시스템의 부재라고 볼 수 있다(Baek *et al.*, 2018; Yeo *et al.*, 2016).

작물의 생육은 온실 내의 광량, 기온, 습도, 이산화탄소 농도 등 다양한 환경요소들과 작물의 현재 생육 상태에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, 단편적인 환경반응식을 토대로 한 의사결정(임계값 설정에 따른 제어)에는 한계가 있다. 이에 반해 작물생육모형은 다양한 환경요소들의 생리학적 영향을 복합적으로 고려하여 시계열적 작물생육을 모의하기 때문에 스마트팜에서의 의사결정도구로서 활용가치가 크다고 볼 수 있다.

외국에서 개발된 시설토마토 생육모형으로는 TOMGRO (Jones *et al.*, 1991), TOMSIM(Bertin and Heuvelink, 1993), HortSyst(Martínez-Ruiz *et al.*, 2019) 등이 있으며, 국내에서는 1997년 농림부 과제를 통해 서울대에서 개발한 GreenTom(Ministry of Agriculture, 1997)이 있다. 위의 생육모형들을 활용하기 위해서는 국내 재배 품종의 모수를 추정한 뒤 추정된 모수를 이용하여 모형의 성능을 검증을 하여야 하지만 아직까지 이와 같은 국내 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 국내에서 개발한 GreenTom 모형에 대한 ‘데프니스’ 품종의 모수를 추정하고 모형 성능을 검증하여 본 모형의 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 또한, 기존 GreenTom모형은 온실 농가에서 흔히 행해지는 적엽과 같은 재배관리를 모의하지 않기 때문에, 적엽 알고리즘을 개발하여 본 모형에 추가한 뒤 알고리즘의 적절성을 평가하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. GreenTom 모형

본 연구에 이용된 토마토 생육모형 GreenTom은 TOMGRO와 TOMSIM의 장점을 취합하여 만든 모형으로 시설 토마토재배 최적환경을 구현하기 위해 개발되었다. TOMGRO의 장점은 토마토 발육을 매우 상세히 모의한다는 것이며, TOMSIM의 장점은 비교적 다양한 조건에서 토마토의 물질생산과 생장을 모의할 수 있다는 것으로, GreenTom의 토마토 기관 분화 및 발육과 물질생산은 각각 TOMGRO와 TOMSIM의 변형으로 구성되어 있다.

GreenTom은 토양수분, 식물영양, 병충해관리가 최적수준으로 관리되는 조건에서 토마토의 생장 및 발육속도가 온실의 기온, 습도, 일사량, CO<sub>2</sub> 농도에 의해 지배되는 것으로 가정하고 있다. 출엽, 화방의 형성, 과실의 성숙 등의 발육속도는 기온을 이용하여 일별로 계산되며, 분화된 기관들의 발육속도는 age class에 따라 계산된다. 이때, 하나의 age class는 화방이 붙어 있는 마디의 위 한 마디와 아래 두 마디에 속하는 엽, 줄기, 과실로 구성된다. 각 기관의 일별 생장률은 (i) 시간별 광합성량을 계산하여 일 단위로 적산하고, (ii) 각 기관(엽, 줄기, 과실, 뿌리)의 sink strength를 계산하여, (iii) 기관별 sink strength비에 따라 축적된 동화산물이 분배되도록 하여 계산된다. 토마토의 생장 및 발육은 위의 과정을 생육기간에 걸쳐 반복하여 일별 발육속도 및 생장률을 적산하여 모의된다.

### 2.2. 적엽 모의

기존 GreenTom 모형은 적엽을 모의하지 않기 때문에, 정확한 지상부 모의가 불가능하였다(Fig. 3a). 이를 해결하기 위해 Fig. 1과 같은 적엽 알고리즘을 기존 GreenTom모형에 추가하였다. 엽면적지수(LAI)가 사용자가 설정한 적엽시점의 엽면적지수(DEFLAI)보다

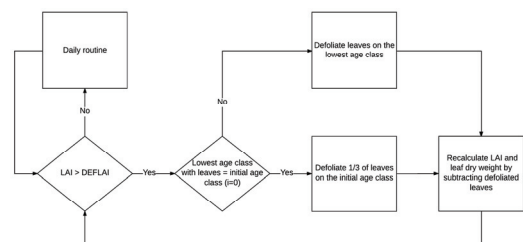


Fig. 1. Schematic of defoliation simulation.

커질 경우 적엽이 이루어지도록 설계되었으며, 적엽이 반영된 엽면적지수가 DEFLAI보다 작아질 때까지 하위엽부터 제거하도록 하였다. 적엽의 기본단위는 age class로 하였으나, 첫번째 age class의 경우에는 10개 정도의 마디를 포함하고 있기 때문에 세번에 걸쳐 제거하도록 하였다.

**2.3. 모형의 모수 추정**

본 연구에서 이용된 토마토는 ‘데프니스’ 생식용 품종(유립종)으로, 모형 구동을 위한 품종모수는 2016~2017년 시설원예연구소(함안)에서 수행된 관형 수경재배 실험자료(A4)를 이용하여 추정하였다(Table 1). 모형 구동을 위한 기상자료로는 1시간 간격의 기온, 일사, 상대습도 자료가 이용되었다. 모수 추정에는 simplex방법(Nelder and Mead, 1965)을 이용하였으며, 목표형질의 normalized root mean square error [NRMSE, Eq. 1]가 최소가 되는 값을 모수로 설정하였다. 모수 추정에 이용된 목표형질은 Table 2와 같다. 단, 최대, 최소 비엽면적(SLAMX, SLAMN)과 첫 화방의 마디위치(FTRSUN) 등과 같이 관측치를 모수로 적용할 수 있는 경우 관측치를 모수로 설정하였으며, 품종간 변이가 적은 것으로 사료되는 모수들은 기존 품종들(Momotaro, Arletta, Seokwang)과 동일한 값으로 설정하였다. 온도(RDVLVT, RDVFRT, GENTEM)와 발육단계(POL, POF)에 따른 발육속도 및 생장률에 대한 모수는 simplex기법을 이용하여 추정하였으

며, 목표형질은 기관별 건물중과 엽면적지수로 설정하였다.

$$NRMSE = \frac{100}{\sigma} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (Eq. 1)$$

여기서  $\sigma$ ,  $n$ ,  $P_i$ ,  $O_i$ 는 각각 관측치의 표준편차, 비교자료의 수, 모의치, 관측치를 의미한다.

**2.4. 모형의 성능 평가**

다양한 환경조건에서 본 모형의 성능을 검증하기 위해 시설원예연구소에서 수행된 다양한 환경실험자료들(탄산가스시비 및 온도 실험)을 이용하였다(Table 1). 모형의 성능 검증은 생물계절(마디수와 화방수)과 생육(엽면적지수, 엽중, 경중, 과실중)에 대하여 결정계수( $R^2$ )와 Nash-Sutcliffe model efficiency[NSE, Eq. 2] (Nash and Sutcliffe, 1970)를 이용하여 이루어졌다. 엽면적지수는 기존 GreenTom 모형과 적엽 알고리즘을 추가한 모형을 비교 검증하여, 적엽 알고리즘의 적절성을 판단하였다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2} \quad (Eq. 2)$$

여기서  $\bar{O}$ ,  $n$ ,  $P_i$ ,  $O_i$ 는 각각 관측치의 평균, 비교자료의 수, 모의치, 관측치를 의미한다.

**Table 1.** Experiments used for model calibration and validation

Experiment	Description	Sampling period	Use
A4	Conventional culture	08/12/2016 ~ 01/12/2017	Calibration
A5-1	CO <sub>2</sub> fertilization (600ppm)	08/24/2016 ~ 01/12/2017	Validation
A5-2	GNP heating	08/24/2016 ~ 01/12/2017	Validation
A6-2	Temperature (21°C)	11/25/2016 ~ 02/02/2017	Validation
A6-5	Temperature (16°C)	11/25/2016 ~ 02/02/2017	Validation
A6-8	Temperature (11°C)	11/25/2016 ~ 02/02/2017	Validation

**III. 결과 및 고찰**

관형 수경재배 실험자료(A4)를 이용하여 추정한 ‘데프니스’ 품종의 모수는 Tables 2-4와 같다. FTRUSN, GENRAT, GENTEM, TPL 등은 엽과 화방의 마디 분화속도를 결정하며, RDVLVT와 RDVFRT는 분화한 엽과 과실의 발육속도를 결정한다. 이 외의 모수는 광합성과 동화산물 분배 등의 생육 모의에 이용된다.

**3.1. 식물계절의 모의 성능**

Fig. 2에 나타난 바와 같이 본 모형은 다양한 환경조건에서 토마토의 마디분화를 잘 모의하는 것으로 판단되었다( $R^2 > 0.9$ ). A6-2와 A6-5 실험의 생육후기에서는 모형이 마디 수를 다소 과대평가하고 있는 것으로

**Table 2.** Calibrated genetic coefficients of Dafnis

Parameter	Estimate	Estimation method	Objective characteristics	Description	Unit
ABORMX	0.24	Simplex	Number of fruits	Maximum ratio of fruit abortion	-
FRLG	6.0	Observed value	Number of nodes initiated between the first truss appearance and fruit set	Number of nodes initiated between the first truss appearance and fruit set	nodes
FRPT	0.32	Simplex	Dry weight of organs, LAI	Ratio of petiole weight to leaf blade weight	-
FRST	0.54	Observed value	Ratio of stem dry weight to leaf dry weight	Ratio of stem segment to leaf growth rate	-
FTRUSN	10.0	Observed value	Node number initiating the first truss	Node number initiating the first truss	node
GENRAT	0.59	Simplex	Node number	Maximum rate of node initiation	nodes/day
GRES	0.75	Fixed value	-	Growth efficiency	gDM/gCH <sub>2</sub> O
KDF	0.68	Fixed value	-	Extinction coefficient for diffuse PAR	-
Q10	2.0	Fixed value	-	Temperature coefficient for maintenance respiration	-
RM	250	Fixed value	-	Mesophyll resistance	s/m
RMRF	0.01	Fixed value	-	Maintenance respiration coefficient for fruit	gCH <sub>2</sub> O/gDM/day
RMRL	0.03	Fixed value	-	Maintenance respiration coefficient for leaf	gCH <sub>2</sub> O/gDM/day
RMRS	0.15	Fixed value	-	Maintenance respiration coefficient for stem	gCH <sub>2</sub> O/gDM/day
SLAMN	0.057	Observed value	Specific leaf area	Minimum specific leaf area	m <sup>2</sup> /g
SLAMX	0.012	Observed value	Specific leaf area	Maximum specific leaf area	m <sup>2</sup> /g
TPL	0.33	Fixed value	Numbers of leaves and trusses	Ratio of new fruiting trusses to new leaves	trusses/leaves

나타났다(Fig. 2a). 이는 위 두 실험에서 수행된 적심을 본 모형이 모의하지 않아 생긴 오차로 판단되며, 추후 적심 알고리즘을 개발하여 본 모형에 추가하는 작업이 필요할 것으로 사료된다. 적심은 식물체 원줄기의 발달을 정지시켜 이미 분화된 기관으로의 동화산물 분배를 증가시키고 측지의 발달을 촉진하는 것으로 알려져 있으나(Seo *et al.*, 2006; Shishido *et al.*, 1990), 일반적으로 온실 농가의 토마토 재배에서는 측지를 제거해 주므로(Heuvelink, 2005), 적심이 원줄기 내에서의 동화산물 분배에 미치는 영향을 정량화하는 재배실험이 선행되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 본 모형은 화방

수를 다소 과대평가하는 경향을 보였는데(Fig. 2b), 이는 관측치와 고정된 품종모수 간의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 모든 실험에서 첫 화방의 마디위치(FTRUSN, 10)와 엽(마디)당 화방수(TPL, 0.33)로 고정된 값이 이용되었지만 관측값에서는 변이가 존재하였다. 따라서 FTRUSN과 TPL을 조정할 경우 높은 설명력( $R^2 = 0.97$ )뿐 아니라 향상된 모델효율성(NSE)을 보일 것으로 사료된다. 마디수에 대한 예측력과 마찬가지로 모형에 적심 알고리즘을 반영할 경우 화방수에 대한 생육후기 예측력도 향상될 것으로 판단된다.

**3.2. 생육 모의 성능**

Fig. 3에 나타난 바와 같이 기존 모형은 적엽이 이루어진 실험에서 생육후기 엽면적을 과대추정하는 경향을 보였으나, 적엽 알고리즘을 추가한 모형은 생육후기까지도 엽면적 변화를 비교적 정확하게 모의하여 적엽 알고리즘의 적절성을 확인할 수 있었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 본 모형은 다양한 환경조건에서 토마토 기관별 생육을 대체적으로 잘 설명할 수 있는 것으로 판단되었다. 모형의 생육후기 엽중 예측력은

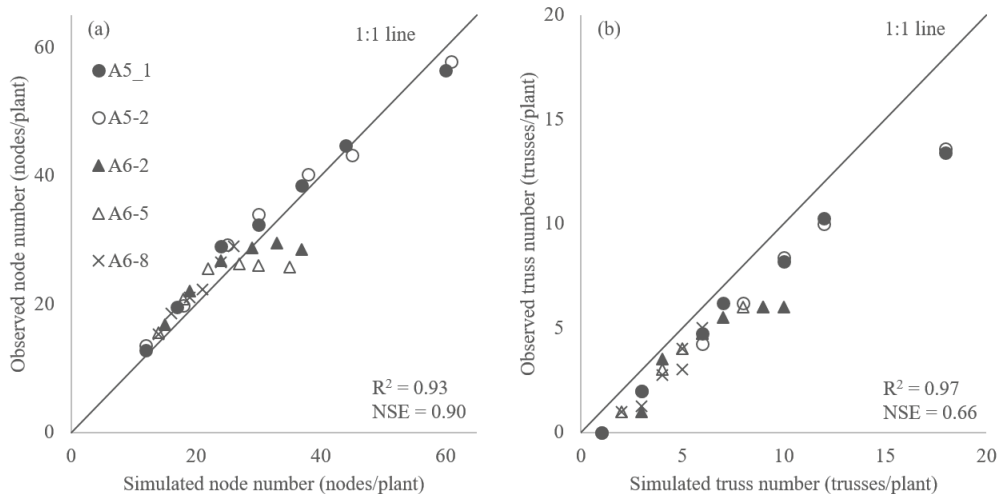
**Table 3.** Temperature functions for node initiation(GENTEM), leaf development/aging rates(RDVLVT) and fruit development/aging rates(RDVFRT) of Dafnis

Temperature (°C)	GENTEM	RDVLVT (1/days)	RDVFRT (1/days)
9	0	0	0
12	0.53	0.014	
15		0.019	0.012
18			0.029
21		0.028	0.036
24			0.057
28	1.00	0.037	0.057
38		0.037	0.035
50	0	0	0

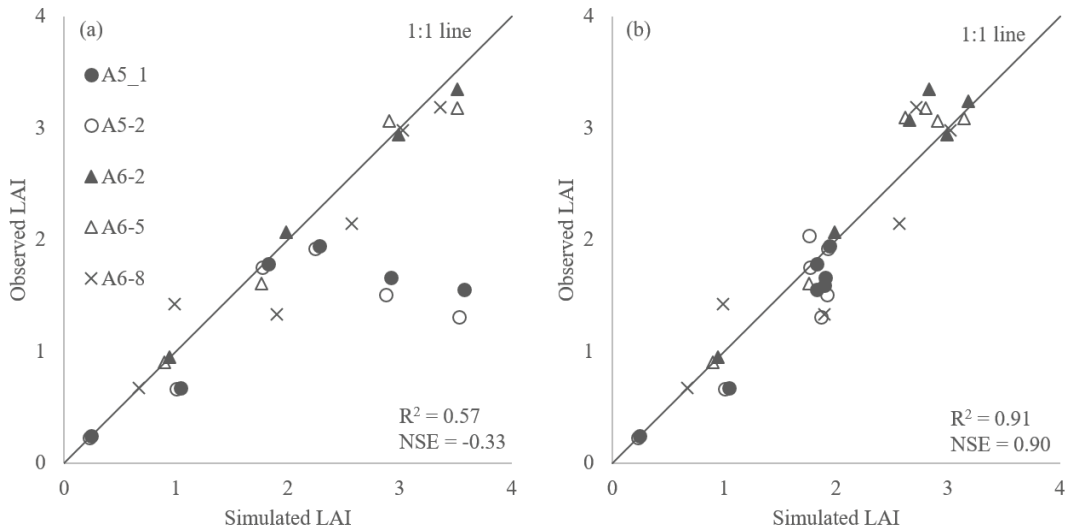
생육초기에 비해 감소하였는데(Fig. 4a), 이는 적엽일정 및 적엽량에 대한 정보 부족과 모형의 비엽면적 모의력 부족에 기인하는 것으로 사료된다. 비엽면적은 광도, 온도, CO<sub>2</sub> 농도 등의 환경요소와 계절 및 생육단계에 따른 변이가 큰 것으로 알려져 있어(Heuvelink, 1996), 추가적인 재배실험을 통해 모형을 개선할 필요가 있는 것으로 판단된다. 과실중은 source/sink 비에

**Table 4.** Potential leaf area expansion rate(POL) and potential fruit growth rate (POF) of Dafnis as functions of percent development

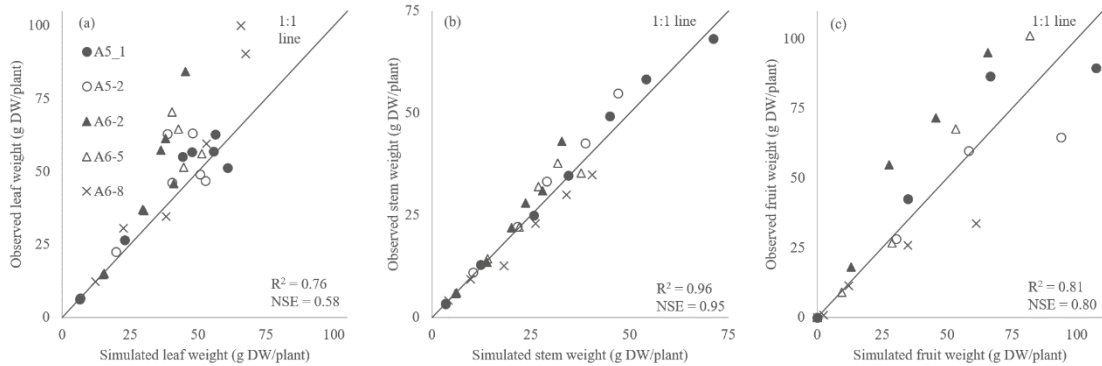
Percent of development	POL(cm <sup>2</sup> /leaf/day)	POF(g/fruit/day)
0	0	0
5	6.05	0.11
15	28.51	0.31
25	44.06	0.56
35	39.73	0.71
45	26.78	0.71
55	15.54	0.64
65	8.63	0.5
75	4.33	0.38
85	2.64	0.27
95	0.87	0.13
100	0	0



**Fig. 2.** Comparisons of observed and simulated numbers of nodes(a) and trusses(b) with validation data set.



**Fig. 3.** Comparisons of observed and simulated LAI with validation data set using the original GreenTom model(a) and improved model with defoliation algorithm(b).



**Fig. 4.** Comparisons of observed and simulated dry weight of leaves(a), stems(b), and fruits(c) with validation data set.

의해 제한되기 때문에 생육후기 엽(source)의 생육에 대한 예측력이 개선된다면 과실중에 대한 예측력도 향상될 것으로 사료된다.

위와 같이 본 모형은 다양한 기상환경조건에서 토마토 발육과 성장을 잘 모의하지만, 모형의 실용성을 제고하기 위해서는 다음과 같은 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 첫째, 본 모형에 적용된 적엽 알고리즘은 엽면적지수를 기준으로 구동되지만, 국내 농가에서의 적엽 규칙은 상황에 따라 매우 다양하기 때문에, 사용자가 정의한 적엽 규칙을 모형에 입력할 수 있게 하여야 한다. 둘째, 토마토의 생육은 기

상환경조건과 더불어 배지의 양수분 조건에 의해 영향을 받기 때문에, 배지의 수분보유특성을 고려한 토마토 양수분 흡수 및 스트레스 모듈을 개발하여, 최적 양수분 관리가 가능하게 하여야 한다. 마지막으로 본 모형의 결과값은 기관별 건물중이기 때문에, 생육단계와 환경조건에 따른 기관별 건물함량 변화를 모의하는 알고리즘을 개발하여, 기관별 생체중 모의를 가능하게 하여야 한다.

## 적 요

스마트팜은 원예작물의 생산성과 품질을 제고하기 위한 생력화 방법으로 최근 많은 주목을 받고 있다. 하지만 국내의 스마트팜은 단순한 환경 모니터링과 환경 제어만 가능한 초기단계에 머물고 있으며, 작물 생육에 최적화된 환경을 모의하는 의사결정도구의 개발은 미흡한 상태이다. 본 연구에서는 의사결정도구로서의 작물생육모형의 활용가능성을 확인하기 위해 국내에서 개발된 GreenTom모형의 품종모수를 추정하고 모형의 모의 성능을 검증하였다. 적엽은 시설토마토 재배에서 흔히 행해지는 농작업이지만 기존 모형은 이를 모의하지 않아 지상부 생육 모의에 문제를 나타냈다. 이를 해결하기 위해 적엽 알고리즘을 개발하여 기존 모형에 추가하고 모의 성능을 검증한 결과, 개선된 모형은 시설재배 토마토의 발달과 생육을 비교적 잘 모의하여 본 모형이 의사결정도구로 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 농림수산식품기술기획평가원의 연구개발과제(319006-01-1-SB020) 지원에 의해 이루어졌습니다.

## REFERENCES

- Baek, J. H., J. W. Heo, H. H. Kim, Y. Hong, and J. S. Lee, 2018: Research-platform design for the Korean Smart Greenhouse based on cloud computing. *Protected Horticulture and Plant Factory* **27**(1), 27-33. (in Korean with English abstract)
- Bertin, N., and E. Heuvelink, 1993: Dry-matter production in a tomato crop: comparison of two simulation models. *Journal of Horticultural Science* **68**(6), 995-1011.
- Heuvelink, E., 1996: Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands, 326pp.
- Heuvelink, E., 2005: *Tomatoes* (1st ed.). CAB Publishing, 339pp.
- Jeon, J. W., 2011: A Study on the Competitiveness of Sweet pepper and Tomato Industries of Korea and the Netherlands. PhD Thesis, Chonnam National University, 28pp.
- Jones, J. W., E. Dayan, L. H. Allen, H. Van Keulen, and H. Challa, 1991: A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE* **34**(2), 663-672.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service), 2019: Agriculture Crop Production Survey: Vegetable Production (Fruit-bearing Vegetables). (<https://kosis.kr/index/index.do>)
- Lee, Y. J., and B.-S. Kim, 2017: Resistance to bacterial wilt of rootstock varieties of tomato and graft compatibility. *Research in Plant Disease* **23**(3), 228-233. (in Korean with English abstract)
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2014: Plans for future growth of the agro-industry. 2-3. (in Korean)
- Martínez-Ruiz, A., I. L. López-Cruz, A. Ruiz-García, J. Pineda-Pineda, and J. V. Prado-Hernández, 2019: HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean journal of agricultural research* **79**(1), 89-102.
- Ministry of Agriculture, 1997: Development of Control Logic for Greenhouse Climate Optimization. 136pp. (in Korean)
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology* **10**(3), 282-290.
- Nelder, J. A., and R. Mead, 1965: A simplex method for function minimization. *The computer journal* **7**(4), 308-313.
- Seo, J., J. Hwang, and S. Oh, 2006: Effects of pinching methods and cultivars on growth and fruiting of green pepper. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology* **24**(3), 297-303. (in Korean with English abstract)
- Shishido, Y., K. Arai, H. Kumakura, C. J. Yun, and N. Seyama, 1990: Effects of developmental stages and topping on photo-synthesis, translocation and distribution of <sup>14</sup>C-assimilates in tomato. *Bulletin of the National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea* **1**, 63-73.
- Yeo, U. H., I. B. Lee, K. S. Kwon, T. Ha, S. J. Park, R. W. Kim, and S. Y. Lee, 2016: Analysis of research trend and core technologies based on ICT to materialize smart-farm. *Protected Horticulture and Plant Factory* **25**(1), 30-41. (in Korean with English abstract)