Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 27, No. 4:424-430, October (2018)
DOI https://doi.org/10.12791/KSBEC.2018.27.4.424
pISSN 2288-0992
eISSN 2288-100X

생육도일온도에 따른 고추의 생육 및 수량 예측 모델 개발

김성겸 · 이진형 · 이희주* · 이상규 · 문보흠 · 안세웅 · 이희수
농촌진흥청 국립원예특작과학원 채소과

Development of Prediction Growth and Yield Models by Growing Degree Days in Hot Pepper

Sung Kyeom Kim, Jin Hyoung Lee, Hee Ju Lee*, Sang Gyu Lee, Boheum Mun, Sewoong An, and Hee Su Lee

Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Wanju 55365, Korea

Abstract. This study was carried out to estimate growth characteristics of hot pepper and to develop predicted models for the production yield based on the growth parameters and climatic elements. Sigmoid regressions for the prediction of growth parameters in terms of fresh and dry weight, plant height, and leaf area were designed with growing degree days (GDD). The biomass and leaf expansion of hot pepper plants were rapidly increased when 1,000 and 941 GDD. The relative growth rate (RGR) of hot pepper based on dry weight was formulated by Gaussian's equation RGR (dry weight) = $0.0562 + 0.0004 \times DAT - 0.00000557 \times DAT^2$ and the yields of fresh and dry hot pepper at the 112 days after transplanting were estimated 1,387 and 291 kg/10a, respectively. Results indicated that the growth and yield of hot pepper were predicted by potential growth model under plastic tunnel cultivation. Thus, those models need to calibration and validation to estimate the efficacy of prediction yield in hot pepper using supplement a predicting model, which was based on the parameters and climatic elements.

Additional key words : *Capsicum annuum* L., growing degree days, growth, prediction yield, relative growth rate

서 론

유엔 산하 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 지구온난화로 인해 지난 100년간 지구의 연평균 기온은 약 0.7℃ 상승하였다. 1980년 이후 온도 상승 속도는 2배 이상 빠르게 진행 중에 있고, 강수량 역시 약 19% 증가하고 있으며, 우리나라의 경우는 지구의 평균 온도 상승폭 보다 클 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2014). 최근 빈번하게 발생하는 이상기상 현상은 작물의 생산량 변화에 가장 큰 요인이 되고 있으며 (Moriondo 등, 2011; Lim 등, 2015), 농산물 수요와 공급의 관점에서, 작물의 단수를 예측하는 것은 수급 조절에서 주요한 사항이며, 작물 수확량의 예측 시기와 정확성에 따라 농산물 수급 조절에 활용할 수 있다(Cho 등, 2013).

고추(*Capsicum annum* L.)는 우리나라 국민들의 식생활에서 가장 널리 이용되는 조미채소 가운데 하나로 전 세계적으로 생산량과 소비량이 점차 늘어나는 추세에 있으며 (Bosland 등, 2012), 국내에서는 생산액이 대략 1조원에 달할 정도로 농가 소득원으로써 중요한 작물이기도 하다(KOSTAT, 2017). 고추의 수량 및 품질은 착과 후 성숙기의 일조량, 강우량, 기온 등과 같은 기상환경 및 재배지의 토양조건에 의해서 큰 영향을 받는다 (Ahmed 등, 2014; Hwang 및 Lee, 1978; Jang 등, 2000; Kim 등, 1995). 우리나라에서 고추는 대부분 노지재배로 기상조건의 영향을 많이 받아 여름철 고온과 집중호우, 봄철 정식 시기의 이상 저온 또는 가뭄 등은 고추 생산량 감소의 주원인으로 가격 상승의 원인이 된다(Hwang 및 Tae, 2001; Menzel, 2000). 그래서 안정적인 고추 생산을 위하여 비가림 시설이 도입되었다. 고추 비가림 시설 재배는 강우 차단으로 병해충의 발생 억제 및 양수분 조절이 쉽고, 정식 시기를 앞당겨 재배기간을 연장하므로 고추 생산성을 크게 높일 수 있다(Lee 등, 2014; Lee 등, 2016). 작물재배 환경 요인 중에서도 기온은 식물의 지리적 분포와 생존, 그리고 생산량에 직결되는 중요한 요인으로 일정 수준보다 낮거나 높으면 저온 또는 고온 스트레스를 받게 된다(Oh 등, 2014). 또한 고추의 수량은 착과 및 성숙기의 일조량, 강우량, 기온, 토양수분 등과 같은 기상환경에

*Corresponding author: perpetuaa@korea.kr
Received October 16, 2018; Revised October 29, 2018; Accepted October 29, 2018

의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있고, 생육저해온도(35ºC) 이하까지는 온도가 상승할수록 생육이 촉진되는 반면에 그 이상으로 증가되면 고추의 생장을 저해하고 낙화와 기형과 발생을 증가시켜 생산량을 감소시킨다는 연구결과가 보고 되었다(Heo 등, 2013; Kim 등, 2013; Lee 등, 2018; Song 등, 2015).

최근 기후변화에 의한 식물의 반응을 파악하기 위하여 작물의 재배적지 변화, 수확량 변동 등에 대한 연구들이 이루어지고 있으나, 고추의 수급에 있어서 수확량 예측을 위한 재배환경에 따른 생장 그리고 생리·생화학적 반응 모델에 대한 연구는 기초 단계이다(Lee 등, 2014; Lee 등, 2015; Lee 등, 2018). 본 연구는 고추 비가림 재배를 이용하여, 기상환경(기온과 일사량 등)과 고추의 생장과 수량에 대한 실측 데이터를 수집하여, 생산량 예측에 필요한 고추의 생장 해석과 수량 회귀모델을 개발하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험 재료 및 재배 조건

공시 품종은 '슈퍼마니따'(*Capsicum annuum* L. cv. 'Super Manita', Nongwoo Bio Co., Suwon, Korea) 고추를 사용하였으며, 국립원예특작과학원 채소과 시험포장의 비가림 하우스에서 실험을 수행하였다(35º50' N 127º57' E, 30 elevation). 2017년 2월 6일에 시판용 바이오 상토1호(Hungnong seed Co., Korea)를 채운 105공 플러그 트레이(범농, 35 mL/cell)에 1셀당 고추 종자 2립씩을 파종하였고, 발아 후 1주을 남기고 솎아주었다. 벤로형 유리 온실(평균기온 25ºC 설정)에서 80일 간 육묘 후 비가림 시설에 이랑(폭 120cm)에 0.01mm두께의 흑색 플라스틱 필름으로 멀칭한 후 식양토에 주간거리를 45cm로 하여 이랑당 1줄씩 정식하였다(2017년 4월 24일). 정식 후 비가림 시설의 환기 온도를 25ºC 조건으로 설정하여, 측면의 자동 개폐와 전면과 후면의 배기 팬을 달아 설정 온도 이상이 되면 강제 환기되도록 하였다. 토양의 수분함량은 30%를 유지하기 위하여, 토양수분함량을 측정하여 토양 건조시(토양 수분함량 25% 이하) 1시간 동안 점적 관수하여 관리하였다. 그리고 양액은 과채류 전용 양액(Mulpule 2ho, Daeyu Co., LTD, Korea)을 정식 후 42일부터 주 2회에 EC 2.5dS/m와 pH 6.5로 고추 한 주당 500mL를 관주 하였다. 비가림 시설 내 기온, 일사량 등은 한 시간 간격으로 데이터로거(U30-NRC, Onset Computer Co., Boure, MA, USA)를 사용하여 측정하였다(Fig. 1).

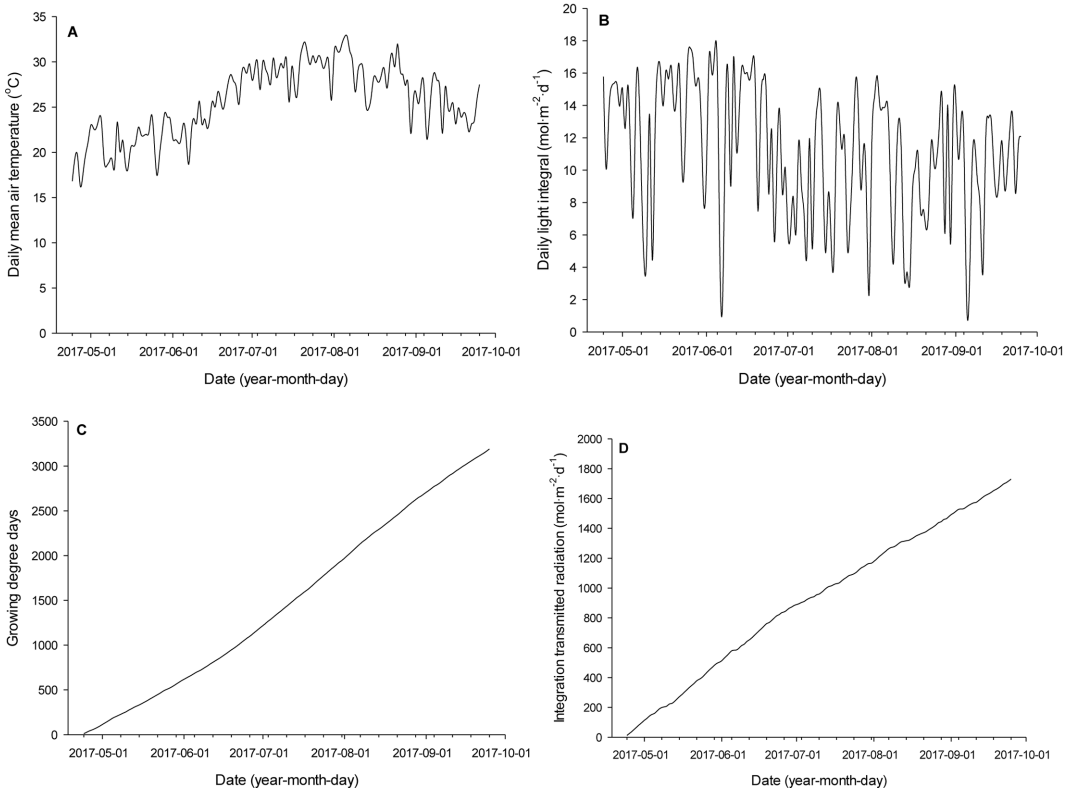

Fig 1. Changes in air temperature (A), daily light integral (B), growing degree days (C), and integration transmitted radiation (D) in a plastic tunnel during hot pepper cultivation periods.

Table 1. Changes in growth parameters of hot pepper from 0 to 154 days after transplanting in those has cultivated in a plastic tunnel. Mean±standard errors, n=9.

Days after transplanting (d)	Plant height (cm/plant)	Number of leaves (/plant)	Leaf area (cm^2/plant)	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)
0	23.4± 0.7	13± 0	89.7± 1.2	2.3± 0.1	0.3± 0.0
14	28.5± 3.8	23± 3	170.9± 17.9	5.4± 0.7	1.1± 0.4
28	39.5± 4.3	34± 4	359.2± 41.1	16.7± 1.8	3.1± 1.3
42	63.2± 4.1	272± 20	2180.7± 281.6	70.3± 5.6	14.4± 3.3
56	93.2± 4.7	806± 61	6501.0± 422.2	210.0±17.2	41.9± 9.3
70	121.3± 6.6	1,385±112	12,555.8±1,269.3	332.4±30.2	67.7±15.2
84	131.2± 6.2	1,434± 37	12,326.1± 731.4	338.2±14.8	92.6±23.3
98	152.2± 8.4	2,085±113	25,448.1±2,397.2	483.2±28.6	103.9±19.5
112	170.2± 6.2	3,187±209	29,599.1±1,869.5	575.9±32.1	126.0±25.2
126	176.6±13.2	4,342±305	36,420.5±4,311.3	799.7±48.6	172.1±29.7
140	195.2±17.8	5,549±345	33,253.3±4,056.5	842.5±41.3	181.1±36.5
154	195.6±23.1	4,913±441	41,584.0±3,617.4	978.8±78.0	194.6±49.0

2. 고추의 생육 및 수량 특성 조사

고추의 생체중, 건물중, 엽수, 엽면적을 2주 간격으로 정식 후 154일까지(총 12회) 파괴 조사하였다. 엽면적(cm^2/plant)은 엽장 1cm 이상의 완전 전개된 잎을 모두 따서 엽수를 측정하고 엽면적 기계(LI-3100, LI-COR, USA)를 이용하여 측정하였다. 고추의 수확량 조사는 정식 후 6주부터 2주 간격으로 총 8회 하였다. 길이가 5cm 이상의 고추 과실을 수확하여 총 수확 과수, 과중 및 건물중을 조사하였다. 병과, 열과 등의 비정상 과수를 별도로 조사하였다. 단수(kg/10a)은 적색 고추 과실의 건물중×상품성 있는 홍 고추 개수×정식 주수/10a으로 계산하였다. 수량 조사는 완전임의배치법 3반복으로 총 9개체의 고추를 조사주로 선정하였다.

3. 고추의 생장과 수확량에 대한 해석 및 통계 분석

통계 분석은 SAS 프로그램(SAS 9.2, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여, 정식 후 일수(DAT; Days After Transplanting), 생육도일 온도(GDD; Growing Degree Days), 누적적산일사량(DIL; Daily Integral Light)은 독립변수로 생육 특성 결과를 종속 변수(생체중, 건물중, 엽수 및 엽면적)로 다중 상관 분석을 하였다.

$GDD = \Sigma \frac{\text{Max temp.} + \text{Min temp.}}{2}$, Max and Min temp.(일 최고 및 최저 기온), base temp.(기저온도)

생장 요인과 수량에 대한 회귀 모델은 sigmoidal 함수 형태의(3 Parameter)을 이용하였다. 그리고 Williams(1946)의 상대 생장률(RGR: Relative Growth Rate)의하여 생제중과 건물중에 대한 생장률($g \cdot g^{-1} \cdot day^{-1}$)을 계산하였다.

$\text{Growth} = \frac{a}{1+\exp^{-\left(\frac{GDD-b}{k}\right)}}$, a,b 및 k는 변수,

$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$ 두 시기 내에서 무게 W_1, W_2

결과 및 고찰

1. 정식 후 일수에 따른 고추의 생장, 상대생장율

정식 후 42일에 고추의 초장은 63cm/plant였고, 4주 후인 정식 후 70일에는 121cm/plant로 약 2배 커졌다 (Table 1). 엽수와 엽면적은 정식 후 42일 이후 급속히 증가하였고, 정식 후 98일 이후 고추 건물중의 증가율은 평균 17.6%으로, 정식 후 42일까지 건물 생산 증가율(251%)에 비해 현저히 낮았다. 고추 수확시기(정식 후 약 60일 이후) 에는 영양 생장을 위한 건물 생산보다는 과실의 착과 및 비대를 위한 발육에 집중되었다. 고추의 생체중과 건물중 상대생장율은 각각 RGR (fresh weight) = $0.0488 + 0.0004 \times DAT - 0.00000521 \times DAT^2$, RGR(dry weight) = $0.0562 + 0.0004 \times DAT - 0.00000557 \times DAT^2$ (Fig. 2). 정식 후 재배 기간에 따른 생체중과 건물중에 대한 상대 생장률을 모의해 보았을 때, 정식 후 초기부터 중기까지의 상대 생장률이 높았으며, 최고 상대생장률은 생체중은 정식 후 40일경에 0.057g/g/day, 그리고 건물중은 정식 후 35일경에 0.064g/g/day였다. 고추의 생장은 정식 후 재배기간이 경과함에 따라 70일까지는 지속적으로 증가하였고, 그 이후의 상대 생장률

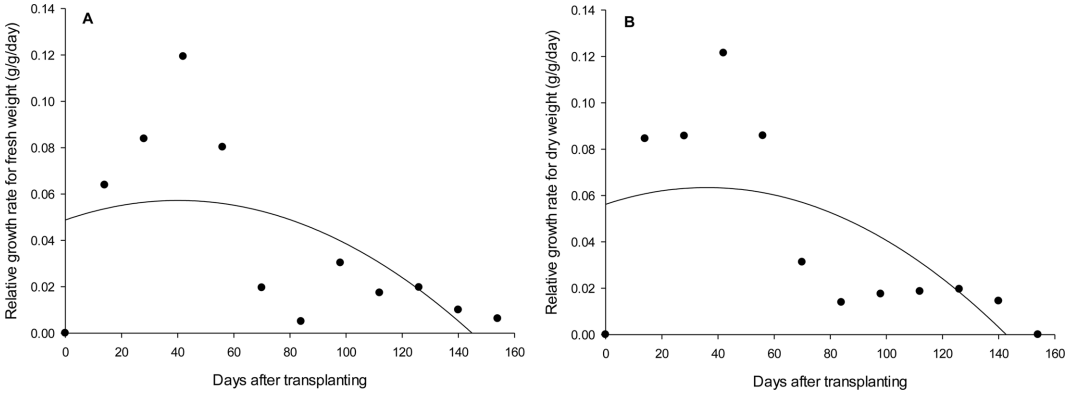

Fig. 2. Relative growth rate (RGR) of fresh (A) and dry (B) weigh of hot pepper cultivated in green house during cultivation period. RGR = [(log (A) - log (B)]/growing period (days), A and B were after and before growth measurements, respectively.

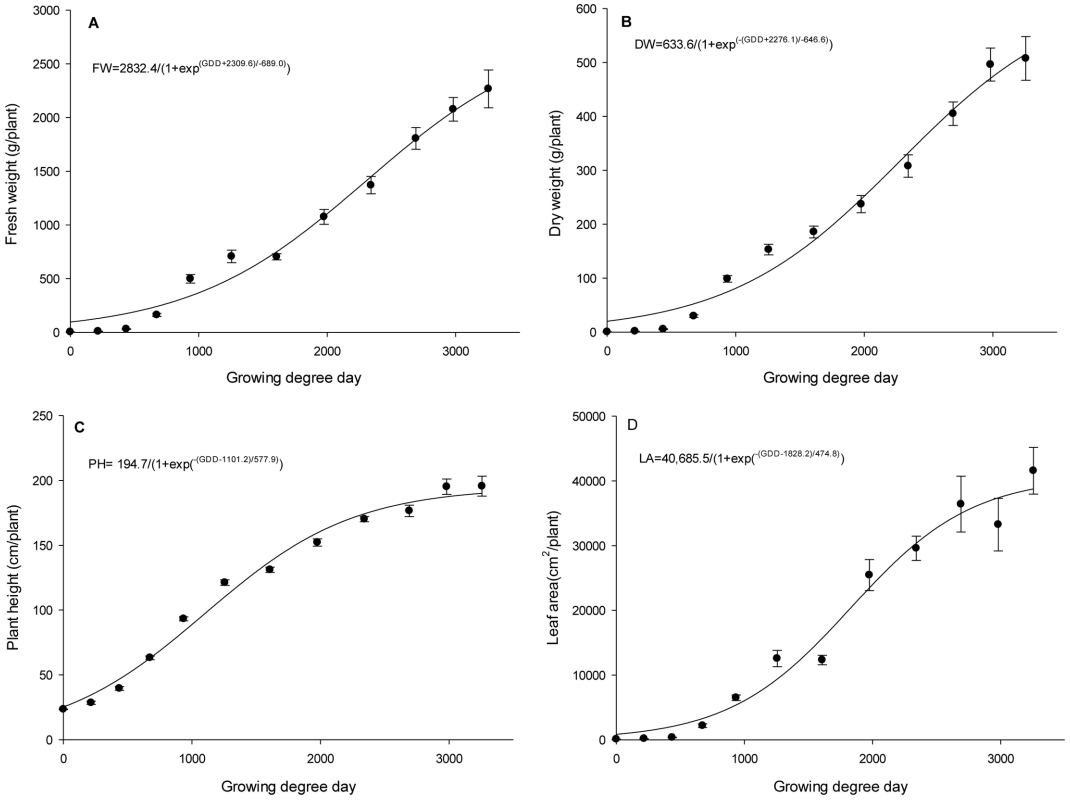

Fig. 3. Changes of fresh (A), dry (B) weights, plant height (C), and leaf area (D) of hot pepper during hot pepper cultivation periods.

은 감소하다가 140일에 상대생장률이 0에 가까워져 생장의 변화가 없었다.

2. 생육도일온도에 따른 생장 회귀 모델 개발

생육도일온도(Growing Degree Days)에 따른 고추 생체중, 건물중, 초장 및 엽면적의 예측 회귀 모델식을 개발하였다(Fig. 3).

$$\text{Fresh weight} = \frac{2832.4}{1+exp^{-\left(\frac{GDD+2309.6}{-689.0}\right)}}$$

$$\text{Dry weight} = \frac{633.6}{1+exp^{-\left(\frac{GDD+2276.1}{-665.6}\right)}}$$

$$\text{Plant height} = \frac{194.7}{1+exp^{-\left(\frac{GDD-1101.2}{-577.9}\right)}}$$

$$\text{Leaf are} = \frac{40{,}685.5}{1 + exp^{-\left(\frac{GDD-1828.2}{-474.8}\right)}}$$

a는 고추의 생체중 및 건물중의 잠재적 최대값으로, 각각 2,832g/plant 및 633g/plant였다. 지수 함수적으로 생장이 늘어나는 시점의 GDD는 1,000였고, 생체중과 건물중의 b값은 각각 2,309 및 2,276였고, k값 역시 각각 689 및 665으로 유사하였다(Table 2). 고추의 초장과 엽면적의 최대값은 정식 후 각각 194.7cm/plants 및 40,685.6cm^2/plant으로 예측되었으며, 지수함수적으로 엽면적이 증가하는 GDD는 946였으며, 분지수가 7개 이상 되는 시기로 추정되었다. 생육도일온도는 작물이 발아부터 성숙까지 생육단계에 따라서 어느 일정량의 열량을 얻어야 성숙된다는 것을 기반으로 작물의 개화시기, 성숙기 등과 같은 생물계절을 예측하기 위해 사용할 수 있는 온도적산 값이다(Baskerville 과 Emin, 1969). 주산지(경북 안동 및 영양, 충북 청양 등)별로 GDD값을 계산하여 개발된 회귀모델식들을 이용하여 잠재적 생장을 예측할 것으로 기대되며, 고추의 재배관리를 위한 지주 유인과 적엽 등의 농작업 일정을 결정하는데도 활용할 수 있다. 또한, 건물 생산 속도에 알맞은 관수 및 비배관리 제안도 가능할 것으로 기대된다. 그러나 연차 간의 재배 환경변이에 의하여 개발된 고추 생육 모델들을 통한 예측 값들의 오차가 발생할 수 있으므로, 모델의 교정 및 검증이 지속적으로 필요하다.

Table 2. Parameters of growth models of hot pepper by growing degree days.

Growth traits	Growth model parameters			R^2
	a	b	k	
Fresh weight (g/plant)	2832.4	2309.6	689.0	0.979
Dry weight (g/plant)	633.6	2276.1	665.6	0.984
Plant height (cm/plant)	194.7	1101.2	577.9	0.988
Leaf area (cm^2/plant)	40,685.5	1828.2	474.8	0.978

3. 정식 후 일수에 따른 수량 추정

정식 후 42일부터 고추의 수확을 시작하였으며, 재배기간이 경과함에 따라 적색과의 수와 과중이 지속적으로 증가하였다(Table 3). 정식 후 일수에 따라 수확한 고추의 정상과 비율을 조사한 결과 정식 후 초기인 84일과 98일에는 각각 83.2%와 83.8%으로 정상과율이 높았으나, 112일부터는 75% 정도로 감소되었다. 정식 후 112일에서 126일까지의 비가림 시설내의 일일 최고 온도 와 평균 온도는 각각 41.1°C와 37.3°C였고, 토양수분의 함량은 24.1%로 측정되었다. 이와 같은 온도의 상승과 토양수분의 감소로 인해 병과와 기형과가 증가하여, 정상과 비율이 감소했으리라 사료된다. 고추에 있어서 생육적온에 맞게 기온을 유지하는 것이 중요하나, 우리나라 여름철은 지나친 고온으로 인하여 고추의 생장을 저해하고 기형과 발생을 증가시켜 생산량을 감소시키는 문제가 보고된바 있다(Lee 등, 2001; Heo 등, 2013). 그리고 기후변화시나리오 RCP(Representative concentration pathway) 8.5조건(외기보다 온도 6°C, CO_2 농도 940μmol·mol^{-1}, 강수량 20.4% 증가 조건)에서 고추를 재배하면 수량이 89% 정도가 떨어졌다는 최근 보고도 있었다(Lee 등, 2018). 고추 재배 시 평년보다 2°C 증가된 조건에서는 수확량이 13% 증가하였으나 그 이상의 기온에서는 수확량이 20% 이상 감소되었고, 고온과 토양수분 함량의 감소 상태에서 대조구에 비해 병과와 석회결핍과의 발생률이 증가하였다는 결과(Heo 등, 2013; Lee 등, 2015; Song 등, 2015)와 본 연구 결과가 유사하였다. 정식 후

Table 3. Yield characteristic of hot pepper as affected by days after transplanting. Mean±standard errors, n=9.

Days after transplanting (d)	Normality fruits			Abnormality fruits		Percentage of normality fruits number[z] (%)
	No. of fruits (No./plant)	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)	No. of fruits (No./plant)	Fresh weight (g/plant)	
70	1.4± 0.5	5.3± 2.8	1.1± 0.5	1.0± 0	14.8± 4.6	58.3
84	15.4± 4.5	121.4± 39.8	25.6± 9.6	3.1± 2.1	30.6± 19.7	83.2
98	43.0±17.0	505.5±152.8	83.8±23.2	8.3± 7.2	78.2± 66.1	83.8
112	80.6±19.4	792.4±392.9	166.0±85.1	26.6±16.9	185.3± 98.3	75.2
126	88.4±23.9	600.2±191.6	144.3±42.9	37.6±16.6	210.1±107.7	70.2
140	116.3±25.5	901.3±228.3	204.6±36.7	51.6±15.9	318.0±102.1	69.3
154	126.1±27.1	1032.3±324.1	199.4±46.3	44.2±17.1	288.4±115.9	74.0

[z]Harvested fruits except small size (fruit length under 5 cm), diseased and cracking fruits.

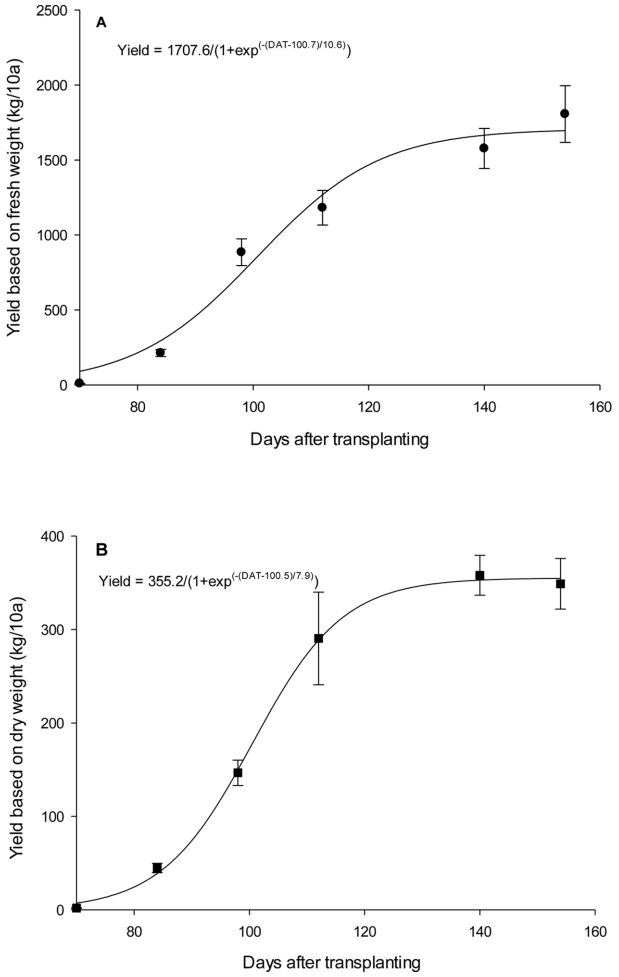

Fig. 4. Prediction yield of fresh (A) and dried (B) red pepper using a sigmoidal regression models based on growing days. Yield= fresh or dry weight (g/plant) × number of transplanted plants (1,750/10a).

일수에 따른 생장계수들을 각각 구하여, sigmoidal 함수 형태의 회귀모형으로 정상과중 적과의 생체중과 건물중으로 고추의 단수를 분석하였다(Fig. 4). 적과의 생체중의 단수는 정식 후 112일에 1,3871kg/10a 이었고, 최종 생육조사일인 정식 후 154일에 1,807kg/10a 로 최고치의 단수를 확인하였다. 또한 건 고추의 단수는 정식 후 112일에 291kg/10a 이었고, 최대 단수는 정식 후 140일에 358kg/10a 이었다. 우리나라의 고추의 재배는 대부분 노지재배로 이루어지고, 건 고추의 단수는 2016년과 2017년 각각 266 및 197kg/10a 이었고, 5년간 평균 254kg/10a으로 보고되었다(KOSTAT, 2017). 개발된 단수 예측 모델에서 정식 후 112일(1,875 GDD)의 단수(291kg/10a)와 노지 건고추의 평균 단수와 유사하였다. 고추 주산지인 경북 지역의 재배 면적은 각각 7,426과 6,368ha(2016년과 2017년)으로 2016년 비하여 2017년에 14.2% 감소하였고, 고추 주산지인 영양 지역의 재배기간 동안(5월 5일-10월 15일)의 기상을 분석하면, 평균 기온은 2017년이 약 0.3°C 높았으나, 고추의 생장이 지수함수적으로 증가하는 시점인 800 GDD는 2016년과 2017년에 모두 7월 11일이였다. 일적산광량은 2016년 비하여 2%가 증가하였으나, 강우량은 2017년에 789mm로 2016년에 비하여 26.4%가 높았다. 2016년에 비하여 건고추의 단수가 감수하였던 것은 재배면적의 감소와 강우량 증가가 주요한 원인 이였다.

최근 이상 기상으로 인한 고추의 피해를 경감하기 위한 시설재배가 늘어나는 실정으로, 본 연구에서 고추의 비가림 시설재배 기간 동안의 고추의 생육 및 수량에 대한 실측 데이터는 고추의 수급에 있어 미리 예측할 수 있는 수확량 예측 모델에 대한 기초 자료로서 활용할 수 있을 것이라 사료된다. 그리고 개발된 수량 예측 모델들에 대한 예측 정확도에 대한 개선이 필요하며, 이는 통계적 데이터(통계청에서 제시하는 고추 단수와 기상청 기온, 상대습도, 강우량 등)들과 실측치들에 대하여 지속적으로 수집하여 모델들에 대한 교정 및 검증을 해야 한다.

적 요

본 연구는 고추의 생육특성인 초장, 엽면적, 생체중, 건물중을 조사하였고, 기상요인에 따른 수량 예측 모델 개발을 위하여 수행되었다. 생육도일온도에 따른 고추의 생체중, 건물중, 초장 및 엽면적에 대한 생장 모델(시그모이드 곡선)을 개발하였다. 고추는 정식 후 50일 전후로 초장, 엽면적, 생체중 및 건물중이 지수 함수적으로 증가하였으며, 140일 이후에는 생장요인들이 평행을 이루었다. 그리고 생육도일온도에 따른 고추의 생장을 분석 한 결과 지수 함수적으로 생장이 늘어나는 시점의 GDD는 1,000였다. 고추의 건물중에 대한 상대생장 속도를 계산하는 식은 $RGR\ (dry\ weight) = 0.0562 + 0.0004 \times DAT - 0.00000557 \times DAT^2$ 였다. 수확한 적과의 생체중과 건물중으로 고추의 단수를 구하였을 때, 정식 후 112일에 1,3871kg/10a였고, 건고추의 단수는 정식 후 112일에 291kg/10a이였다. 고추 작황예측 프로그램 개발을 위해서는 고추의 생산성에 관여하는 주요 요인을 분석하고, 실시간으로 계측한 생육 및 기상자료를 기반으로 하여 생육모델을 보정 및 검증해야 할 것이다.

추가 주제어 : *Capsicum annuum* L., 생육도일, 생장곡선, 예측수량, S자형 곡선

사 사

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01196502)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature cited

Ahmed, A.F., H. Yu, X. Yang, and W. Jiang. 2014. Deficit irrigation affects growth, yield, vitamin C content, and irrigation water use efficiency of hot pepper grown in soilless culture. HortScience 49:722-728.

Baskerville, G.L. and P. Emin. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperature. Ecology 50:514-517.

Bosland, P.W., D. Coon, and G. Reeves. 2012. 'Trinidad Moruga Scorpion' Pepper is the world's hottest measured chili pepper at more than two million scoville heat units. HortTechnology 22:534-538.

Cho, J.W., J.M. Suh, J.S. Kang, C.O. Hong, H.M. Shin, S.G. Lee, and W.T. Lim . 2013. The economic impacts of abnormal climate on fall Chinese cabbage farmers and consumers. J. Environ. Sci. Intl. 22:1691-1698.

Chung, K.M., S.K. Kwon, and J.M. Hwang. 2002. Quality of single harvested red peppers. Korean J Food Sci. Technol. 34:128-131. (in Korean)

Heo, Y., E.G. Park, B.G. Son, Y.W. Choi, Y.J. Lee, Y.H. Park, J.M. Suh, J.H. Cho, C.O. Hong, S.G. Lee, and J.S. Kang. 2013. The Influence of abnormally high temperature on growth and yield of hot pepper (*Capsicum annuum* L.). J. Agriculture & Life Sci. 47(2): 9-15. (in Korean)

Hwang, J.M., and B.Y. Lee. 1978. Studies on some horticultural characters influencing quality and yield in the pepper (*Capsicum annuum* L.). II. Correlations and selection. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 19:48-55. (in Korean)

Hwang, J.M. and G.S. Tae. 2001. Changes in the growth of red pepper (*Capsicum annuum* L.) and soil moisture according to irrigation and cultivating methods. Hortic. Environ. Biotechnol. 42:295-299. (in Korean)

IPCC. 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press

Jang, K.S., D.J. Choi, D.H. Pae, J.T. Yoon, and S.K. Lee. 2000. Effects of altitudes on growth and fruit quality in red pepper (*Capsicum annuum* L.). Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 41:485-489. (in Korean)

Kim, B.S., K.Y. Kim, S.K. Kim, and J.K. Sung. 1995. Pepper profitable techniques and marketing strategy. Nongminshinmunsa

Kim, S.H., H. You, E.G. Park, B.G. Son, Y.W. Cho, Y.J. Lee, Y.H. Park, J.M. Suh, J.M. Suh, J.H. Cho, C.O. Hong, S.G. Lee, and J.S. Kang. 2013. The influence of temperature, amino acid and polyamin on pollen germination of pepper (*Capsicum annuum* L.). J. Agr. Life Sci. 47:1-8. (in Korean)

KOSTAT statistics Korea. 2017. Crop production statistics, http://www.kosis.kr.

Lee G.J., M.G. Song, S.D. Kim, S.Y. Nam, K.Y. Lee, T.J. Kim, D.E. Kim, J.B. Yoon, and K.H. Choi. 2014. Effects of diffused light materials on marketable yield and quality of sunlight dried red pepper (*Capsicum annuum* L.) in plastic film house. Kor. J. Plant Res. 27:102-109. (in Korean)

Lee G.J., M.G. Song, S.D. Kim, S.Y. Nam, J.W. Heo, J.B. Yoon, and D.E. Kim. 2016. Effects of rain-shelter types on growth and fruit quality of red pepper (*Capsicum annuum* L. var. 'Keummaru') cultivation in paddy. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 34:355-362. (in Korean)

Lee, S.G., H.W. Lee, K.D. Kim, and J.W. Lee. 2001. Effects of shading rate and method on inside air temperature change in greenhouse. J. BioEnviron. Con. 10:80-87. (in Korean)

Lee, S. G., Kim, S. K., Lee, H. J., Lee, H. S., Lee, J. H., 2018, Impact of moderate and extreme climate change scenarios on growth, morphological features, photosynthesis, and fruit production of hot pepper, Ecol. Evol., 8, 197-206.

Lee, H.J., S.G. Lee, C.C. Choi, J.H. Kim, S.K. Kim, T.A. Jang, and S.J. Lee. 2015. Influence of air temperature and soil moisture conditions on the growth and yield of hot pepper under a plastic tunnel culture. J. Environ. Sci. Intl. 24:769-776. (in Korean)

Lim, C.H., D. Kim, Y. Shin, and W.K. Lee. 2015. Assessment of drought severity on cropland in Korea peninsula using normalized precipitation evapotranspiration index (NPEI). J. Climate Change Res. 6:223-231. (in Korean)

Menzel, A. 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996, Int. J. Biometeorol. 44:76-81.

Moriondo, M., C. Giannakopoulos, and M. Bindi. 2011. Climate change impact assessment: The role of climate extremes in crop yield simulation. Climatic Change. 104:679-701.

Oh, S., K.H. Moon, I.C. Son, E.Y. Song, Y.E. Moon, and S.C. Koh. 2014. Growth, photosysthesis and chlorophyll fluorescence of chinese cabbage in response to high temperature. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 32:318-329. (in Korean)

Radford, P.J. 1967. Growth analysis formulae-their use and abuse. Crop Sci. 7:171-175.

Song, E.Y., K.H. Moon, I.C. Son, S.H. Wi, C.H. Kim, C.K. Lim, and S.J. Oh. 2015. Impact of elevating temperature based on climate change scenarios on growth and fruit quality of red pepper. Kor. J. Agric. For. Meteorol. 17: 248-253. (in Korean)

Williams, R.F. 1946. The physiology of plant growth with special reference to the concept of ent assimilation rate. Ann. Bot. 10:41-72.