

적산일사량에 따른 상추 생육모델 Growth Model of Leaf Lettuce Based on the Cumulative Photosynthetic Photon Flux Density

문보흠* · 이병일¹

원예연구소 시설재배과, ¹서울대학교 식물생산과학부

Bo Heum Mun* · Byoung Yil Lee¹

*Div. of Protected Cultivation, National Horticultural Research Institute,
RDA, Suwon 441-440, Korea*

¹*School of Plant Science, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea*

서 론

채소는 다른 작물에 비해 생육기간이 매우 짧기 때문에 환경의 영향을 많이 받는다. 특히 환경이 제어되는 시설에서 양액재배를 할 경우에는 생육이 왕성하므로 노지에 비해 재배기간을 단축시킬 수 있으며, 근권부 양액제어나 지상부 환경제어를 통해 고품질 채소를 생산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 빠른 생육을 제어하거나 예측할 수 없어 수확적기를 놓치면 외관적 품질이 현저히 떨어지고 질적 품질도 저하하여 소비자의 기호에 맞추기 힘들게 된다. 그러기 위해서는 환경요인에 대한 생육모델에 기반하여 환경을 제어함으로써 생육의 추이를 조절하고 나아가서 고품질 채소 생산을 기대할 수 있게 된다.

환경요인에 대한 작물 생육반응은 매우 다양하게 나타나는데, 특히 광과 온도에 의해 생육이 크게 좌우된다. 수관부에 도달한 광량이 충분하면 최상부엽들의 광합성은 포화에 이르고 하위엽으로 갈수록 광량은 현저히 감소하여 광합성량도 감소하지만, 전체적인 균락에서 보면 포화에 이르지 못하므로 광에 대한 작물의 건물증가는 직선적인 관계에 있다. 반면 온도에 대한 작물의 생육은 최적온도를 중심으로 좌우 비대칭 포물선을 나타내는데, 대부분의 채소작물의 최적온도는 25℃ 부근이며 여름을 제외한 자연조건에서는 일평균온도가 25℃ 이상인 날이 많지 않다. 따라서 최적온도까지 건물생산도 직선적으로 증가한다고 말할 수 있다. 그리고 온도는 일사량에 의해 크게 영향을 크게 받으므로 일사량으로 온도에 대한 반응을 표현할 수 있게 된다.

따라서 양액재배시 상추의 수확기와 수량을 예측하기 위해 광도별 생육양상을 분석하고 적산일사량에 기반한 생육모델을 개발하고자 본 실험을 수행하였다.

재료 및 방법

인공생육실내 온도를 18~27°C로 유지하면서 수경재배하여 정식부터 수확시까지 생육변화를 알아보았다. 인공생육실내에 Bed당 29개체씩 6개 bed에 정식한 다음 10일째와 19일째에 각각 6 및 5개체를 수확내고, 격일로 총 3개체씩 채취하여 생육을 조사하였다. 양액조성은 Yamazaki액으로 K 4, Ca 2, H₂PO₄ 1.5 및 Mg 1me · L⁻¹ 1배액이었고 bed당 50L씩 공급하였다.

또한 환경요인에 따른 상추의 생육주기별 생육 모델링을 개발하기 위해 인공생육실내에서 적산 일사량(cumulative photosynthetic photon flux density; cumulative PPF)별 생체중 증가추이를 분석하였다. 상추를 1.5L 용기당 1개체씩 정식하여 처리당 3반복으로 배치하였으며, 처리별 평균 광도는 일사계(LI190SB, LICOR)로 측정하여 I, II 및 III 각각 13.7, 88.5 및 182.9 μmol · m⁻² · s⁻¹로 20W 형광등(FL20T10PG, 제보조명)을 초관에서 50cm 정도 위에 60cm 너비에 등간격으로 10개씩 설치하였다. I은 10개의 형광등 중 2개만 조사하고 50% 한랭사를 이용하여 두겹으로 차광하였으며, II는 4개의 형광등을 조사하고 차광하지 않았다. V는 2중 피복한 상태의 자연광이고 IV는 자연광을 50% 한랭사로 한겹 차광한 처리구로 차광률은 42.8(흐린 날)~51.7%(맑은 날)이었다. I~III의 인공전조시간은 08:00~20:00로 12시간이었으며, 자연광의 경우 인공광원의 간섭을 막기 위해 중간에 알루미늄 혼입필름으로 차단하였다.

양액조성으로 1단계에 K, Ca, Mg 및 P는 3.78, 1.75, 2.10 및 1.80me · L⁻¹이었으며, 2단계에 각각 7.35, 2.625, 0.525 및 2.25me · L⁻¹이었다. 공급한 개체당 양액량은 1단계와 2단계 각각 1L 및 1.5L이었고, 매 2일 간격으로 생체중을 측정하였다. 생육상의 기온은 23.3±0.07°C 이었고, 상대습도는 84.9±0.63%이었다.

결과 및 고찰

적산일사량에 따른 생육 변화(Fig. 1)를 보면 초기에 생체중과 건물중의 더딘 증가를 보이다 생체중은 90~110mol · m⁻² · day⁻¹사이에서, 건물중은 이보다 10mol · m⁻² · day⁻¹ 뒤에 꼭점이 나타나며 그 이후 급속적인 생장을 나타냈다. 특히 초기 건물중의 증가폭이 생체중보다 완만하였다. 엽수는 1차 직선회귀식에 적합하게 나타나(r²=0.990) 직선적으로 증가한 반면 엽면적은 건물중과 유사한 경향을 나타냈다(Fig. 2). 생체중, 건물중 및 엽면적의 r²는 각각 0.99, 0.97 및 0.98로 상당히 높게 나타나 실시간 계측을 이용한 모델링 개발의 기초자료로 충분히 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

일사량에 따른 생체중과 건물중 및 최대엽면적과 엽면적 변화는 전일의 일사량에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다(자료 미제시). 특히 22일 이후에 급격한 증가를 보여 이 시기의 일사량에 따라 생육후기의 특성이 달라질 수 있을 것으로 사료된다.

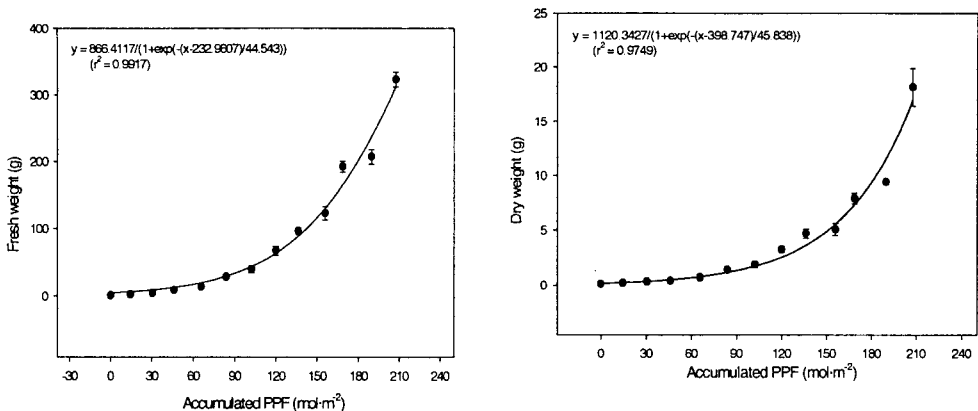


Fig. 1. Regressions among fresh weight, dry weight, and accumulated PPF in hydroponic culture of leaf lettuce. Bars indicate standard errors of three plants.

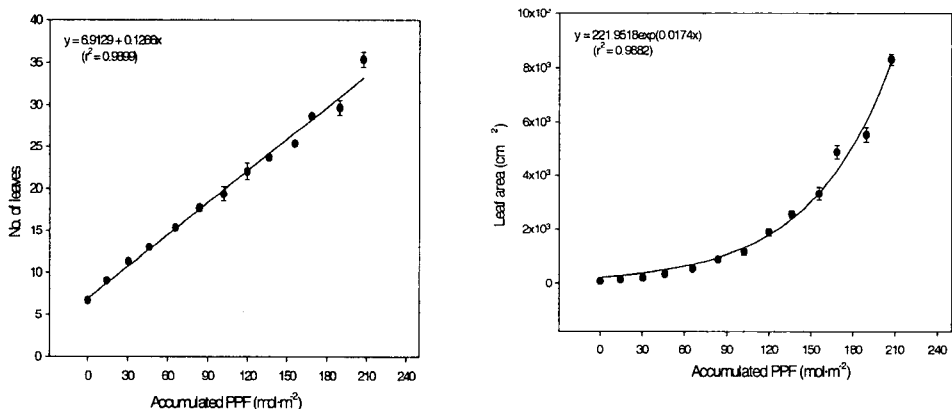


Fig. 2. Regressions among number of leaves, leaf area, and accumulated PPF in hydroponic culture of leaf lettuce. Bars indicate standard errors of three plants.

이상의 결과로 상추의 생육은 크게 두 단계로 구분되었으며, 정식후 적산일사량이 $110 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 근처에서 생육의 전환이 생긴다고 할 수 있다.

각 적산 일사량에 따른 생체중의 변화를 회귀분석한 결과는 Fig. 3 및 4와 같다. 1단계에서 적산 일사량에 따른 생체중 증가는 회귀계수(r^2)가 0.99 이상으로 상당히 높아 적산 일사량에 대한 생체중 증가의 회귀모형이 적합한 것으로 보인다. 한편 낮은 적산 일사량 조건(I)에서는 직선에 가까운 회귀곡선을 나타낸 반면, 높은 적산 일사량 처리(II~V)에서는 S자형 곡선을 나타냈다. 이는 낮은 적산 일사량에서 광합성이 원활하게 이루어지지 않아 광합성 대사산물을 유지에 필요한 호흡에 거의 소모하여 생육이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 대체적으로 1단계에서는 초기에 생체중이 더디

계 증가하다가 일정한 적산 일사량 이후에 급격히 증가하는 양상을 보였다. 2단계에서도 r^2 가 0.98 이상으로 반응변수를 잘 설명해 준다고 볼 수 있다. 모든 처리에서 적산 일사량에 따라 생체중이 거의 직선적으로 증가하는 양상을 보였다(Fig. 4). 높은 적산 일사량 조건에서는 생육중기 이후 광합성이 활발하고 생체중이 급속하게 증가하게 되므로 적산 일사량에 대한 생체중은 거의 직선적으로 증가하게 된다.

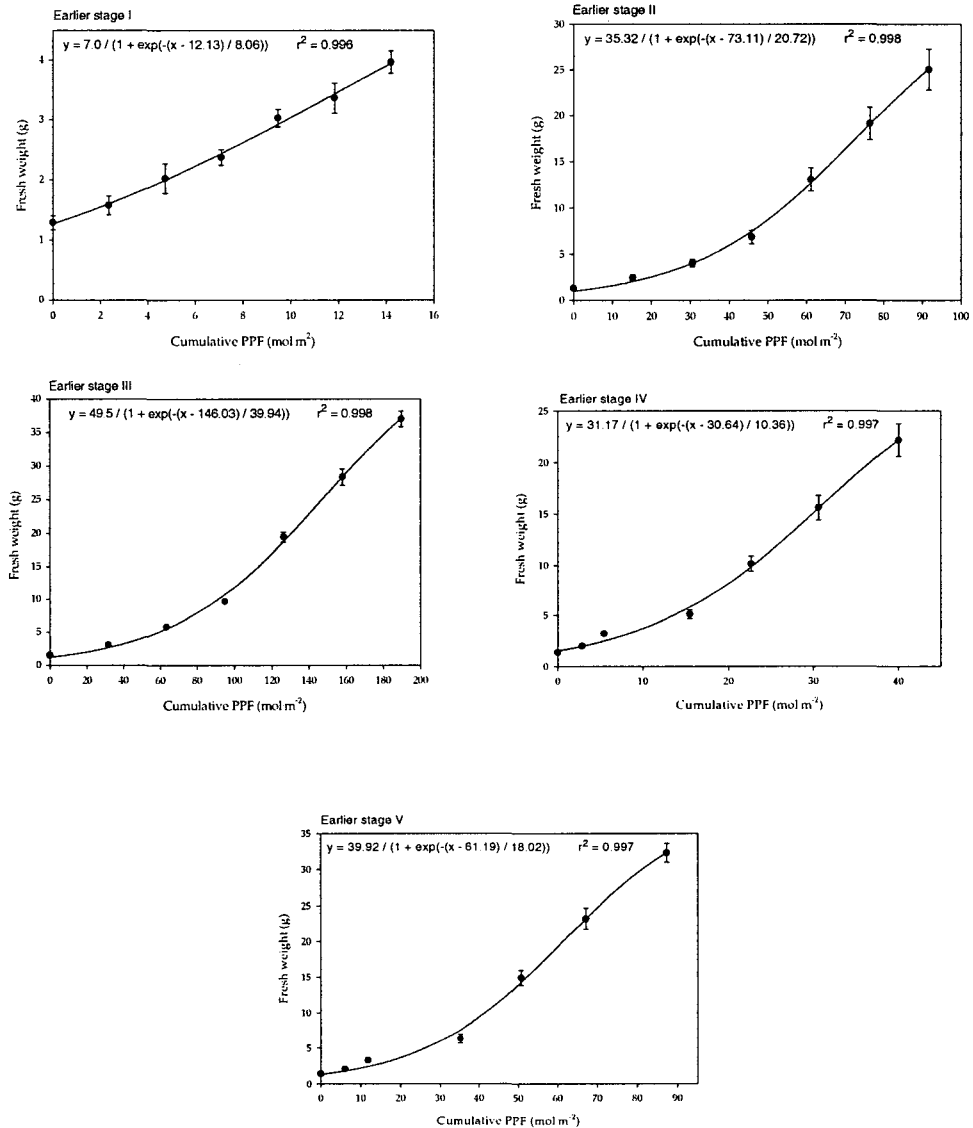


Fig. 3. Relationship between the cumulative PPF and the fresh weight of the earlier growth stage in leaf lettuce. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) 182.9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

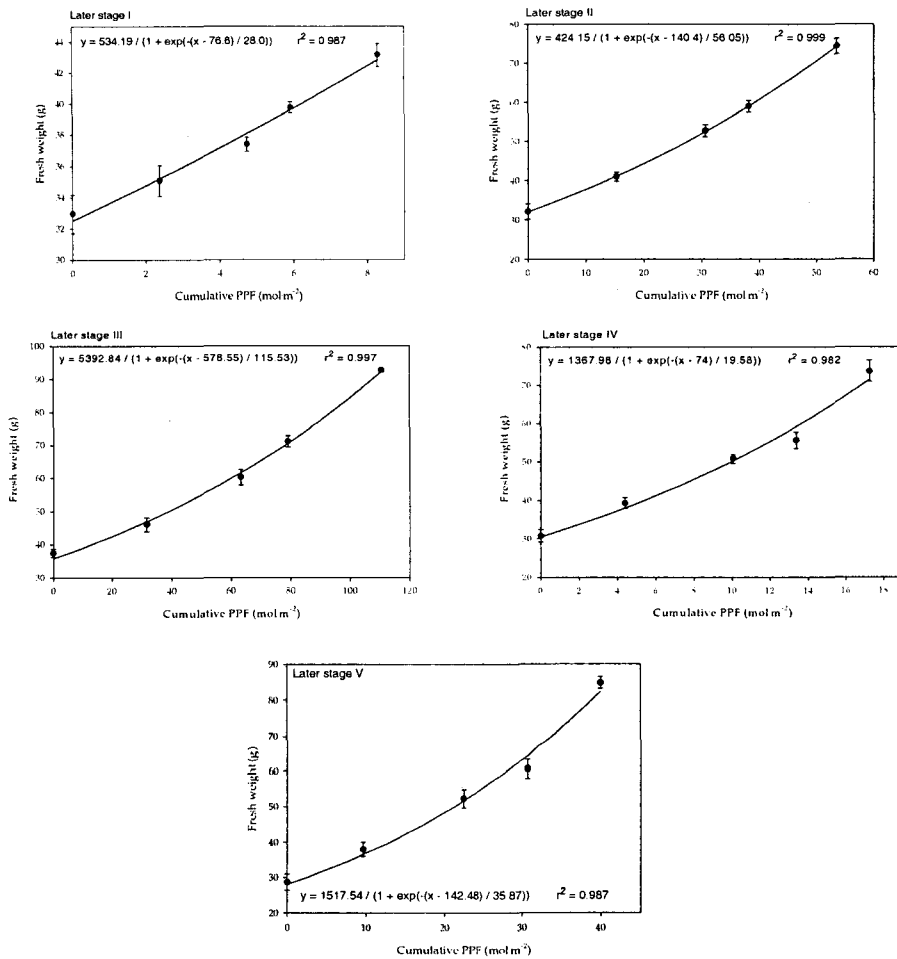


Fig. 4. Relationship between the cumulative PPF and the fresh weight of the later growth stage in leaf lettuce. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) 182.9 μ mol \cdot m² \cdot s⁻¹, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

적산 일사량에 따른 상추의 생체중 증가량을 회귀분석하였다. 설명변수로서 측정 시기까지의 누적일사량(PPFn)과 측정시기 전의 2일간 누적일사량(PPFn) 및 생육일수(DT)로 하였다. 각 설명 변수간의 조합을 통해 회귀계수가 높은 회귀식을 선별하여 Table 1에 나타내고, 각 변수의 계수를 Table 2에 나타내었다.

생육 1단계에서는 적산 일사량에 대한 각 식의 회귀계수가 0.90 이상으로 상당히 높았으며, 당일 누적 적산 일사량과 전 2일간의 누적 일사량 및 생육일수로도 생체중을 예측할 수 있을 것으로 생각된다(Table 1의 Eq. 1). 2단계에서도 회귀계수가 0.85 이상으로 설명변수를 잘 반영하고 있지만, 1단계 모델식을 고려하였을 때 Eq. 3이 생체중 예측에 적용 가능할 것으로 사료된다.

Table 1. Equations of relationships between fresh weight (FWn) and environmental factors in leaf lettuce grown at different light intensities.

Growth stage	Equation No.	Equation ^z
	1	$a \times \text{PPFn} + b \times \text{DPn} + c \times \text{PPFm} + d$
Earlier	2	$a \times \text{PPFm} + b \times (\text{DT})^2 + c \times \text{DPn} + d$
	3	$a \times \text{PPFm} + b \times \text{PPFn} + c \times (\text{DT})^2 + d$
Later	4	$a \times (\text{PPFn})^2 + b \times \text{PPFn} + c \times (\text{DT})^2 + d \times \text{DT} + e$
	5	$a \times \text{Ln}(\text{PPFn}) + b \times (\text{DT})^2 + c$

^zFWn ; fresh weight on measuring day (g),

PPFn ; cumulative photosynthetic photon flux(PPF) to the day ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$),

DT ; growth period (days),

PPFPn ; cumulative PPF during 2 days before measuring time ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$),

PPFm ; $\text{PPFPn} \times \text{PPFn}$ ($\text{mol}^2 \cdot \text{m}^{-4}$),

DPn ; $\text{DT} \times \text{PPFn}$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}$).

Table 2. Coefficients of equation in Table 1.

Regression Equation (Eq. No.)	Coefficient					r^2	
	a	b	c	d	e		
Earlier	1	0.18638	0.01836	-0.0064 4	1.26669	-	0.926***
	2	-0.0024 1	0.03228	0.02196	2.43069	-	0.912***
	3	-0.0049 2	0.30117	0.06353	-1.9249 8	-	0.905***
Later	3	-0.0067 0	0.54383	0.44922	32.32903	-	0.866***
	4	-0.0024 6	0.58950	0.69681	-1.8928 0	34.09389	0.867***
	5	9.43772	0.48920	16.25544	-	-	0.854***

***Significant at $P \leq 0.01$.

이상의 결과로 상추의 생체중은 생육일수, 측정전 2일간의 적산일사량 및 누적 적산 일사량의 편회귀계수가 1단계에서 각각 0.763***, 0.517** 및 0.851***, 2단계에서 0.750***, 0.410^{NS} 및 0.800***로 생육일수보다는 측정 당일까지의 적산일사량에 의해 좌우되는 것으로 나타나 Eq. 3이 생체중 예측에 적합할 것으로 사료된다. 다만 이 모델을 실제 재배에 적용하기 위해서는 광보상점 이하나 광포화점 이상의 광도에서는 생체중이 증가하지 않고 오차만 발생시키므로 적산일사량 산출시 고려해야 할 것으로 생각된다. 생체중 예측시 야간의 호흡량이나 주간의 광합성 속도에 대한 정보가 추가되어야 보다 정확한 양수분 흡수 모델을 개발할 수 있을 것이며 기온과 상대습도에 따라 양수분 흡수 특성이 달라지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

요약 및 결론

적산 일사량에 대한 각 생육요소는 결정계수가 0.9 이상으로 상당히 높았으며, 적산 일사량에 따른 상추 생육은 생체중과 건물중은 $100\text{mol} \cdot \text{m}^2$ 부근에서 꼭점이 나타났다. 이는 생육 중기를 중심으로 그 변화양상이 현저히 다르며 전일 일사량에 따라 생육이 영향을 받았다. 상추의 생체중이 거의 증가하지 않는 광보상점은 12시간 일장에서 $13.7\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 보다 조금 낮았으며, 광도가 증가할수록 생체중도 증가하였다. 그리고 적산일사량에 대한 생체중 증가는 회귀계수가 0.98 이상으로, 광도 실시간 계측에 따른 생체중 증가량을 회귀식을 통해 예측할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 적산일사량에 대한 생체중 증가량을 회귀분석한 결과, 계측시의 적산일사량과 계측시기 전 2일간 누적일사량 및 생육일수를 설명변수로 하여 생체중 증가에 대한 예측이 가능하였고, 모델식은 아래와 같았다.

$$FW_n = aPPF_m + bPPF_n + c(DT)^2 + d$$

[여기서, FW_n =측정시의 생체중(g),

PPF_m =측정전 2일간의 누적일사량×정식시부터 측정시점까지의 누적일사량 ($\text{mol}^2 \cdot \text{m}^{-4}$),

PPF_n =정식시부터 측정일까지 누적일사량 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

DT =생육일수(일),

a, b, c, d=각 요인별 결정상수]

인용문헌

1. Adams, S.R., S. Pearson, and P. Hadley. 1997. An analysis of the effects of temperature and light integral on the vegetative growth of pansy cv. Universal Violet (*Viola × wittrochiana* Gams.) Ann. Bot. 79:219-225.
2. Boote, K.J. and N.B. Pickering. 1994. Modeling photosynthesis of row crop canopies. HortScience 29:1423-1434.
3. Goudriaan, J. and H.H. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology 2. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, Netherlands. 238 p.
4. Kage, H., H. Stutzel, and C. Alt. 2001. Predicting dry matter production of cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*) under unstressed conditions. Part II. Comparison of light use efficiency and photosynthesis-respiration based modules. Sci. Hort. 87:171-190.
5. Landsberg, J.J. 1977. Some useful equations for biological studies. Exp. Agric. 13:273-286.
6. Marcelis, L.F.M., E. Heuvelink, and J. Goudriaan. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. Sci. Hort. 74:83-111.
7. Nielsen, B. 2000. Identification of dynamic plant growth as a function of light quantity. Acta Hort. 519:125-131.