

## Research Report

## 완전제어형 식물 생산 시스템에서 선형 지수 함수를 이용한 썸바귀의 생육 모델

차미경<sup>1</sup>, 손정익<sup>2,3</sup>, 조영열<sup>4,5\*</sup><sup>1</sup>제주대학교 식물자원환경전공<sup>2</sup>서울대학교 식물생산과학부<sup>3</sup>서울대학교 농업생명과학연구원<sup>4</sup>제주대학교 원예환경전공<sup>5</sup>제주대학교 아열대농업생명과학연구소Growth Model of Sowthistle (*Ixeris dentata* Nakai) Using Exponential Function in a Closed-type Plant Production SystemMi-Kyung Cha<sup>1</sup>, Jung-Eek Son<sup>2,3</sup>, and Young-Yeol Cho<sup>4,5\*</sup><sup>1</sup>Major in Plant Resources and Environment, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea<sup>2</sup>Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea<sup>3</sup>Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea<sup>4</sup>Major in Horticultural Science, Jeju National University, Jeju 696-756, Korea<sup>5</sup>Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, Jeju National University, Jeju 696-756, Korea

**Abstract:** The objective of this study was to make growth and yield models of sowthistle (*Ixeris dentata* Nakai) by using an exponential functional equation in a closed-type plant production system. The growth and yield of hydroponically-grown sowthistle were investigated under four different planting distances (15 × 10, 15 × 15, 15 × 20, and 15 × 25 cm). Shoot dry weights per plant was the highest at 15 × 25 cm, but was the lowest at 15 × 10 cm. Shoot dry weights per area was the highest at 15 × 15 cm, but was the lowest at 15 × 25 cm. The optimum planting density and planting distance for yield of sowthistle were 44 plants/m<sup>2</sup> and 15 × 15 cm, respectively. Shoot dry weights per plant and per area were showed as an exponential type functional equation. A linear relationship between shoot dry and fresh weights was observed to be linear regardless of the planting distance. Crop growth rate, relative growth rate and lost time in an exponential functional equation showed quadratic function form. Radiation use efficiency of sowthistle was 4.3-6.1 g·MJ<sup>-1</sup>. The measured and estimated shoot dry weights showed a good agreement using days after transplanting as input data. It is concluded that the exponential growth model can be a useful tool for quantifying the growth and yield of sowthistle in a closed-type plant production system.

**Additional key words:** hydroponics, modeling, planting distance, plant factory, shoot dry weight per area

## 서 언

썸바귀는 국화과의 식물로 초장이 50cm 정도로 자라는 1년생 식물이다. 이 식물은 당뇨병 예방(Choi et al., 1990; Hong et al., 2010), 암 발생 억제(Kim et al., 2002) 및 항산화 활성 능력을 가지고 있어 성인병 치료에 이용되고 있다

(Hong et al., 2010; Kim et al., 2002; Lee, 2011). 최근 들어 식물공장에서 썸바귀와 같은 자생식물을 기능성 채소로 재배하려는 연구들이 진행되고 있다(Cha et al., 2012). 썸바귀는 미국에서 추진했던 CELSS(Controlled Ecological Life Support System) 프로젝트에서 추천한 작물로 선정되기도 했다(Qin et al., 2008). 식물공장은 작물 재배에 적합한 최적

\*Corresponding author: yycho@jejunu.ac.kr

※ Received 2 September 2013; Revised 12 October 2013; Accepted 19 November 2013. 이 논문은 2013학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

© 2014 Korean Society for Horticultural Science

환경조건으로 작물을 재배할 수 있기 때문에, 계획적인 생산이 가능하다. 즉, 온실 시설보다 생산량 예측이 쉽다는 것을 의미한다. 온실에서 작물의 생산량을 예측하기 위한 대표적인 환경 요인으로는 광, 온도 및 재식밀도 등이 있다. 식물공장에는 인공광만으로 작물을 재배하는 완전제어형 식물공장과 광이 부족한 경우 인공광을 보광하는 인공광 병용형 식물공장으로 구분되는데, 특히 완전제어형 식물공장에서 광의 광도와 온도는 작물 재배에 적합한 조건으로 조성이 가능하다. 반면, 재식밀도는 작물 생육의 진전에 따라 유동적으로 변화시킬 수 있기 때문에 변화된 재식밀도에 따른 작물의 생육 예측이 필요하다. 작물의 생산량을 예측하기 위해 선형 지수(exponential) 함수를 이용한 많은 기존 연구들이 있다(Dennett and Ishag, 1998; Goudriaan and Monteith, 1990; Ishag and Dennett, 1998; Lee et al., 2003; Tei et al., 1996a). 이 함수는 지수 함수와 선형 함수를 합친 식으로, 작물은 생육 초기에는 지수 함수식으로 생육하다가 식물 군락간의 잎이 겹쳐지는 시기에는 선형 함수식으로 생육한다는 것을 의미한다(Goudriaan and Van Laar, 1994). 시설원예에서 대부분의 작물 생육 곡선은 이러한 선형 지수 함수식으로 표현할 수가 있다. 또한 식물공장에서는 균일한 환경조건 하에서의 작물 재배가 가능하기 때문에 이러한 함수식을 이용하면, 시간에 따른 작물의 생산량을 쉽게 예측할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구는 완전제어형 식물공장에서 선형 지수 함수를 이용하여 설정된 환경조건(광, 온도, 이산화탄소농도와 상대습도 등)에서 재식밀도에 따른 썸바귀의 생육을 예측해 보고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 식물재료

실험은 제주대학교에서 2013년 3월 12일부터 4월 30일까지 수행되었다. 본 실험에 사용된 공시작물로는 썸바귀(아랍종묘)를 사용하였으며, 우레탄 스폰지(2.5 × 2.5 × 2.5cm)에 3월 12일 파종한 후, 본엽이 2매 나온 3월 28일에 식물공장 내 베드에 정식하였다. 생육변화를 알아보기 위해 4월 12일, 4월 18일, 4월 23일과 4월 30일 생육을 조사하였다.

### 완전제어형 식물공장

식물공장 유형은 완전제어형 식물공장(770 × 500 × 300cm, L × W × H)형태였다. 인공광원으로는 삼파장 형광등(55W,

Philips Co., Ltd., The Netherlands)을 사용하였으며, 광주기는 12시간으로 설정하였다. 광도는 형광등을 베드 바닥면으로부터 40cm 상단에 설치하여  $140\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하였다. 수경재배시스템은 3층으로 구성된 박막수경(NFT)시스템(240 × 60 × 200cm, L × W × H)으로 배양액의 비료 염은  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  236g,  $\text{KNO}_3$  707g,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  196g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  246g, Fe-EDTA 23g,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.08g,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  2.86g,  $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  2.11g,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.23g,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.024g으로 조성하였다. 배양액통 용량은 110L였으며, 초기 배양액량은 90L였다. 배양액 공급은 본엽이 나왔을 때부터 시작하였으며, 배양액의 pH는 5.5-6.5, EC는  $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 으로 설정하였다. 배양액의 pH와 EC는 매 1-2일 간격으로 측정하여 수돗물과 농축 양액으로 보정하였다. 배양액 공급 주기는 수중모터(UP-400, Hyub Shin, Korea)를 이용하여 10분마다 공급하였으며, 배양액은 실험이 끝날 때까지 교환하지 않았다.

광도는 광 센서(LI-190, Li-cor, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 측정하였으며, 온도와 상대습도센서(HMP45AC, Campbell Scientific, Logan UT, USA)와 이산화탄소 센서(GMP222, Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용하여 온도, 상대습도 및 이산화탄소 농도를 측정하였다. 식물공장 내 온도,

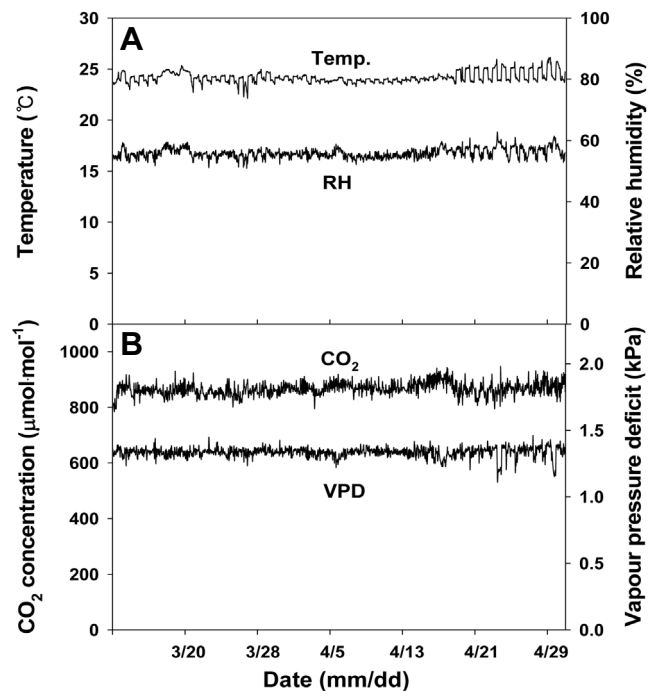


Fig. 1. Changes of temperature, relative humidity (RH),  $\text{CO}_2$  concentration and vapour pressure deficit (VPD) during the experimental period (March 12-April 30, 2013).

상대습도(포화수증기압차)와 이산화탄소 농도는 제어기(SDM-CD16AC, Campbell Scientific, Logan UT, USA)를 이용하여 ON/OFF 제어하였다. 온도는 에어컨(HP-N239L, 삼성전자, 한국)과 히터기(HV-7800, ㈜한빛시스템, 한국)를 이용하여 20-25°C로 관리하였으며, 온도(최소값-최대값) 변화는 22.2-26.1°C(평균 24.2°C)였다(Fig. 1A). 상대습도는 가슴기(NH-5, 화전엔지니어링, 한국)와 제습기(SG-M220S-4, ㈜신안그린테크, 한국)를 이용하여 포화수증기압차로 제어하였다. 포화수증기압차는 1.11-1.46kPa로 설정하였다. 상대습도(최소값-최대값) 변화는 50.9-62.6%(평균 55.9%)였으며(Fig. 1A), 포화수증기압차(최소값-최대값) 변화는 1.11-1.46kPa(평균 1.33kPa) 범위로 유지되었다(Fig. 1B). 이산화탄소는 지하공기를 이용하여(Kim et al., 2007) 600-900 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 을 설정하였으며, 이산화탄소 농도(최소값-최대값) 변화는 775-944 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (평균 866 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 범위로 유지되었다(Fig. 1B). 공기 유동은 공기순환팬(SGA-120, ㈜신안그린테크, 한국)을 이용하였다. 센서위치는 바닥면으로부터 1.5m에 설치하였으며, 식물공장 3곳에서 측정된 평균값을 이용하여 설정값에 맞게 제어하였다. 광도, 온도, 상대습도, 이산화탄소 자료는 데이터수집장치(CR-1000, Campbell Scientific, Logan UT, USA)를 이용하여 매 10분마다 평균하여 1시간마다 매일 수집하였다.

### 생육 모델과 검증

생육량 변화는 Goudriaan and Monteith(1990)가 제안한 시간에 따른 선형 지수 함수식을 사용하였다(등식 (1)).

$$W = C_m / R_m \cdot \ln [1 + \exp \{R_m \cdot (t - t_b)\}] \quad (1)$$

W는 건물중(g/plant),  $C_m$ 는 작물생장율( $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ),  $R_m$ 는 상대생장율( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ), t는 정식 후 요일,  $t_b$ 는 잎이 포개지는 시점(lost time, d)이다. 재식거리는 열 간의 간격을 15cm로 고정된 후 열 내의 간격을 10, 15, 20, 25cm로 하였다. 생육 조사는 정식 후 15일, 22일, 27일 및 34일 실시하였다. 재식거리에 따른 생육량을 측정하여 SAS 프로그램(Release 9.01, SAS institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 모델의 계수값을 추정하였다. 광사용효율(Radiation use efficiency)은 단위면적당 건물중을 적산일사량으로 나누어 계산하였다. 광원 변환값은 광원이 형광등일 경우,  $1W = 4.59\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1W\cdot\text{m}^{-2} = 0.86\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 와  $1\text{cal}\cdot\text{m}^{-2} = 4.184\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 을 사용하였다.

### 통계분석

실험구 배치는 완전임의배치법을 사용하였으며, SAS 프로그램을 이용하여 계수값을 유추하였다. 모델 함수의 계수는 SAS 프로그램 중 Gauss-Newton 방법을 이용하였다.

## 결과 및 고찰

개체당 건물중은 25cm 처리구가 가장 높았으며, 10cm 처리구가 가장 낮았다(Fig. 2). 단위면적당 건물중으로 보면 15cm 처리구가 가장 높았으며, 25cm 처리구가 가장 낮았다. 정식 후 34일째, 25cm 처리구가 10cm 처리구보다 개체당 건물중이 190% 높았으며, 15cm 처리구가 25cm 처리구보다 단위면적당 건물중은 143% 높았다. NeSmith(1997)와 Reiners and Riggs(1999)도 재식밀도가 높으면 높을수록 적정 재식밀도까지 수량이 증가한다고 하였다. 본 연구에서도 같은 결과였으며, 썸바귀 생육을 위한 적정 재식밀도와 재식거리는 각각 44plant/m<sup>2</sup>와 15 × 15cm였다. 정식 후 일수에 따른 건물중의 변화 곡선은 선형 지수적인 형태를 보여, 재식거리에 따른 선형 지수 형태를 이용하여 모델식을 예측할 수 있었다.

건물중은 작물의 생산성과 환경과의 관계를 표현하는데 있어 중요한 요인(Both et al., 1997)이지만, 건물중보다는 생체중이 경제적인 측면에서 중요하기(Lin, 2002) 때문에, 건물중과 생체중과의 관계를 밝힐 필요가 있다. 즉, 건물중 예측으로 생체중도 예측할 수 있다. 모든 재식거리에서 개

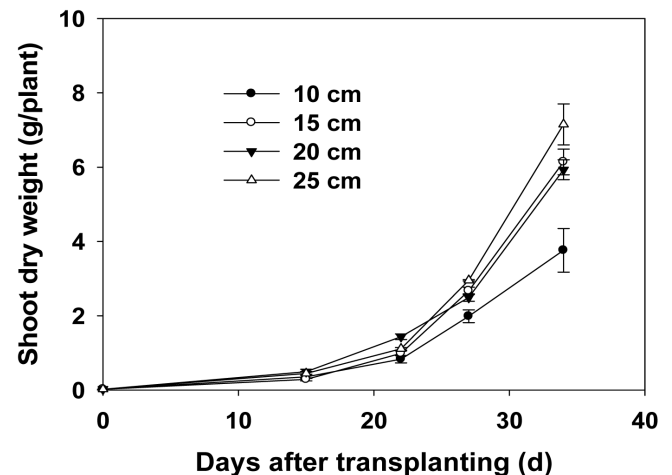


Fig. 2. Effect of four different planting distances on shoot dry weights (g/plant) of sowthistle. Vertical bars indicate SE of the means of four replications.

체당 건물중과 생체중 비율은 유사하였다(Fig. 3). 재식거리에 따른 개체당 건물중과 생체중의 비율은 9-10% 정도였다. 또한 개체당 건물중과 생체중과의 관계는 재식거리와는 무관하게 직선적인 관계를 보였다( $Y = 11.4 \cdot X, R^2 = 0.988^{***}$ ). 본 연구에서는 개체당 건물중으로 생체중을 선형 함수식으로 예측할 수 있다.

Fig. 2를 바탕으로 등식 (1) 함수로 예측한 각 항목에 대한 계수값과 표준오차는 Table 1과 같다. 재식거리에 따른 작물생장율(CGR), 상대생장율(RGR)과 lost time( $T_b$ ) 등은 쌍곡선(2차 함수) 형태를 보였다. 작물생장율과 lost time은 같은 형태의 쌍곡선 형태를 보였다. 상대생장율은 다른 형태의 쌍곡선 형태를 보였다. 이러한 쌍곡선 형태로 재식거리에 따른 생육량을 시간에 따라 예측할 수 있다. Cho et al. (2012)의 결과와 비교해 보면, 광도 차이에 따른 생육량 차

이로, *expolinear* 함수의 계수값에 차이가 났다. 식물공장에서 광도가 높을수록 썸바귀의 생육 초기에는 상대생장율이 높지만, 후기에는 작물생장율이 낮아짐을 볼 수 있었다. 그리고 잎이 포개지는 시점이 빠르다는 것을 알 수 있었다.

광사용효율(radiation use efficiency, LUE)은 재식거리에 영향을 받는다. 재식거리 10, 15, 20, 25cm에 따른 광사용효율은 각각 5.6, 6.1, 4.4, 4.3g·MJ<sup>-1</sup>이었다. 배추과의 광사용효율은 컬리플라워 3.15g·MJ<sup>-1</sup>(Kage et al., 2001), 브로콜리 1.44g·MJ<sup>-1</sup>(Francescangeli et al., 2006)였으며, 국화과의 광사용효율은 상추 2.43g·MJ<sup>-1</sup>(Tei et al., 1996b), 반결구상추 2.71g·MJ<sup>-1</sup>(Beccafichi et al., 2003), 치커리 1.9-2.6g·MJ<sup>-1</sup>(Monti et al., 2005)로 알려져 있다. 본 연구에서 국화과인 썸바귀의 광사용효율은 다른 국화과인 상추와 치커리보다 높은 값을 보였다. 그 이유로는 식물공장에서 온도, 상대습도 및 이산화탄소 농도가 다른 시설재배보다 썸바귀 생육에 적합한 조건이었기 때문에 광사용효율이 높은 것으로 추측된다. 수수와 옥수수에서 포화수증기압차는 광사용효율과 부의 관계가 나타난다(Kiniry et al., 1998). 따라서, 광사용효율을 높이기 위한 방법 중 하나로, 포화수증기압차에 따른 썸바귀의 생육 특성을 조사할 필요가 있다.

등식 1로 재식거리에 따른 선형 지수 함수식으로 예측한 건물중과 실측한 건물중과의 관계는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서의 직선은 예측한 건물중과 실측한 건물중의 비율이 1인 것을 의미한다. 따라서 건물중을 검증한 결과, 시간에 따른 생육량을 예측할 수 있었다. 예를 들면, 15 × 15cm의 재식거리로 썸바귀를 25일간 재배할 경우(환경조건은 본 연구와 동일하다고 가정), 건물중은 1.53g/plant, 생체중은 17.6g/plant과 단위면적당 수량은 0.78kg·m<sup>-2</sup>으로 예측할 수 있었다.

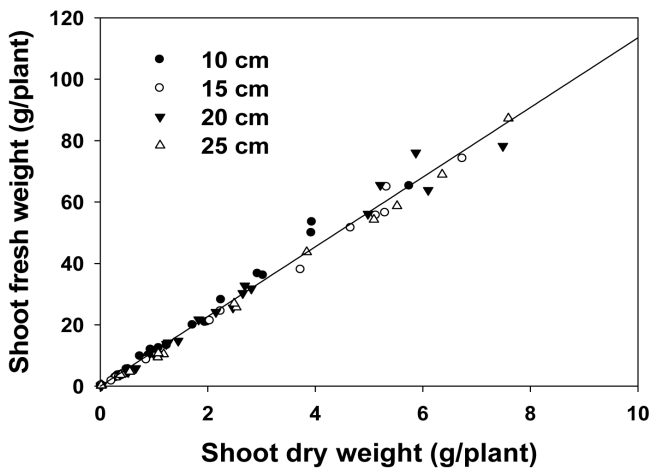


Fig. 3. Relationship between shoot dry and shoot fresh weights of sowthistle. Regressive equation was  $y = 11.4 \cdot x$  ( $R^2 = 0.988^{***}$ ).

Table 1. Parameter values obtained by fitting the *expolinear* growth model<sup>z</sup> as a function of time at four different planting distances.

Planting distance (cm)	Crop growth rate (g·d <sup>-1</sup> )	Relative growth rate (g·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	T <sub>b</sub> <sup>y</sup> (d)
10	1.35 ± 0.823 <sup>x</sup>	0.15 ± 0.012	37.9 ± 6.19
15	1.02 ± 0.072	0.18 ± 0.004	31.4 ± 0.74
20	0.76 ± 0.149	0.17 ± 0.016	28.3 ± 2.48
25	1.25 ± 0.501	0.17 ± 0.018	32.5 ± 4.26

<sup>z</sup> $W = C_m / R_m \cdot \ln [1 + \exp \{R_m \cdot (t - t_b)\}]$ ; W = shoot dry weight, C<sub>m</sub> = crop growth rate, R<sub>m</sub> = relative growth rate, T<sub>b</sub> = lost time and t = day after transplanting.

<sup>y</sup>The lost time to indicate the time lost during canopy development before all radiation is intercepted.

<sup>x</sup>Mean ± standard error (n = 4).

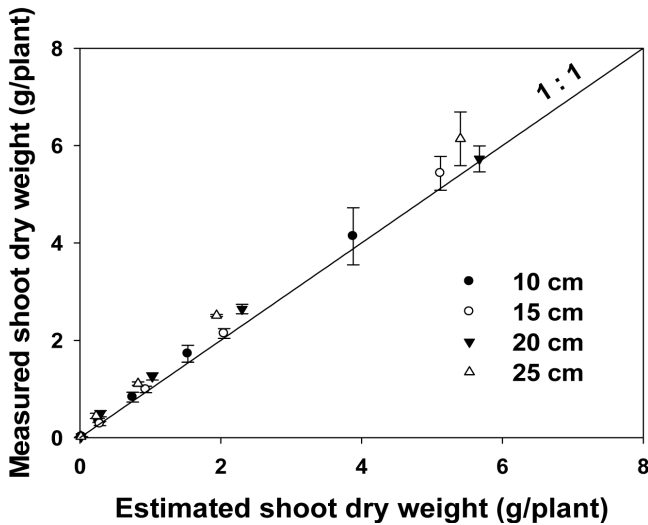


Fig. 4. Comparison of measured and estimated shoot dry weights of sowthistle at four different planting distances. Each dot was the mean value of four plants. Vertical bars indicate SE of the means.

이러한 함수식은 생육과 수량을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 완전제어형 식물공장에서 계획적인 연중 생산체계를 구축하는데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 완전제어형 식물공장에서 작물을 재배할 경우, 환경요인(광, 온도, 이산화탄소 농도 등)에 따라 작물의 생육 차이가 발생한다. 식물의 최적 환경요인을 맞추어 재배하는 것이 가장 이상적인 환경관리이지만, 모든 최적의 환경 조건을 설정하는 데에는 시간과 경비가 많이 소요된다. 본 연구는 설정한 환경요인에 대해 재식밀도에 따른 생육과 수량을 예측할 수 있지만, 생육 환경 요인이 다르게 설정할 경우, 생육과 수량 차이가 발생할 수 있다. 생육과 수량 예측 모델을 더 정확하고 정밀하게 만들기 위해서는 개별적인 적정 환경 요인에 대한 연구와 복합환경요인에 대한 연구가 필요하리라 생각한다.

본 연구에서는 상대습도를 제어하기보다는 포화수증기압차를 제어하였다. 그 이유는 포화수증기압차는 광합성률과 광사용효율에 밀접한 관련이 있다고 한 Kiniry et al.(1998)의 연구 결과 때문이다. 그 결과는 옥수수와 수수에서 포화수증기압차가 크면 클수록 광합성률과 광사용효율은 감소한다는 것이다. 따라서, 작물에 따른 적정 포화수증기압차를 설정하여 제어할 경우, 작물의 광합성과 광사용효율은 향상될 것이다.

결론적으로, 선형 지수 함수는 썬바귀의 생육과 수량을 예측하는데 유용한 함수였으며, 재식거리에 따라 썬바귀의

생육과 수량을 예측할 수 있었다.

## 초 록

본 연구는 완전제어형 식물공장에서 선형 지수 함수를 이용하여 재식거리(15 × 10, 15 × 15, 15 × 20, 15 × 25cm)에 따른 썬바귀의 생육과 수량 모델을 개발하고자 수행되었다. 개체당 건물중은 25cm 처리구가 가장 높았으며, 10cm 처리구가 가장 낮았다. 단위면적당 건물중으로 보면 15cm 처리구가 가장 높았으며, 25cm 처리구가 가장 낮았다. 따라서 썬바귀 생육을 위한 적정 재식밀도와 재식거리는 각각 44 plants/m<sup>2</sup>와 15 × 15cm였다. 정식 후 일수에 따른 건물중의 변화 곡선은 선형 지수적인 형태를 보였으며, 재식거리에 따른 선형 지수 형태를 이용하여 모델식을 예측할 수 있었다. 개체당 건물중과 개체당 생체중과의 관계는 재식거리와는 무관하게 직선적인 관계를 보여, 건물중 예측으로 생체중도 예측할 수 있었다. 선형 지수 함수식에서 작물생장과 상대생장률, lost time는 쌍곡선 형태를 보였다. 썬바귀의 광사용효율은 4.3-6.1g·MJ<sup>-1</sup>였다. 재식거리에 따른 썬바귀의 생육과 수량은 선형 지수 함수식으로 정확하게 예측할 수 있었다. 결론적으로, 선형 지수 함수는 완전제어형 식물공장에서 썬바귀의 생육과 수량을 예측하는데 유용한 함수였으며, 생육과 수량 모델을 개발할 수 있었다.

**추가 주요어 :** 수경재배, 모델링, 재식거리, 식물공장, 단위 면적당 건물중

## 인용문헌

- Beccafichi, C., P. Benincasa, M. Guiducci, and F. Tei. 2003. Effect of crop density on growth and light interception in greenhouse lettuce. *Acta Hort.* 614:507-513.
- Both, A.J., L.D. Albright, R.W. Langhans, R.A. Reiser, and B.G. Vinzant. 1997. Hydroponic lettuce production influenced by integrated supplemental light levels in a controlled environmental facility: Experimental results. *Acta Hort.* 418:45-51.
- Cha, M.K., J.S. Kim, and Y.Y. Cho. 2012. Growth response of lettuce to various levels EC and light intensity in plant factory. *J. Bio-Env. Con.* 21:305-311.
- Cho, Y.Y., K.Y. Choi, Y.B. Lee, and J.E. Son. 2012. Growth characteristics of sowthistle (*Ixeris dentate* Nakai) under different levels of light intensity, electrical conductivity of nutrient solution,

- and planting density in a plant factory. Hort. Environ. Biotechnol. 53:368-372.
- Choi, J.S., H.S. Young, and B.W. Kim. 1990. Hypoglycemic and hypolipemic effects of *Ixeris dentate* in diabetic rats. Arch. Pharm. Res 13:269-273.
- Dennett, M.D. and K.H.M. Ishag. 1998. Use of the expolinear growth model to analyze the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: Predictive use of the model. Ann. Bot. 82:507-512.
- Francescangeli, N., M.A. Sangiacomo, and H. Martí. 2006. Effects of plant density in broccoli on yield and radiation use efficiency. Sci. Hort. 110:135-143.
- Goudriaan, J. and H.H. Van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Current issues in production ecology 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Goudriaan, J. and J.L. Monteith, 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. Ann. Bot. 66:695-701.
- Hong, S.G., D.M. Jeong, K.Y. Kim, and E.H. Hwang. 2010. The composition of the root of *Ixeris dentata* var. *albiflora* Nakai. and cell viability and DPPH radical scavenging activities of its extract. Kor. J. Nutr. 43:105-113.
- Ishag, K.H.M. and M.D. Dennett. 1998. Use of the expolinear growth model to analyze the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: Fitting the model. Ann. Bot. 82:497-505.
- Kage, H., H. Stützel, 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.
- Kim, J.H., M.S. Sung, I.S. So, and H.N. Hyun. 2007. Study on the distribution and utilization of basalt underground air in Jeju volcanic island. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 25(Suppl. II):113. (Abstr.)
- Kim, M.J., J.S. Kim, D.M. Jeong, S.S. Ham, and C.Y. Yu. 2002. Effect of antioxidant, antimutagenicity and anticancer of root extract from *Ixeris dentata* Nakai. Korean J. Medicinal Crop Sci. 10:222-229.
- Kiniry, J.R., J.A. Landivar, M. Witt, T.J. Gerik, J. Cavero, and L.J. Wade. 1998. Radiation-use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. Field Crops Res. 56:265-270.
- Lee, E. 2011. Effects of *Ixeris dentata* ext. on lowering lipid and anti-oxidation. Korean J. Plant Res. 24:55-60.
- Lee, J.H., J. Goudriaan, and H. Challa. 2003. Using the expolinear growth equation for modeling crop growth in year-round cut chrysanthemum. Ann. Bot. 92:697-708.
- Lin, W.C. 2002. Crop modeling and yield prediction for greenhouse-grown lettuce. Acta Hort. 593:159-164.
- Monti, A., M.T. Amaducci, G. Pritoni, and G. Venturi. 2005. Growth, fructan yield, and quality of chicory (*Cichorium intybus* L.) as related to photosynthetic capacity, harvest time, and water regime. J. Exp. Bot. 56:1389-1395.
- NeSmith, D.S. 1997. Summer squash (*Cucurbita pepo* L.) leaf number as influenced by thermal time. Sci. Hort. 68:219-225.
- Qin, L., S. Guo, W. Ai, and Y. Tang. 2008. Selection of candidate salad vegetables for controlled ecological life support system. Adv. Space Res. 41:768-772.
- Reiners, S. and D.I.M. Riggs. 1999. Plant population affects yield and fruit size of pumpkin. HortScience 34:1076-1078.
- SAS Institute. 1985. SAS user's guide: Statistics. 5th ed. SAS Inst., Cary, NC, USA.
- Tei, F., D.P. Aikman, and A. Scaife. 1996a. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth modeling. Ann. Bot. 78:645-652.
- Tei, F., A. Scaife, and D.P. Aikman. 1996b. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. Ann. Bot. 78:633-643.