

Research Report

완전제어형 식물 생산 시스템에서 선형 지수 함수를 이용한 Common Ice Plant의 생육 모델

차미경¹, 김주성^{1,2,3}, 조영열^{2,3,4*}¹제주대학교 식물자원환경전공²제주대학교 아열대농업생명과학연구소³제주대학교 친환경농업연구소⁴제주대학교 원예환경전공

Growth Model of Common Ice Plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) Using Expolinear Functions in a Closed-type Plant Production System

Mi-Kyung Cha¹, Ju-Sung Kim^{1,2,3}, and Young-Yeol Cho^{2,3,4*}¹Major in Plant Resources and Environment, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea²Major in Horticultural Science, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea³Sustainable Agriculture Research Institute, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea⁴Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract: The objective of this study was to make growth and yield models for common ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) using expolinear functional equations in a closed-type plant production system. Three-band radiation type fluorescent lamps with a 12-hours photoperiod were used, and the light intensity was $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Nutrient film systems with three layers were used for plant growth. Environmental conditions, such as air temperature, relative humidity and CO₂ concentration were controlled by an ON/OFF operation. Leaf area, shoot fresh and dry weights, light use efficiency of common ice plant as function of days after transplanting, accumulative temperature and accumulative radiation were analyzed. Leaf area, shoot fresh and dry weights per area were described using an expolinear equation. A linear relationship between shoot dry and fresh weights was observed. Light use efficiency of common ice plant was $3.3 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ at 30 days after transplanting. It is concluded that the expolinear growth model can be a useful tool for quantifying the growth and yield of common ice plant in a closed plant production system.

Additional key words: hydroponics, light use efficiency, modeling, shoot dry weight per area, shoot fresh weight per area

서 언

Common ice plant(*Mesembryanthemum crystallinum* L.)는 번행초과(Aizoaceae)의 식물로 초장이 10-50cm 정도로 자라는 포복성 식물이다. 이 식물은 다육식물로 아프리카, 서아시아와 유럽 등이 원산지이다. 종자는 광발아종자로 발아소요일수는 30-90일 정도가 된다. 잎과 줄기는 원물 또는 식품류에 사용된다. 잎과 줄기는 간과 신장의 질병 치료에

이용되며, 또한 이 식물에 함유된 polyol은 황산화 활성 능력을 가지고 있다(Agarie et al., 2009). 일본에서 성인병 예방에 좋은 고기능성 식물로 알려지면서(Agarie et al., 2009), 우리나라에서도 재배하고자 하는 농민들이 늘어나고 있다.

식물공장은 최적의 조건으로 식물을 재배할 수 있기 때문에, 연중 계획적인 생산이 가능하다. 식물공장에는 인공광만으로 식물을 재배하는 완전제어형 식물공장과 광이 부족한 경우 인공광을 보광하는 인공광 병용형 식물공장으로 구

*Corresponding author: yycho@jejunu.ac.kr

※ Received 25 January 2014; Revised 31 March 2014; Accepted 29 April 2014. 본 연구는 한국연구재단 신진연구지원사업(2010-0003358)으로 지원된 연구임.

© 2014 Korean Society for Horticultural Science

분된다. 완전제어형 식물공장에서 광도, 온도, 상대습도와 이산화탄소농도 등은 작물 재배에 맞게 최적의 조건으로 맞춰져 있어, 자연광을 이용하는 시설원예보다 환경 변화에 따른 생육 예측이 쉬운 장점이 있다. 이러한 식물의 생산량을 예측하기 위해 선형 지수(exponential) 함수가 많이 사용된다(Dennett and Ishag, 1998; Goudriaan and Monteith, 1990; Ishag and Dennett, 1998; Lee et al., 2003; Tei et al., 1996b). 이 함수는 지수 함수와 선형 함수를 합친 식으로, 식물이 초기 생육에는 지수 형태로 생육하다가 식물간의 잎이 겹쳐지면서 선형 형태로 생육하는 형태를 표현한 식이다(Goudriaan and Van Laar, 1994). 식물공장은 균일한 환경조건으로 식물을 재배하기 때문에 이러한 함수식을 이용하면 식물의 생산량을 쉽게 예측할 수 있을 것이다. Common ice plant가 고부가가치 식물로 알려지면서 최적의 환경조건을 갖춘 식물공장에서 이 식물을 재배하고자 하는 연구들이 많이 이루어지고 있다. 따라서, 본 연구는 완전제어형 식물공장에서 선형 지수 함수를 이용하여 common ice plant의 생육을 예측해 보고자 수행되었다.

재료 및 방법

식물재료

실험은 제주대학교에서 2012년 5월 25일부터 7월 12일까지 수행되었다. 본 실험에 사용된 공시작물로는 common ice plant를 사용하였으며, 우레탄 스폰지(2.5 × 2.5 × 2.5cm)에 5월 25일 파종하였다. Common ice plant의 본엽이 2매 나온 6월 12일 재식거리 15 × 15cm(44plants/m²)로 하여 베드에 정식하였다. 생육변화를 알아보기 위해 6월 22일(정식 후 10일), 6월 27일(정식 후 15일), 7월 2일(정식 후 20일)과 7월 12일(정식 후 30일) 생육을 조사하였다.

완전제어형 식물공장

식물공장 유형은 완전제어형 식물공장(770 × 500 × 300cm, L × W × H) 형태였다. 인공광원은 삼파장 형광등(55W, Philips Co., Ltd., The Netherlands)을 사용하였으며, 광주기는 12시간 일장주기였다. 광도는 형광등을 베드 바닥면으로부터 40cm 위에 설치하여 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하였다. 수경재배시스템은 3층으로 구성된 박막수경(NFT)시스템(240 × 60 × 200cm, L × W × H)으로 배양액의 비료염은 Ca(NO₃)₂·4H₂O 354g, KNO₃ 404g, NH₄H₂PO₄ 77g, MgSO₄·7H₂O 246g으로 조성하였다. 배양액통 용량은 110L였으며,

배양액량은 90L였다. 배양액 공급은 본엽이 나왔을 때부터 시작하였으며, 배양액의 pH는 5.5-6.5, EC는 1.0dS·m⁻¹로 설정하였다. 배양액의 pH와 EC는 매 1-2일 간격으로 측정하여 보정하였다. 배양액 공급주기는 10분마다 공급하였으며, 배양액은 실험이 끝날 때까지 교환하지 않았다.

광도는 광 센서(LI-190, Li-cor, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 측정하였으며, 온도와 상대습도 센서(HMP45AC, Campbell Scientific, Logan UT, USA)와 이산화탄소 센서(GMP222, Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용하여 온도, 상대습도 및 이산화탄소 농도를 측정하였다. 식물공장 내 온도, 상대습도와 이산화탄소 농도는 제어기(SDM-CD16AC, Campbell Scientific, Logan UT, USA)를 이용하여 ON/OFF 제어하였다. 온도는 에어컨(HP-N239L, Samsung Electronics Co., Ltd., Korea)과 히터기(HV-7800, Hanvit System Co., Ltd., Korea)를 이용하여 21.6-26.6°C(평균 23.0°C)로 관리하였으며, 상대습도는 가습기(NH-5, Hwajeun Eng., Korea)와 제습기(SG-M220S-4, Shinan Green-Tech Co., Ltd., Korea)를 이용하여 59.7-80.0%(평균 68.4%)로 관리하였다(Fig. 1A). 이산화탄소 농도는 지하공기를 이용하여(Kim et al., 2007) 857-1,061 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (평균 948 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)로 관리하였다(Fig.

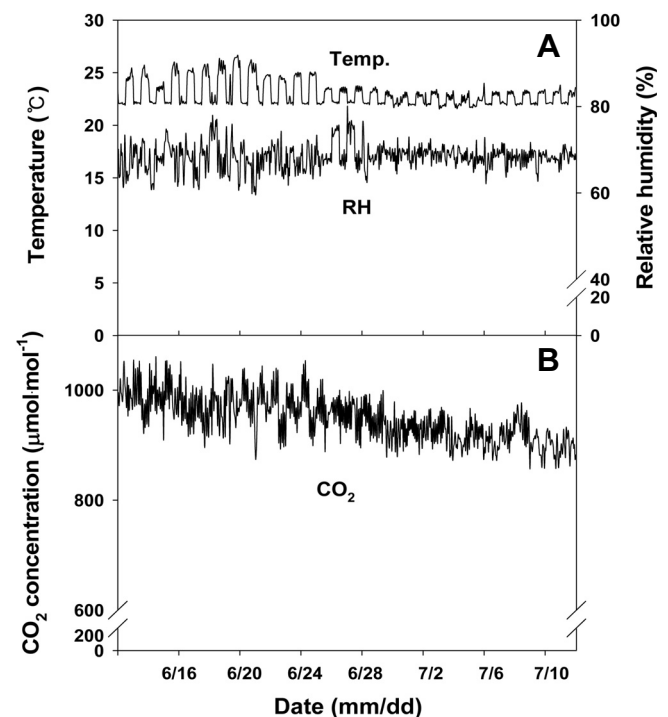


Fig. 1. Changes of temperature (A), relative humidity and CO₂ concentration (B) during the experimental period (June 12-July 12, 2013).

1B). 공기 유동은 공기순환팬(SGA-120, Shinan Green-Tech Co., Ltd., Korea)을 이용하였다. 센서위치는 바닥면으로부터 1.5m에 설치하였으며, 식물공장 3곳에서 측정된 평균 값을 이용하여 설정값에 맞게 제어하였다. 광도, 온도, 상대 습도, 이산화탄소 농도 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 선형 지수 함수식을 사용하였다(식 (1)).

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

W는 엽면적(cm^2), 단위면적당 지상부 생체중($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 또는 단위면적당 지상부 건물중($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), C_m 는 작물생장율($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), R_m 는 상대생장율($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), t는 정식 후 일수, 적산온도 또는 적산일사량, t_b 는 잎이 포개지는 시점(lost time, d)이다. 생육량을 측정하여 SAS 프로그램(Release 9.01, SAS institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 모델의 계수값을 추정하였다. 광사용효율(Light use efficiency)은 단위면적당 지상부 건물중을 적산일사량으로 나누어 계산하였다.

통계분석

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

결과 및 고찰

정식 후 일수에 따른 엽면적의 변화 곡선은 선형 지수적인 형태를 보였으며(Fig. 2A), 적산온도와 적산일사량에 따른 엽면적도 같은 형태를 보였다(Figs. 2B and 2C). Common ice plant의 잎이 포개지는 시점은 18일, 426°C 또는 $34\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었다. 정식 후 30일째 common ice plant의 엽면적지수는 4.6이었다. 정식 후 일수에 따른 단위면적당 지상부 생체중의 변화 곡선은 선형 지수적인 형태를 보였으며(Fig. 3A), 적산온도와 적산일사량에 따른 단위면적당 지상부 생체중도 같은 형태를 보였다(Figs. 3B and 3C). 지상부 생체중으로 계산한 common ice plant의 잎이 포개지는 시점은 21일,

484°C 또는 $39\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었다. 정식 후 일수에 따른 단위면적당 지상부 건물중의 변화 곡선은 선형 지수적인 형태를 보였으며(Fig. 4A), 적산온도와 적산일사량에 따른 단위면

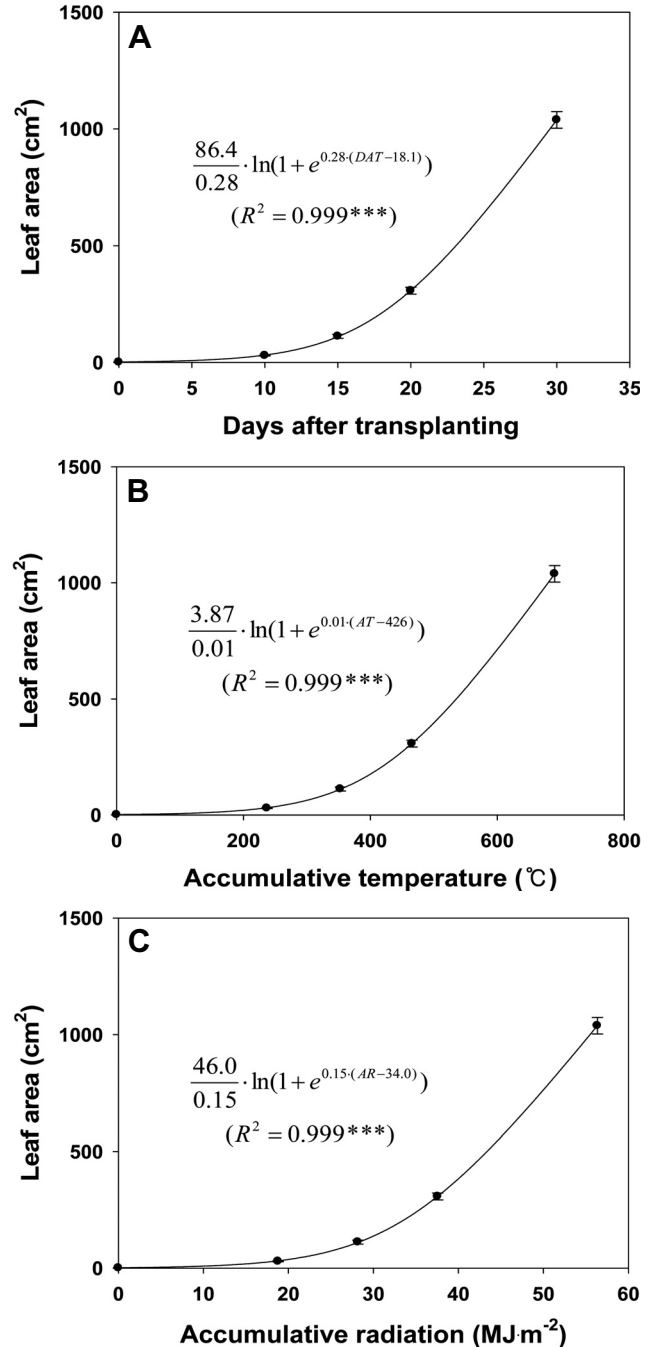


Fig. 2. Leaf area (cm^2) of common ice plant with days after transplanting (A), accumulative temperature (B) and accumulative radiation (C), respectively. DAT, AT and AR indicate days after transplanting, accumulative temperature and accumulative radiation, respectively. Vertical bars indicate SE of the means of ten replications.

적당 지상부 건물중도 같은 형태를 보였다(Figs. 4B and 4C). 지상부 건물중으로 계산한 common ice plant의 잎이 포개지는 시점은 20일, 470°C 또는 38MJ·m⁻²이었다. 이상의 결과

로, 완전제어형 식물공장에서 common ice plant의 잎이 포개지는 시점은 18-21일, 426-484°C 또는 34-39MJ·m⁻²이었다. 이러한 자료는 재식거리를 넓히는 시점을 유추하는 자

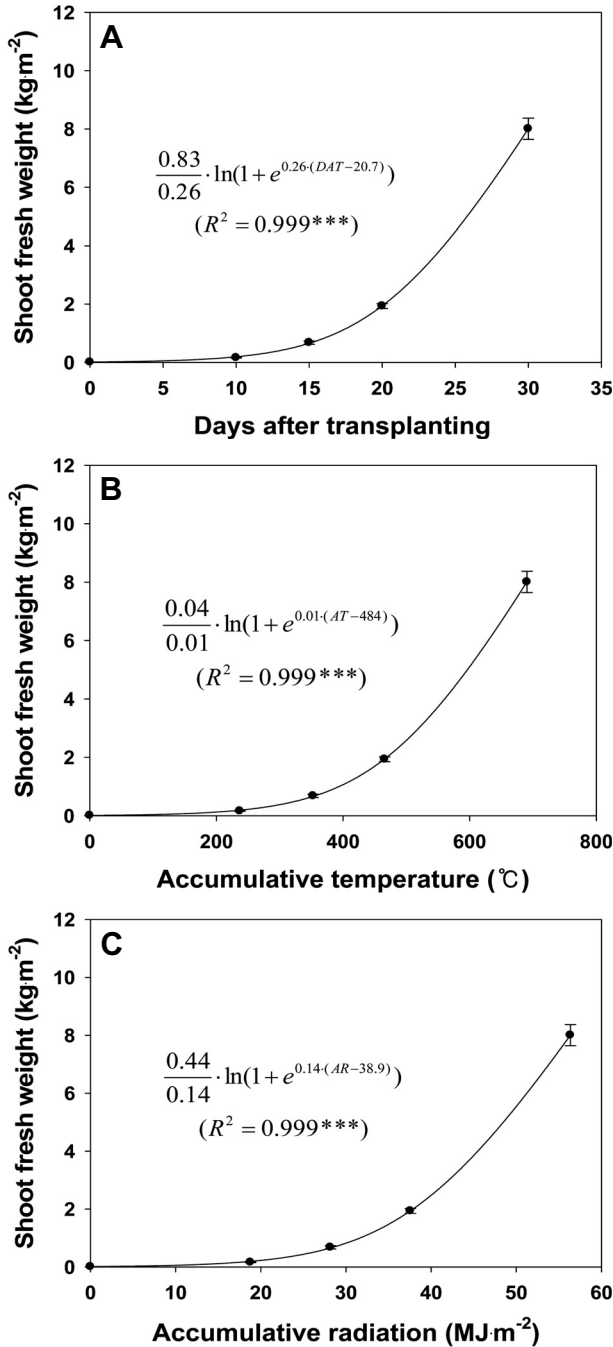


Fig. 3. Shoot fresh weights ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) of common ice plant with days after transplanting (A), accumulative temperature (B) and accumulative radiation (C), respectively. DAT, AT and AR indicate days after transplanting, accumulative temperature and accumulative radiation, respectively. Vertical bars indicate SE of the means of ten replications.

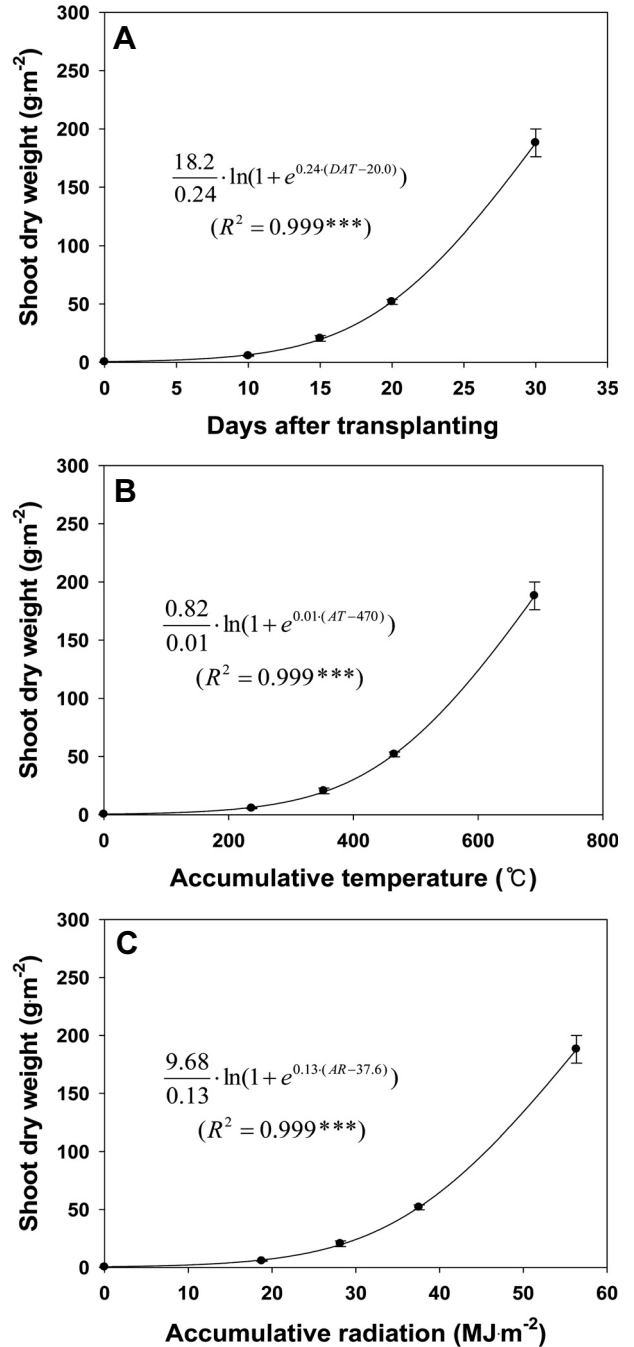


Fig. 4. Shoot dry weights ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) of common ice plant with days after transplanting (A), accumulative temperature (B) and accumulative radiation (C), respectively. DAT, AT and AR indicate days after transplanting, accumulative temperature and accumulative radiation, respectively. Vertical bars indicate SE of the means of ten replications.

료로 활용할 수 있을 것이다.

Common ice plant의 상대생장율은 $0.24\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 이었다(Fig. 4A). Bloom and Troughton(1979)는 최대 상대생장율은 $0.17\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 이라 보고하였는데, 그 값보다 높은 값을 보였다. 이러한 현상은 생육조건이 좋은 식물공장에서 생육하였기 때문이라 생각한다. Šesták et al.(1971)이 제안한 CO_2 전환 계수(1.54g CO_2 fixed/g saccharide formed)을 이용하여 계산한 common ice plant의 탄소 고정율은 $0.84\text{nMole CO}_2\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었다. 이러한 탄소 고정율은 인공광을 이용하는 식물공장에서 적정 광도를 유지하는데 유용한 자료로 활용될 수 있다.

$$(0.24\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{day}^{-1})\cdot(1\text{g DW})\cdot(4.0\cdot 10^{-3}\text{g DW}/\text{cm}^2)\cdot(1.54)\cdot(2.27\cdot 10^7\text{nMole CO}_2/\text{g})\cdot(1/4\cdot 10^4\text{ s}^{-1}) = 0.84\text{nMole CO}_2\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$$

개체당 지상부 생체중과 개체당 지상부 건물중간의 관계는 직선적인 관계를 보였다(Fig. 5). Common ice plant의 지상부 건물중 비율이 2% 정도로 지상부 생체중의 대부분은 수분이 차지하고 있었다. 따라서, common ice plant는 다육 식물임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 개체당 지상부 생체중과 개체당 지상부 건물중을 선형 함수식으로 예측할 수 있었다($Y = 0.024\cdot X$, $R^2 = 0.992^{***}$). 건물중은 작물의 생산성과 환경과의 관계를 표현하는데 있어 중요한 요인(Both et al., 1997)이지만, common ice plant의 지상부 건물중 비율이 낮기 때문에 경제적인 측면에서 환경관리보다는 수분 관리가 더 중요시된다는 것을 알았다.

정식 후 30일째 common ice plant의 광사용효율(light use efficiency)은 $3.3\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ 이었다(Fig. 6). 상추 $2.43\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ (Tei

et al., 1996a)과 반결구상추 $2.71\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ (Beccafichi et al., 2003)보다 높은 수치였다. 그 이유로는 식물공장에서 온도, 상대습도 및 이산화탄소 농도가 다른 시설재배보다 common ice plant 생육에 적합한 조건이었기 때문이다. 정식 후부터 잎이 포개지기 전까지 광사용효율이 낮은 원인으로는 잎이 없는 베드 표면이 많았기 때문이다. 즉, 잎이 자라면서 잎이 없는 베드 표면이 감소함에 따라 식물체가 이용하는 광이 많아졌기 때문이다.

일반적으로 식물의 생장은 시그모이드(sigmoid) 형태를 보인다. 그렇기 때문에 어느 정도의 일수 이상, 적산온도 이상 또는 적산일사량 이상에서는 식물의 생육이 더디게 된다. 그러나, 완전제어형 식물공장에서는 광원과 식물체 간의 높이가 높지 않아 수확시기를 빨리 해야 하기 때문에 시그모이드 형태보다는 선형지수 형태로 생육하게 된다. 따라서, 선형 지수 함수식을 이용하여 정식 후 일수, 적산온도 및 적산일사량(x값)을 가지고 식물의 생육(y값)을 예측할 수 있다. 세가지 x값 중 정식 후 일수가 가장 경제적인 것으로 생각한다. 따라서, 완전제어형 식물공장에서 common ice plant의 생육을 선형 지수 함수식을 이용하여 정식 후 일수로 수량을 예측할 수 있다.

예를 들면, 완전제어형 식물공장에서 본 연구와 동일한 환경조건 하에서, $15 \times 15\text{cm}$ 의 재식거리로 common ice plant를 정식 후 30일 간 재배할 경우, 단위면적당 엽면적은 $1,038\text{cm}^2$, 엽면적지수는 4.6, 광사용효율은 $3.3\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$, 단위면적당 지상부 건물중은 $188\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 과 단위면적당 수량은 $8.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 으로 예측할 수 있다. 만약 하루 1,000주를 생산할 경우, 정식부터 수확까지 30일 동안 식재주수는 30,000주(30일

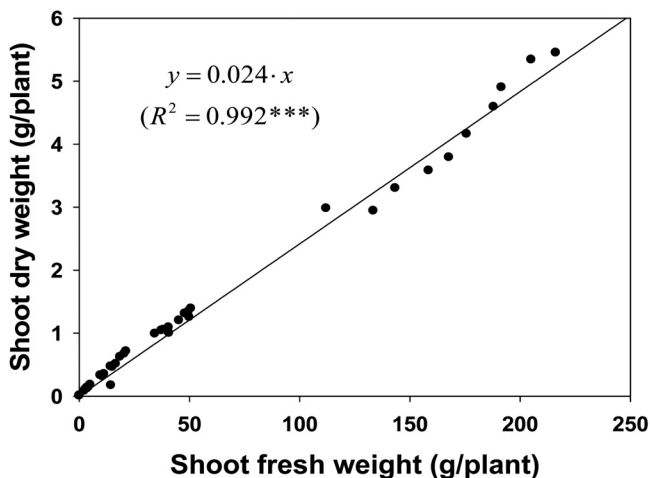


Fig. 5. Relationship between shoot fresh and dry weights of common ice plant (n = 50).

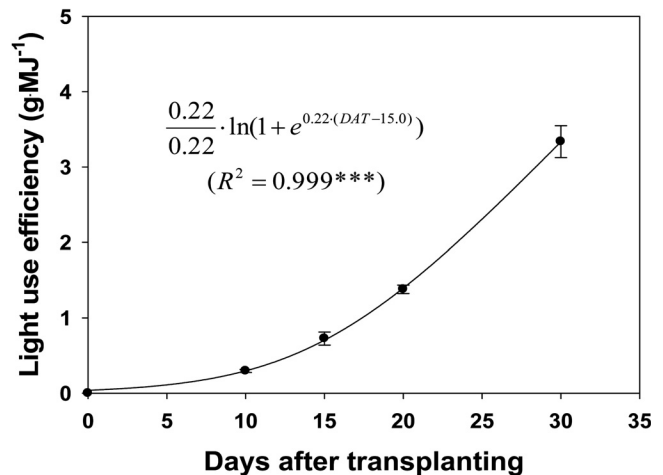


Fig. 6. Light use efficiency ($\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$) of common ice plant with days after transplanting. Vertical bars indicate SE of the means of ten replications.

인용문헌

× 1,000주)가 된다. 재식면적을 $0.0225\text{m}^2(15 \times 15\text{cm})$ 으로 하면, $675\text{m}^2(30,000\text{주} \times 0.0225\text{m}^2)$ 의 재배면적이 필요하다. 다단재배, 예를 들어 5단 재배를 도입할 경우 1단당 재배면적은 135m^2 가 된다. 상품화율 80%, 연간 300일 생산, 판매 가격 주당 10,000원으로 할 경우, 연간 240 백만원(1,000주 × 300일 × 0.8 × 10,000원)의 소득이 예상된다.

본 연구는 완전제어형 식물공장에서 재배 관리 체계와 계획적인 연중 생산 체계를 구축하는데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 대부분의 식물을 재배할 경우, 환경요인(광, 온도, 이산화탄소 농도 등)에 따라 식물의 생육 차이가 발생한다. 따라서, 식물의 최적 환경요인을 맞추어 재배하는 것이 가장 이상적인 환경관리와 최대 수량을 확보할 수 있지만, 모든 최적의 환경 조건을 설정하는 데에는 시간과 경비가 많이 소요된다. 생육과 수량 예측 모델을 더 정확하고 정밀하게 만들기 위해서는 개별적인 적정 환경 요인에 대한 연구와 복합환경요인에 대한 연구가 필요하리라 생각한다.

결론적으로, 선형 지수 함수는 common ice plant의 생육과 수량을 예측하는데 유용한 함수였으며, 이러한 함수식을 가지고 정식 후 일수와 적산온도 및 적산일사량으로 common ice plant의 생육과 수량을 예측할 수 있었다.

초 록

본 연구는 완전제어형 식물공장에서 선형 지수 함수를 이용하여 common ice plant의 생육과 수량 모델을 개발하고자 수행되었다. 식물공장 유형은 완전제어형 식물공장형태로 인공광원은 삼파장 형광등을 사용하였으며, 광주기는 12시간 일장주기였다. 광도는 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하였다. 수경재배시스템은 3단으로 구성된 박막수경(NFT)시스템이었다. 식물공장내 온도, 상대습도와 이산화탄소 농도는 ON/OFF 제어하였다. 선형 지수 함수를 사용한 common ice plant의 정식 후 일수, 적산온도 및 적산일사량에 따른 엽면적, 단위면적당 지상부 생체중과 건물중 및 광사용효율은 선형 지수적인 형태들을 보였다. 개체당 지상부 생체중과 개체당 지상부 건물중간의 관계는 직선적인 관계를 보였으며, 정식 후 30일째 common ice plant의 광사용효율(light use efficiency)은 $3.3\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ 이었다. 결론적으로, 선형 지수 함수는 완전제어형 식물공장에서 common ice plant의 생육과 수량을 정량적으로 예측하는데 유용한 함수로 사용될 수 있었다.

추가 주요어 : 수경재배, 광사용효율, 모델링, 단위면적당 지상부 건물중, 단위면적당 지상부 생체중

- Agarie, S., A. Kawaguchi, A. Kodera, H. Sunagawa, H. Kojima, A. Nose, and T. Nakahara. 2009. Potential of the common ice plant, *Mesembryanthemum crystallinum* as a new high-functional food as evaluated by polyol accumulation. *Plant Prod. Sci.* 12:37-46.
- 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.
- Bloom, A.J. and J.H. Troughton. 1979. High productivity and photosynthetic flexibility in a CAM plant. *Oecologia* 38:35-43.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.)
- 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.
- SAS Institute. 1985. SAS user's guide: Statistics. 5th ed. SAS Inst., Cary, NC, USA.
- Šesták, Z., J. Čatský, and P.G. Jarvis. 1971. Plant photosynthetic production: Manual of methods. The Hague, Junk.
- Tei, F., A. Scaife, and D.P. Aikman. 1996a. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Ann. Bot.* 78:633-643.
- Tei, F., D.P. Aikman, and A. Scaife. 1996b. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth modeling. *Ann. Bot.* 78:645-652.