

간척지 광환경 특성 분석 및 3-D 모델을 통한 온실 내 공간적 광분포 예측

이준우^{1†} · 신종화^{1†} · 김지훈¹ · 박현우¹ · 유인호² · 손정익^{1*}

¹서울대학교 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

²국립원예특작과학원 시설원예시험장

Analysis of Light Environments in Reclaimed Land and Estimation of Spatial Light Distributions in Greenhouse by 3-D Model

June Woo Lee^{1†}, Jong Hwa Shin^{1†}, Jee Hoon Kim¹, Hyun Woo Park¹, In Ho Yu², and Jung Eek Son^{1*}

¹Department of Plant Science and Research Institute of Agriculture and Life Science,
Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

²Protected Horticulture Research Station, National Institute of Horticultural and Herbal Science,
Haman, 637-812, Korea

Abstract. Reclaimed lands, expected as high-tech export horticultural complex, have unusual light environments due to sea fog. For adequate greenhouse design at reclaimed land, spatial light distributions in greenhouse should be required considering diffusive and direct lights. The objectives of this study were to analyze light environments and estimate spatial light distributions in greenhouse at reclaimed land by 3D greenhouse models. Total and diffusive lights were compared between reclaimed land and inland. For verification of the 3D greenhouse models, spatial light distributions and measured light intensities in greenhouse were compared with the estimated ones. Light environments at reclaimed land showed a higher diffusive irradiation than at inland, especially near sunrise and sunset. The estimated spatial light distributions in greenhouse showed good agreements with the measured ones. By using this method, we could estimate the average light intensity with time and spatial light distributions in greenhouse at specific outside light conditions. This result will be useful for analysis of light environments but also estimation of crop light inception in greenhouse at reclaimed land.

Additional key words: diffusive light, greenhouse structure, model verification, sea fog, simulation

서 론

최근 대규모 작물 생산지로서 간척지에서의 시설원예 단지 조성에 대한 필요성이 대두되고 있다(Lee 등, 2014). 기존의 간척지 온실 단지 조성을 위해서 지반층의 구성과 내구성(Shang 등, 1998; Hoffman 등, 1983) 및 간척지 지역의 생태적 식생(Baker 등, 2006) 위주로 연구가 진행되어 왔다. 그러나 간척지 지역은 지질적, 생태적 특성 이외에 높은 대기 중 수증기로 인하여 해무가 빈번하게 발생하는 등 내륙과 상이한 광환경 특성을 가지고 있다(Gao 등, 2007). 해무가 발생하면 전체 일사량이 감소하고 산란광의 비율이 증가하여 광환경에

크게 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Maruyama 등, 2004). 최근 국내 간척지 지역의 기상환경에 대한 특성에 관한 연구가 수행되었으나(Lee 등, 2014), 평균 일사량 및 일조 시간 등이 측정되어 산란광의 비율이 높은 간척지 특유의 광환경의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서 간척지 지역의 산란광과 전체 일사량을 측정하여 간척지 광환경 특성을 분석할 필요가 있다.

또한 이러한 광환경 조건에서 온실 내의 광분포를 분석하여 최종적인 온실 재배 작물의 수광 및 온실 내 에너지 균형을 예측하는 것이 필요하다(Gupta 등, 2012). 그러나 다양한 외부 조건에 대하여 온실 내 공간적인 광 분포를 측정하는 것은 많은 양의 노동력과 시간을 요구한다(Buck-Sorlin 등, 2009). 특히, 간척지의 환경 특성에 대한 충분한 연구가 진행되지 않았기 때문에 온실 형태 및 구조에 따른 체계적인 내부 광분포 해석이 필요하다. 이러한 목적으로 온실 내 광분포 측정에 대한 문제점을 해결하고자 많이 도입되고 있는 것이 3-D 온

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr

†These authors equally contributed to this work.

Received October 22, 2014; Revised November 4, 2014;

Accepted November 5, 2014

실 모델과 ray-tracing 기법을 이용한 광학적 시뮬레이션이다(Vos 등, 2007; 2009). 이러한 방법으로 온실 내 작물 캐노피 수광량, 태양 고도 및 운량에 따른 온실 내 광 분포, 보광 위치에 따른 광 분포 등에 대한 연구가 시도되고 있다(Cieslak 등, 2008; Sarlikioti 등, 2011; de Visser 등, 2014). 그러나 3-D 모델을 이용한 광학적 시뮬레이션 연구는 개별적인 모델을 사용하기 때문에 방법론이 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 3-D 모델을 이용한 시뮬레이션 이전에 실측 데이터를 기반으로 모델을 검증하는 방법 개발이 선행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 간척지의 고유의 광환경 특성을 분석하고 3-D 온실 모델에 적용하여 간척지의 온실 내 공간적인 광분포를 추정하고자 하였다 이를 위하여 간척지에 재배 실험을 위해 설치한 실제 온실을 3-D 모델링하고, 실제 온실에서 실측된 간척지 광환경 조건을 적용시켜 간척지 지역의 온실 내부 광의 분포를 예측하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 간척지 광환경 특성 분석

간척지 광환경 특성 분석을 위한 대상지로 전라북도 부안군 계화도 간척지 내 농촌진흥청 벼맥류부 출장소(N 35.7792, E 126.6792)를 선정하였다. 2014년 10월 6일부터 8일에 대하여 해당 지역의 일중 일사량을 산란 일사계(BF-5 sun reader, Delta-T, UK)를 이용하여 전체 일사량과 산란일사량으로 구분하여 측정하였다. 간척지

지역의 광환경 특성을 비교하기 위하여 인근의 군산 기상대(N 36.0052, E 126.7617)에서 동일기간 전체 일사량과 산란 일사량을 측정하였다.

2. 간척지 지역 온실 내 광환경 분석

3-D 온실 모델의 광분포 검증을 위하여 계화도 간척지에 설치된 작물 재배실험용 온실 내부의 광분포를 휴대용 광도 측정기(Li-250A, Li-Cor, USA)를 이용하여 2014년 10월 7일 09:00, 12:00, 15:00에 총 18 지점에서 측정하였다. 측정된 온실의 형태 및 측정된 위치는 Fig. 1의 A 및 C와 같다.

3. 3-D 온실 모델링

측정된 온실의 구조와 형태를 CAD 프로그램(Solidworks, Dassault Systemes, France)을 이용하여 Fig. 1의 B, C와 같이 3-D 모델을 작성하였다. 3-D 온실 모델에 ray-tracing 기법을 이용한 광학 시뮬레이션 프로그램(Optisworks, Optis, France)을 이용하여 피복재에 PE의 광학적인 특성(투과율 88.2%, 흡수율 1.8%)을 설정하였다. 골조의 경우 금속의 일반적인 광학적 특성(Optical polished material)을 설정하였다.

4. 간척지 온실 내 광환경 시뮬레이션

간척지 지역에서 실측된 광환경과 3-D 온실 모델의 온실 바닥면의 광도의 분포를 Ray-tracing 기법을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 조건은 실제

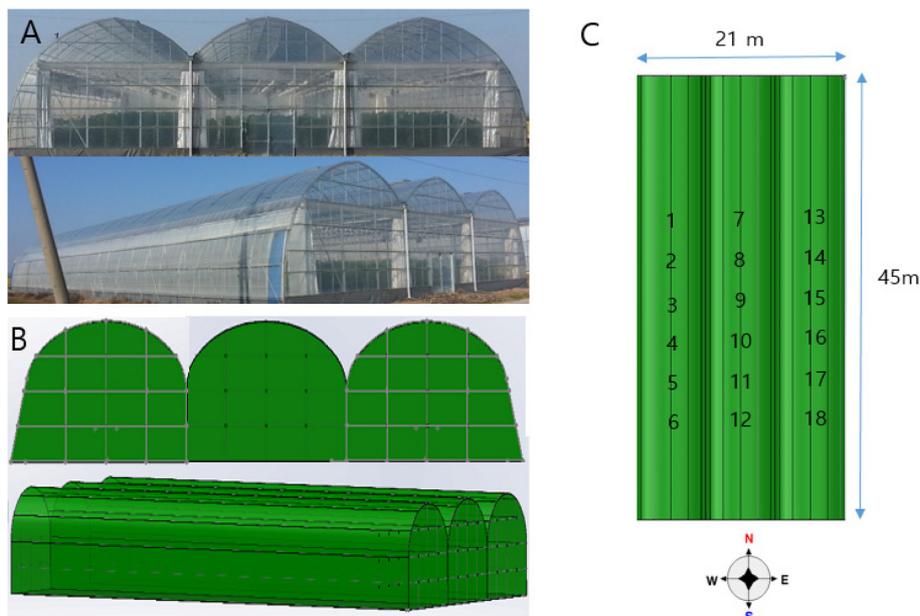


Fig. 1. Actual views of an arch type greenhouse in Gyehwado (A), 3-D models of the arch type greenhouse (B), and measured points (1-18) of light intensity in the greenhouse.

측정된 온실의 방향과 측정 시간에 대한 태양의 위치를 반영하였으며, 산란광의 비율은 대기 혼탁도(turbidity 1.9-10)를 이용하여 나타내었다. 시뮬레이션에서는 10°개의 광선을 사용하였으며 온실 바닥면을 가로, 세로 각각 5mm 간격으로 나누어서 각 지점에 조사되는 광량을 계산하였다. 또한 실측치와 시뮬레이션에 의한 계산치를 비교함으로써 3-D 온실 모델에 대한 검증은 실시하였다. 검증된 모델을 사용하여 2014년 10월 7일 실측된 간척지와 내륙의 광환경 조건을 적용하여 온실 내 평균 광도 일중 변화와 광 분포를 제시하였다.

5. 통계 처리

시뮬레이션을 통해 계산된 결과와 실측된 데이터는 SPSS (IBM, USA)를 이용하여 통계 처리하였다.

결과 및 고찰

1. 간척지 광환경 특성 분석

간척지 및 내륙의 일중 시간에 따른 전체 광도와 산란광의 광도는 Fig. 2의 A와 같다.

측정일(2014년 10월 7일)의 일출시간은 06:32, 일몰은 18:09이었으며 12:00 인근에서 가장 높은 광도를 나타냈다. 전반적으로 간척지에 비하여 내륙의 전체 광도가 더 높은 것으로 나타났으나, 산란광은 간척지가 내륙에 비해 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 사실은 시간에 따른 산란광 비율을 나타낸 Fig. 2의 B를 통하여 보다 명확하게 확인할 수 있다. 이러한 결과의 원인으로서는 간척지가 내륙에 비해 태양광을 산란시키는 구름의 양, 대기 중 에어로졸의 농도 등이 높았을 가능성이 있으며(Jee 등, 2013), 이러한 성분들에 의해 태양광이 산란되어 전체 광도는 감소하였지만 산란광량은 더 증가되었다고 판단된다. 실제로 높은 산란광의 비율은 작물 균락 수광 효과가 우수하여 균락 전체 광합성 효율을 증진시키고

최종적으로 작물의 생산량이 증가된다(Cavazzoni 등, 2002; Elings 등, 2012; Jongschaap 등, 2006). 따라서 간척지에서 전체 광량이 약간 감소하더라도 높은 산란광 비율로 인하여 작물 생산이 증진될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 일중 전체 광도에 대한 산란광 비율은 일출 또는 일몰 인근에서 높은 것을 확인 할 수 있는데 (Fig. 2-B), 이는 대기 중 높은 수증기량을 갖고 있는 해안가 인근에서 온도의 변화가 극심하게 일어나는 일출 또는 일몰 시 대기 중 수증기가 급격하게 응결된다는

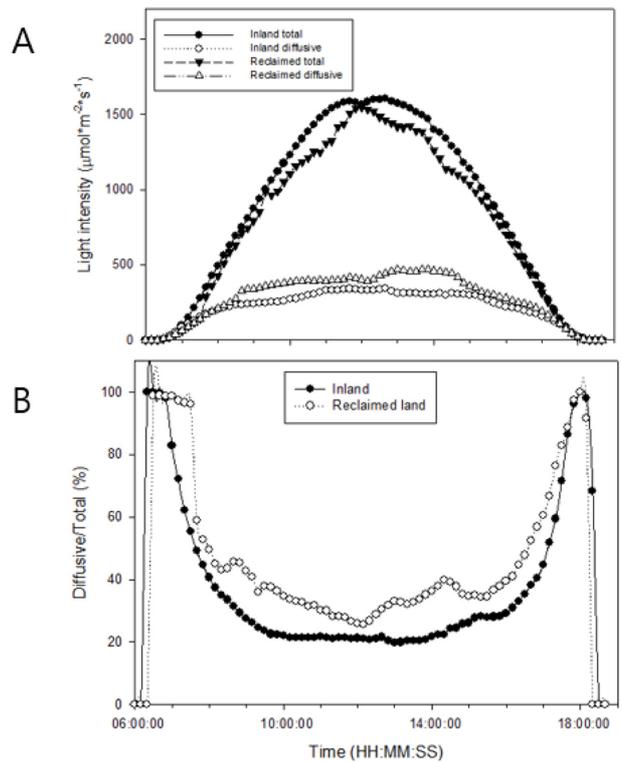


Fig. 2. Changes in total and diffusive sun light intensities (A) and ratio of diffusive to total ones (B) with time on 7 Oct. in Gungsan weather station (inland) and Gyehwado (reclaimed land).

Table 1. Spatial light distributions in greenhouse at each measured point (see Fig. 1).

Light intensity (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Measured point (1-9)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
09:00	208.8	200.1	177.1	188.2	204.2	199.4	194.9	219.4	219.4
12:00	498.0	401.5	417.2	436.5	473.9	430.7	496.0	509.0	531.2
15:00	412.6	394.2	497.2	403.9	441.6	476.2	353.7	385.1	385.7
Light intensity (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Measured point (10-18)								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
09:00	223.8	216.5	201.9	316.9	256.4	258.7	263.9	336.0	342.6
12:00	544.5	501.5	440.0	492.0	504.7	518.3	536.4	553.4	526.6
15:00	391.4	281.9	356.6	262.8	271.8	258.0	260.5	265.9	272.6

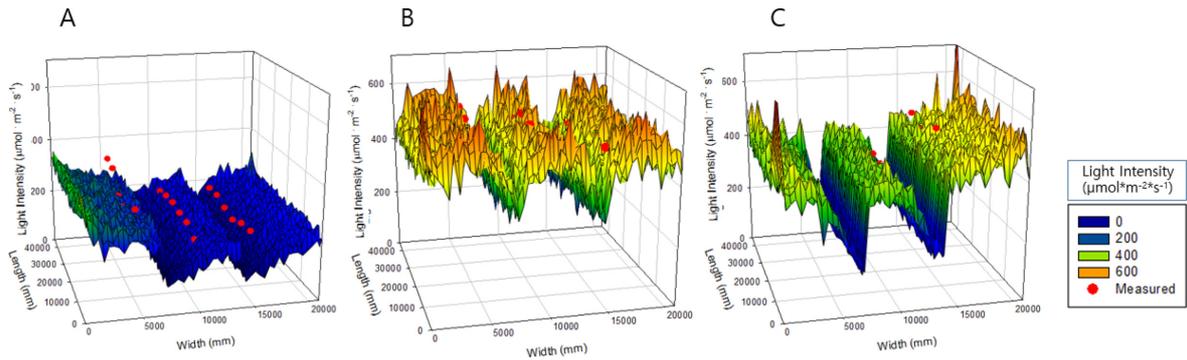


Fig. 3. Spatial light distributions in greenhouse at 09:00 (A), 12:00 (B), and 15:00 (C): measured (red dotted) and simulated with 3D greenhouse model (meshed graph).

기상학적인 특성에 의한 것으로 추정된다(Gao 등, 2007). 따라서 이러한 간척지 지역에서 설치된 온실에서는 일출 또는 일몰 시, 온실 피복재 표면의 응결, 광환경 변화 및 기타 환경 조건을 변화시키는 요인에 대한 대책이 필요하다.

2. 간척지 온실 내 광환경 실측 및 시뮬레이션 분석

온실 내의 총 18개의 지점에서 09:00, 12:00, 15:00에 측정된 광도는 Table 1과 같다.

실측된 각 온실 내 측정 지점과 시뮬레이션을 통해 계산한 광도를 온실의 가로와 세로를 각각 5mm 간격으로 세분화한 x-y 좌표 상에 z축으로 나타낸 것이 Fig. 3이다.

X 및 y축은 동서 및 남북 방향이며, x 및 y값이 증가할수록 각각 서쪽 및 남쪽을 의미한다. 실측과 시뮬레이션 결과 모두 09:00에서 온실 내 동쪽 부분에서 높은 광도를 나타내었으며, 12:00에서는 전반적으로 균일한 가운데 남쪽 부분에서 광도가 높았고, 15:00에서는 온실

내 남서쪽 부분에서 높았다. 전체 광량 역시 12:00에서 가장 높은 값을 나타내었다. 이는 일중 태양고도에 따른 온실 내 광 분포의 변화가 반영되었음을 의미한다.

실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치는 Fig. 4와 같이 높은 상관관계를 나타내었다. 이를 통하여 이번 연구에서 적용한 3-D 온실 모델 방법론이 실제 상황을 매우 유사하게 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 실험적으로 규명하기 어려운 간척지 지역 온실의 광분포에 대하여 본 연구에서 제시한 3-D 온실 모델 방법론이 유용한 수단으로써 적용할 수 있을 것으로 보여진다.

3. 온실 내 평균광도 및 광분포 추정

동일한 형태의 온실에 대하여 간척지와 내륙의 광환경 특성을 반영하여 2014년 10월 7일 일중 시간에 따른 온실 내 평균 광도를 추정된 결과는 Fig. 5와 같다. 대부분의 시간대에서 간척지 온실 내 평균 광도에 비해 내륙의 온실 내의 평균 광도가 더 높게 나타났다. 이는 Fig. 2의 A에서 일중 모든 시간대에서 내륙의 광도가 간척지에 비

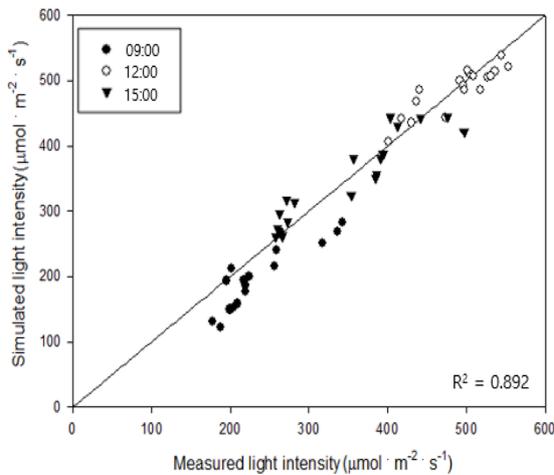


Fig. 4. Comparison of measured and estimated light intensities in greenhouse. Closed, open circles and triangle mean measured points at 09:00, 12:00, and 15:00, respectively.

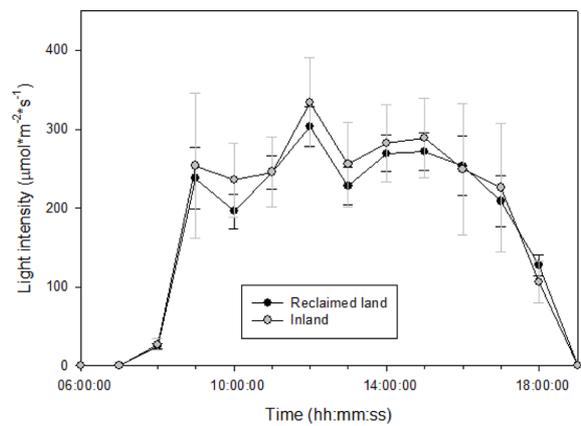


Fig. 5. Change in average values of light intensity in greenhouse at reclaimed land and inland. Vertical bars indicate SD (n = 94500).

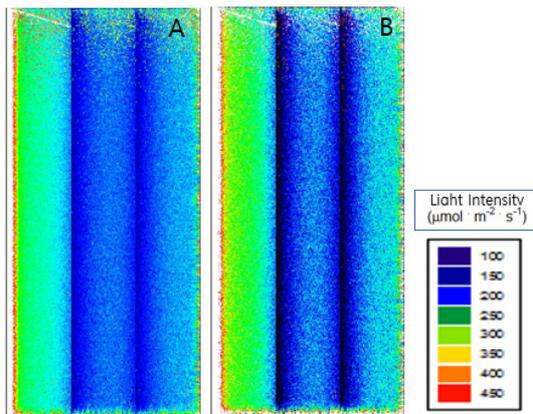


Fig. 6. Spatial light distributions in greenhouse at 17:00 at reclaimed land and inland.

해 높았던 것에 기인한 것으로 추정된다. 하지만 온실 내 광도의 표준 편차의 경우 모든 시간에서 간척지에 비해 내륙에서 높게 나타났다. 17:00의 실측한 간척지와 내륙 지역의 전체 광도는 각각 313, 356.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었으며 시뮬레이션을 통한 온실 내부의 평균 광도는 간척지 지역 온실 내에서는 208.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 내륙 지역 온실 내에서는 225.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 추정되었다. 이러한 온실 내 평균 광도만으로는 태양의 전체 광도가 높은 내륙의 온실에서 더 높았지만, Fig. 6과 같이 간척지 지역의 온실 내 광분포가 내륙의 온실 내 광분포에 비해 균일하게 나타났다. 서쪽 지역의 광도는 내륙 온실 내에서 보다 높게 나타났으나 온실의 끝 부근은 내륙 온실 내에서 보다 낮게 나타났다.

내륙의 온실 내부 광도의 분포가 간척지에 비해 균일하지 않았으며 이는 골조 및 온실 내 부대 시설에 의해 광이 차단되어 그림자가 면적이 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 균일한 광분포가 작물 생산에 있어서 중요한 요인이라는 선행 연구 결과 (Kahlen과 Stütze, 2011)를 고려할 때, 온실 내 평균 광도가 낮은 간척지 지역이 산란광의 비율이 높기 때문에 광이 온실 내부에 균일하게 분포하게 되어 오히려 작물 생산에 보다 유리할 수 있는 가능성이 제시된다. 이러한 연구는 추후 온실 내 작물의 균량 수광량 분석을 통하여 진행되어야 할 것으로 판단된다.

적 요

수출용 온실 단지로 기대되는 간척지의 광환경은 해무 등에 의해 내륙과는 다른 광환경 특성을 나타낸다. 이러한 간척지에서 온실 설계 기준을 작성하기 위해서 산란광과 직달광을 고려한 온실 내 광분포 연구가 필요하다. 본 연구에서는 간척지의 고유의 광환경 특성을 분석하고

3-D 온실 모델에 적용하여 간척지의 온실 내 공간적인 광분포를 추정하고자 하였다. 먼저 간척지의 일사량을 산란광과 직달광으로 구분하여 측정하고 내륙의 일사량과 비교하였다. 또한 간척지 지역에 설치된 온실 내의 광분포를 측정하고 이를 시뮬레이션을 통해 계산된 값과 비교함으로써 3-D 온실 모델에 대한 검증은 실시하였다. 간척지는 내륙에 비하여 전체 일사량에 대비 높은 산란광의 비율을 나타내었으며, 특히 일출 및 일몰 부근에서 크게 나타났다. 3-D 온실 모델에 의한 온실 내 예측 광분포는 실제 간척지의 온실 내 광분포와 유사하게 나타났다. 검증된 3-D 온실 모델을 통하여 임의의 외부 광조건에 대하여 간척지 지역의 온실 내부의 시간적인 평균 광도의 변화와 광분포를 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 간척지 지역의 온실 내 광환경 해석 이외에도 작물의 수광량 해석에도 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

추가 주제어 : 온실 모델, 모델 검증, 산란광, 시뮬레이션, 온실 구조, 해무

사 사

본 연구는 농촌진흥청의 간척지 적응 온실 환경설계기준 연구 과제 (PJ009412)의 일환으로 수행되었음.

Literature Cited

- Baker, G.H., G. Brown, K. Butt, J.P. Curry, and Scullion, J. 2006. Introduced earthworms in agricultural and reclaimed land: their ecology and influences on soil properties, plant production and other soil biota. *Biological Invasions* 8: 1301-1316.
- Buck-Sorlin, G.H., R. Hemmerling, J. Vos, and P.H. de Visser. 2009. Modelling of spatial light distribution in the greenhouse: description of the model. In *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on* (pp. 79-86). IEEE.
- Cavazzoni, J., T. Volk, F. Tubiello, and O. Monje 2006. Modelling the effect of diffuse light on canopy photosynthesis in controlled environments. *Acta Horticulturae* 593:39-45.
- Cieslak, M., C. Lemieux, J. Hanan, and P. Prusinkiewicz. 2008. Quasi-Monte Carlo simulation of the light environment of plants. *Functional Plant Biology* 35:837-849.
- de Visser, P.H., G. van der Heijden, and G. Buck-sorlin. 2014. Optimizing illumination in the greenhouse using a 3D model of tomato and a ray tracer. *Frontiers in Plant Science* 5:48.
- Elings, A., T. Dueck, E. Meinen, and F. Kempkes. 2012. Analysis of the effects of diffuse light on photosynthesis and crop production. *Acta Horticulturae* 957:45-52.

- Gao, S., H. Lin, B. Shen, G. and Fu. 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: Analysis and numerical modeling. *Advances in Atmospheric Sciences* 24:65-81.
- Gupta, R., G.N. Tiwari, A. Kumar, and Y. Gupta. 2012. Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD. *Energy and Buildings* 47:27-34.
- Hoffman, L., R.E. Ries, and J.E. Gilley. 1983. Relationship of runoff and soil loss to ground cover of native and reclaimed grazing land. *Agronomy Journal* 75:599-602.
- Jongschaap, R.E.E., T.A. Dueck, N. Marissen, S. Hemming, and L.F.M. Marcelis. 2006. Simulating seasonal patterns of increased greenhouse crop production by conversion of direct radiation into diffuse radiation. *Acta Horticulturae* 718:315-322.
- Kahlen, K. and H. Stützel. 2011. Simplification of a light-based model for estimating final internode length in greenhouse cucumber canopies. *Annals of Botany* 108:1055-1063.
- Lamnatou, C. and D. Chemisana. 2013. Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR-and UV-blocking materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18:271-287.
- Lee, S.Y., D.H. Kang, J.G. Kim, Y.J. Kim, H.G. Choi, and J.W. Lee. 2014. Analysis of environmental characteristics for the greenhouse complex on reclaimed land. *Agricultural Mechanization in Korea*. 19:262-263 (in Korean).
- Maruyama, S., Y. Mori, and S. Sakai. 2004. Nongray radiative heat transfer analysis in the anisotropic scattering fog layer subjected to solar irradiation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 83:361-375.
- Ohde, T. and H. Siegel. 2013. Spectral effects of Saharan dust on photosynthetically available radiation in comparison to the influence of clouds. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 102:269-280.
- Pinho, P., T. Hytönen, M. Rantanen, P. Elomaa, and L. Halonen. 2013. Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment. *Lighting Research and Technology* 45:295-304.
- Sarlikioti, V., P.H.B. De Visser, and L.F.M. Marcelis. 2011. Exploring the spatial distribution of light interception and photosynthesis of canopies by means of a functional-structural plant model. *Annals of Botany* 107:875-883.
- Shang, J.Q., M. Tang, and Z. Miao. 1998. Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study. *Canadian Geotechnical Journal* 35:740-749.
- Vos, J., J.B. Evers, G.H. Buck-Sorlin, B. Andrieu, M. Chelle, and P.H.B. De Visser. 2009. Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. *Journal of Experimental Botany* 345:2101-2115.
- Vos, J., L.F.M. Marcelis, and J.B. Evers. 2007. Functional-structural plant modelling in crop production: adding a dimension. *Frontis* 22:1-12.