

유리온실내의 직달일사 및 산란일사 해석을 위한 시뮬레이션 모형¹⁾

— 동방위가 단동 온실내의 직달일사 투과율에 미치는 영향 —

김용현 · 이석건*

전북대학교 농과대학 농업기계공학과

*경북대학교 농과대학 농공학과

A Simulation Model for the Analysis of Direct and Diffuse Solar Radiation in Glasshouse

— Effect of orientation on the transmissivity of direct solar radiation
in single-span glasshouse —

Kim, Yong-Hyeon · Lee, Suk-Gun*

Dept. of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture,
Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea

*Dept. of Agricultural Engineering, College of Agriculture,
Kyungpook National University, Taegu, 702-701, Korea

Abstract

A simulation model for the analysis of the transmissivity of direct and diffuse solar radiation in glasshouse was developed. This model would be applicable to investigate the influences of time of year, orientation and slope of glasshouse, dimensions of the frames used, and latitude of the site on the transmissivity of direct and diffuse solar radiation in single-span or multispan glasshouse. The transmissivity of diffuse solar radiation was 60.4% for the single-span glasshouse. It was independent of both orientation and time of year. During the winter season, the transmissivity of direct solar radiation was 67~69% for the E-W orientation single-span glasshouse, which was 14~16% higher than that for the S-N orientation. Oppositely the transmissivity of direct solar radiation for the S-N orientation was higher than that for the E-W orientation during the autumn season. There was no influence of the latitude in the country on the transmissivity of direct solar radiation.

주 제 어 : 직달 및 산란일사 투과율, 시뮬레이션 모형, 유리온실, 동방위

Key words : transmissivity of direct and diffuse solar radiation, simulation model, glasshouse, orientation

¹⁾ 본 연구는 1995년도 농림부 농림수산기술관리센터의 현장애로기술개발과제로 수행되었음.

서 언

온실이란 식물 생육에 요구되는 태양광을 유용하게 활용하기 위하여 유리 또는 폴리에틸렌 필름과 같이 투명한 피복재가 사용된 구조물을 일컫는다. 겨울철에 온실내로 투과되는 일사량은 식물의 정상적인 생육에 제약이 되는 환경요소로서, 온실 설계에서 고려되어야 할 주요 인자에 해당된다. 그러므로 온실내의 광환경을 개선하기 위한 노력은 온실설계의 핵심 부분에 해당된다. 온실내로 투과되는 일사량은 온실이 설치된 지역의 위도, 온실의 동방위 및 형상, 구조물의 재원, 피복재의 광학적 특성, 년중일수, 기상 조건, 지붕면의 경사각 등에 따라 변화된다.

온실내로 투과된 일사량에 관한 연구는 실제로 온실내에서 일사량을 측정하여 분석하는 방법과 온실내의 일사 투과에 대한 이론적인 모형을 설정한 후 이를 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 분석하는 방법으로 나누어진다. 이제까지 온실내로 투과되는 일사량에 관한 연구 결과(Basiaux et al, 1973; Bowman, 1970; de Zwart, 1993; Harnett, 1975; Manbeck and Aldrich, 1967; Smith and Kingham, 1971)가 많이 제시되고 있으나, 온실 구조물의 배열 또는 크기가 온실내로 투과되는 일사량에 미치는 효과에 관한 연구(Critten, 1984; 古在, 1973; 古在, 1974)는 미약한 수준에 불과하다. 국내에서 온실내의 일사량을 분석하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모형에 관한 연구는朴과 高(1986)에 의해서 이루어진 바 있다. 그들은 플라스틱 온실의 표면을 벽면, 측벽면, 및 지붕면으로 구분하고 각 면을 통하여 온실내로 투과되는 일사량을 분석하였다. 그들에 의해서 개발된 모형은 폴리에틸렌 필름을 피복재로 사용한 플라스틱 온실에만 적용 가능하며, 플라스틱 온실에서 구조물에 의한 직달일사 및 산란일사의 차단 효과가 고려되지 않은 한계를 지니고 있다. 한편, 高 등(1989)은 플라스틱 온실내의 직달일사 및 산란일사를 분석하고자 플라스틱 온실을 원통 모형으로 가정하고 온실 표면에서 직달일사의

입사각에 대한 이론적인 해석을 시도하였다. 이와 같이 국내에서 온실내로 투과된 일사량에 관한 연구 결과는 소수에 불과할 뿐만 아니라 플라스틱 온실을 대상으로 연구가 시도되었기에 유리 온실내의 광환경에 대한 해석이 불가능한 실정이다. 더구나 온실의 동방위 및 지붕경사각, 동고 및 측고, 구조물의 재원, 설치 지역의 위도 등이 유리 온실내의 직달 및 산란일사 투과에 미치는 효과가 체계적으로 분석된 바가 없으므로, 국내에서 온실내의 광환경에 대한 설계 기준조차 정립되어 있지 않다. 본 연구의 기본적인 목적은 유리 온실내로 투과된 직달 및 산란일사의 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모형을 개발하는 데 있으며, 본고에서는 단동 온실의 동방위가 온실내의 산란일사 및 직달일사 투과율에 미치는 영향에 대해서 보고하고자 한다.

재료 및 방법

1. 태양의 위치

임의의 방위를 갖는 직달일사와 수평면 사이의 기하학적 관계는 태양적위(declination), 태양고도(solar altitude), 태양방위각(solar azimuth angle), 시간각(hour angle) 등에 의해서 다음과 같이 표시된다.

$$\delta = 23.45 \sin\{360(284 + n)/365\} \quad (1)$$

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \nu + \sin \delta \sin \phi \quad (2)$$

$$h = 90 - \theta_z \quad (3)$$

$$\sin \alpha = \cos \delta \sin \nu / \cos h \quad (4)$$

식(1)~(4)에서 δ : 태양적위, n : 년중일수, h : 태양고도, ϕ : 위도, ν : 시간각, α : 태양방위각이다.

2. 온실내의 직달 및 산란일사 투과율

지표면에 도달되는 태양광은 직달일사와 산란일사로 구분된다. 온실내로 투과된 직달일사와 산란일사는 모두 온실의 형상과 구조물의 영향을 받게 되나, 이 가운데 직달일사는 온실의 동방위와 천공에서 태양의 위치에 따

른 영향도 받게 된다. 한편, 산란일사의 투과율은 온실의 형태가 결정되면 거의 일정한 값을 갖는다. 온실내에서 직달일사 및 산란일사를 포함한 전체일사의 투과율(TT)은 다음 식에 의해서 계산된다.

$$TT = FRDIF \times TRDIF + (1 - FRDIF) \times T \quad (5)$$

식(5)에서 FRDIF : 실외 전체일사에 대한 산란일사의 비율, TRDIF : 산란일사의 투과율, T : 직달일사 투과율이다.

반구의 형태로 이루어진 천공이 $m \times n$ 의 요소로 구분된다고 가정할 때, (I,J)번째 요소의 중심으로부터 발산된 평행광의 온실 투과율 T(I,J)는 태양고도와 태양방위각의 영향을 받게 된다. 이 경우 직달일사의 일평균 투과율(AD)는 다음과 같이 정의된다.

$$AD = \frac{\sum_{t=\text{sunrise}}^{\text{sunset}} DRP(t) \cdot T(I,J) \cdot \Delta t}{\sum_{t=\text{sunrise}}^{\text{sunset}} DRP(t) \cdot \Delta t} \quad (6)$$

식(6)에서 $I_i = (n \cdot H_i + 90)/90$, $J_i = (m \cdot A_i + 180)/180$ 이다. 이밖에 H_i : 태양고도, A_i : 태양방위각, $DRP(t)$: 임의의 시각 t에서 옥외 직달일사, m, n : 상수, Δt : 시간증분이다. 온실이 단면과 종면에 대해서 대칭을 이룰 때 임의의 태양고도에서 태양방위각 $A_i (0^\circ \leq A_i \leq 90^\circ)$ 에 대한 온실 투과율은 $-A_i$ 에서의 투과율과 동일하다. 등방성으로 가정된 천공에서 임의의 태양고도와 태양방위각에 따른 산란일사의 투과율은 다음 식으로 표시된다. 식(7)에서 대괄호안의 수식은 태양고도의 함수로 표시되는 산란일사 투과율의 보정계수에 해당된다(Kozai et al, 1978).

$$TRDIF = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n T(I,J) [\sin^2(90/l/n) - \sin^2\{90(1-l)/n\}]/m \quad (7)$$

3. 직달 및 산란일사 투과율 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모형

유한한 길이의 고체 구조물로 구성된 온실내의 상면 또는 식물체에 태양광이 도달하기 전에 직달광은 최소한 1회 이상 온실의 지붕면을 통과하며, 통과된 광은 구조재에 의해서 광투과가 차단되기도 한다. 지붕면을 통과할 때마다 유리에 의해서 반사 또는 흡수되는 태양광의 강도는 프레스넬식(Duffie and Beckmann, 1980)에 의해서 계산된다.

규칙적으로 배열되어 있는 온실의 구조물로 인한 투과율의 편향을 배제하려면 특정한 방향으로 입사되는 개개의 직달광이 상면에 임의로 도달하여야 한다. 단동 및 연동 온실에서 직달광에 대한 평균 투과율의 예측에 사용된 시뮬레이션 모형의 순서도가 그림 1에 실려 있다.

그림 2는 본 연구의 시뮬레이션 모형에 사용된 유리온실의 정면도와 측면도를 나타낸

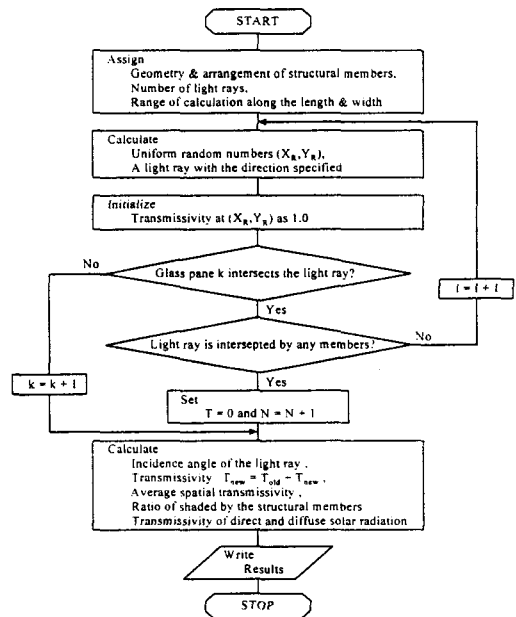


Fig. 1. Flow chart for the calculation of transmissivity of direct and diffuse solar radiation in glasshouse.

것이다. 온실의 크기와 구조물로 사용된 부재의 주요 치수는 표 1과 같다. 시뮬레이션 모형에 사용된 온실의 골조율, 즉 온실의 전체 표면적에 대하여 구조물이 차지하는 면적의 비율은 약 16% 정도로서, 이와 같은 비율은 일반적인 온실의 골조율에 해당된다. 한편 유리의 소멸계수와 굴절율은 각각 0.076cm^{-1} , 1.526의 값이 사용되었다. 온실내로 투과된 직달 및 산란일사의 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모형을 개발하는 과정에서 적용된 가정은 다음과 같다. 유리온실의 길이는 유한하고, 구조재는 불투명 고체이며, 피복재로서 사용된 유리는 직달광과 산란광에 대하여 모두 비확산성을 갖는다. 또한 온실내 유리로부터의 내부 반사는 무시되며, 입사되는 태양광은 완전한 평행광이다. 시뮬레이션 모형에서 사용된 시간증분은 1시간이다.

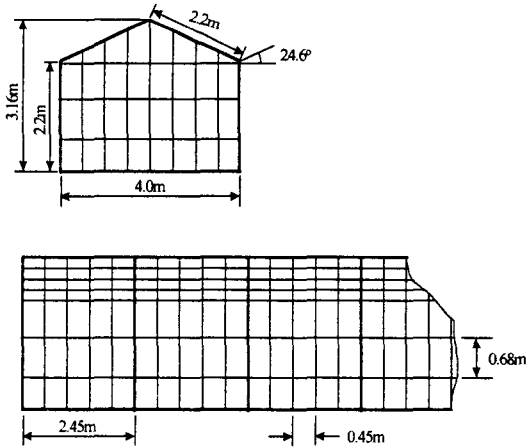


Fig. 2. Front and side views of the single-span glasshouse analyzed in this simulation.

결과 및 고찰

1. 산란일사의 투과율

식(3)에서 가정된 천공의 등방성은 온실내에서 산란일사의 투과율은 동방위 또는 계절

Table 1. Dimensions and technical details of the glasshouse used in this simulation model.

Number of spans	1
Length of the span	98m
Width of the span	4m
Height of side	2.2m
Height of ridge	3.16m
Roof slope	24.6°
Size of glass panes	0.68×0.45m
Thickness of glass panes	3mm
Depth of structural members	3cm
Width of structural members on roofs and sides	4cm
Width of horizontal structural members on gable ends	4cm
Width of vertical structural members on gable ends	5cm
Main structural members on roofs and sides distance apart	2.45m
width	8cm
depth	10cm

의 변화와 무관함을 암시하는 것이다. 표 2는 식(7)을 사용하여 태양고도의 함수로서 계산된 단동온실에서의 산란일사 투과율을 나타낸 것이다. 표 2에서 태양고도는 19등분되었다. 즉 태양고도의 정현값, $\sin(H_i)$ 가 0.1~1.0에서 0.05 간격으로 나누어진다. 단동온실을 대상으로 계산된 산란일사의 투과율은 60.4%로서, Harnett(1975)이 동서동과 남북동 온실에서 측정된 산란일사의 투과율 59.7~61.9%에 근접한 것으로 나타났다. 한편 高 등(1988)은 플라스틱 온실내에서 산란일사의 투과율을 약 65%로 제시한 바 있으며, 이 값은 플라스틱 온실의 고유치에 해당된다고 보고하였다. 온실내에서 위치에 따른 산란일사 투과율의 변화가 매우 작기 때문에 본 연구에서 개발된 시뮬레이션 모형에서는 산란일사 투과율을 60%로 가정하여 사용하였다.

2. 직달일사의 투과율

개발된 시뮬레이션 모형에 의해서 분석된 국내의 서울(37°34' N), 전주(35°49' N) 및 제주(33°31' N) 지역에서 온실내 직달일사 투과율에 미치는 온실 동방위의 영향은 다음과 같다.

그림 3은 맑은 날의 전주지역에서 단동 온실의 동방위에 따른 직달일사 투과율의 년중 변화를 나타낸 것이다. 동방위가 0°인 東西棟 온실에서 직달일사의 투과율이 동방위가 90°인 南北棟 온실에서의 직달일사에 비해서 높게 나타나는 시기는 9월 28일부터 익년 3월 12일 까지로서 약 6개월에 이른다. 이 시기에는 동방위가 증가할수록, 즉 동서동에서 남북

동으로 향할수록 투과율이 저하되는 것으로 나타났다. 직달일사의 평균 투과율을 년중 시기별로 살펴보면 동서동의 경우 11월 초순~1월 하순에는 67~69%이고, 2월 초순~3월 중순과 9월 중순~10월 하순에는 59~63%이며, 3월 하순~9월 초순에는 54~59%로 낮게 나타났다. 한편, 남북동에서 직달일사의 투과율은 동서동의 경우와 정반대로서, 겨울철에 남북동 온실에서의 직달일사 투과율은 51~55% 정도로서 동서동에 비해서 14~16% 정도 낮게 나타났다. 이와 같이 동서동에서 투과율이 높게 나타나는 이유는 동서동 온실의 지붕면에서의 입사각이 남북동에서의 입사각보다 작기 때문이다. 한편, 여름철에는 동서동에서

Table 2. Transmissivity of diffuse solar radiation in single-span glasshouse as a function of the sun's altitude.

I	H _i	H _{i+1}	sin(H _i)	sin(H _{i+1})	T _i '	WC'	T _i ×WC _i	∑T _i ×WC _i '
1	4.3	7.2	0.075	0.125	0.51	0.010	0.005	0.002
2	7.2	10.1	0.125	0.175	0.53	0.015	0.008	0.010
3	10.1	13.0	0.175	0.225	0.53	0.020	0.011	0.021
4	13.0	16.0	0.225	0.275	0.55	0.025	0.014	0.035
5	16.0	19.0	0.275	0.325	0.56	0.030	0.017	0.052
6	19.0	22.0	0.325	0.375	0.54	0.035	0.019	0.070
7	22.0	25.2	0.375	0.425	0.56	0.040	0.023	0.093
8	25.2	28.4	0.425	0.475	0.58	0.045	0.026	0.119
9	28.4	31.7	0.475	0.525	0.58	0.050	0.029	0.148
10	31.7	35.1	0.525	0.575	0.59	0.055	0.032	0.180
11	35.1	38.7	0.575	0.625	0.60	0.060	0.036	0.216
12	38.7	42.5	0.625	0.675	0.61	0.065	0.040	0.256
13	42.5	46.5	0.675	0.725	0.62	0.070	0.043	0.300
14	46.5	50.8	0.725	0.775	0.62	0.075	0.046	0.346
15	50.8	55.6	0.775	0.825	0.63	0.080	0.051	0.396
16	55.6	61.0	0.825	0.875	0.63	0.085	0.053	0.449
17	61.0	67.7	0.875	0.925	0.64	0.090	0.058	0.508
18	67.7	77.2	0.925	0.975	0.65	0.095	0.062	0.569
19	77.2	90.0	0.975	1.000	0.71	0.050	0.035	0.604

[†]Transmissivity of the glasshouse for altitude I.

[‡]Weighting factor (sin²(H_i)-sin²(H_{i+1})) for altitude I.

[§]Cumulative transmissivity of diffuse solar radiation.

투과율이 가장 낮게 나타났으며, 남북동에서 최고치가 나타났다. 이것은 겨울철과 반대로 여름철에는 남북동 온실의 지붕면에서의 입사각이 동서동의 경우보다 작기 때문이다.

동서동의 단동 온실에서 위도의 변화가 직달일사 투과율에 미치는 영향이 그림 4에 실려 있다. 겨울철에 위도가 높은 지역에서 직달일사의 투과율이 다소 높게 나타났으나, 이 차이는 무시할 만한 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 직달일사의 투과율에 미치는 국내 지역간의 차이, 즉 위도에 따른 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 그림 5는 남북동의 단동 온실에서 위도에 따른 직달일사 투과율을 나타낸 것이다. 동서동에서와 마찬가지로 남북동에서 직달일사 투과율에 대한 국내 지역간의 차이는 거의 없는 것으로 분석되었다.

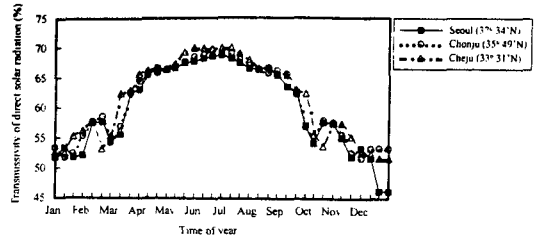


Fig. 5. Seasonal variation of transmissivity of direct solar radiation for the N-S single-span glasshouse with different latitudes.

적 요

온실의 동방위 및 지붕경사각, 구조물의 재원, 설치 지역의 위도 등이 단동형 유리 온실내의 직달 및 산란일사 투과에 미치는 효과를 분석하고자 컴퓨터 시뮬레이션 모형이 개발되었다. 개발된 모형은 년중일수, 온실의 방위 및 설치된 지점의 위도, 지붕경사각이 서로 다른 단동 및 연동 온실에 대하여 적용할 수 있다. 본 연구에서 수행된 온실의 동방위가 온실내의 직달 및 산란일사 투과율에 미치는 영향에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단동의 유리온실에서 계산된 산란일사의 투과율은 60.4%로서, 동방위에 무관하게 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다.
2. 겨울철에 직달일사의 투과율은 동서동에서 67~69% 정도이고, 남북동의 경우 51~55% 정도로서 동서동에서 14~16% 정도 높게 나타났다.
3. 여름철에 직달일사의 투과율은 동서동에서보다 남북동에서 높게 나타났다.
4. 직달일사의 투과율에 미치는 국내 지역간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

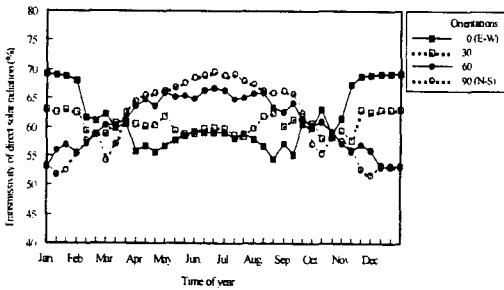


Fig. 3. Seasonal variation of transmissivity of direct solar radiation for the single-span glasshouse with different orientations at Chonju(35°49' N).

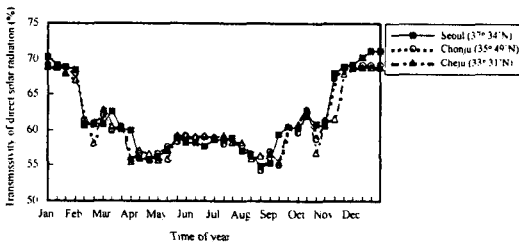


Fig. 4. Seasonal variation of transmissivity of direct solar radiation for the E-W single-span glasshouse with different latitudes.

감사의 글 : 본 논문의 연구진은 시뮬레이션 모형 개발에 도움을 준 日本 千葉大學 園藝學部 環境調節工學研究室의 古在豊樹 教授께 감사할 드린다.

인 용 문 헌

1. 고태균, 김문기, 김용현. 1989. 플라스틱 하우스의 직달 및 산란 일사량 해석. 한국태양에너지학회지 9(3) : 13-24.
2. 박재복, 고태균. 1986. 플라스틱 온실의 일사량 분석과 열적 환경의 시뮬레이션에 관한 연구. I. 플라스틱 온실의 일사량 분석. 한국태양에너지학회지 6(2) : 22-32.
3. Basiaux, P., J. Deltour and A. Nisen. 1973. Effect of diffusion properties of greenhouse covers on light balance in the shelters. Agr. Meteorol. 11 : 357-372.
4. Bowman, G.E. 1970. The transmission of diffuse light by a sloping roof. J. Agric. Engng. Res. 15 : 100-105.
5. Critten, D.L. 1984. The effect of geometric configuration on the light transmission of greenhouses. J. Agric. Engng Res. 29 : 199-206.
6. de Zwart, H.F. 1993. Determination of direct transmission of a multispan greenhouse using vector algebra. J. agric. Engng Res. 56 : 39-49.
7. Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, Inc.
8. Harnett, R.F. 1975. Study of glasshouse type and orientation. Acta Horticulturae. 46 : 207-215.
9. Kozai, T., J. Goudriaan, and M. Kimura. 1978. Light transmission and photosynthesis in greenhouse. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, Netherlands.
10. Manbeck, H.B. and R.A. Aldrich. 1967. Analytical determination of direct visible solar energy transmitted by rigid plastic greenhouses. Transactions of the ASAE 10(4) : 564-567,572.
11. Mastalerz, J.W. 1977. The greenhouse environment. John Wiley & Sons, Inc.
12. Smith, C.V. and H.G. Kingham. 1971. A contribution to glasshouse design. Agr. Meteorol. 8 : 447-468.
13. 古在豊樹. 1974. 溫室の構造と透過光量に関する理論的解析. 農業氣象 30(2) : 71-79.
14. 古在豊樹. 1973. 溫室の光透過に関する數値實驗(第1報). 農業氣象 29(3) : 23-30.