

온실 구조에 따른 광합성유효방사 투과율의 공간적 변이 비교

Comparison of the Spatial Variability of PAR Transmission According to the Shape of Greenhouses

배 영 환* 이 강 오* 임 준 백**
정희원
Y. H. Bae K. O. Lee J. T. Lim

1. 서론

자연광인 태양광은 작물의 생육에 있어서 매우 중요한 요소이다. 작물은 빛으로부터 에너지를 공급받아 동화산물을 합성하고, 각종 신진대사에 필요한 물질을 생성한다. 시설 내에서는 노지에 비하여 광량이 적으므로 겨울철에는 작물의 생육이 부진할 수 있으며, 또한 온실의 각종 구조물과 장치에 의한 그늘이 생기므로 작물 생육이 불균일해지기 쉽다.

하우스 내부로 입사되는 태양광은 구름의 양, 태양의 위치, 피복면의 상태와 광학적 특성, 지붕의 모양과 각도, 온실의 설치 방향에 영향을 받는다(Rosa 등, 1989). 영국의 Critten은 1980년대에 다양한 온실 구조에 따른 태양광의 투과율을 계산할 수 있는 수학적 모형을 제시하였다. 그는 벤로형 온실(Critten, D.L., 1983), 남쪽 지붕이 수직인 VSR 온실(Critten, D.L., 1985), Gothic arch형 온실(Critten, D.L., 1988), 플라스틱 터널(Critten, D.L., 1987)의 광 투과율을 이론적으로 분석하였다. Kurata 등(1991)은 중위도 지역의 동서 방향 터널형 온실에 대한 광 투과율을 분석하여 남쪽 경사를 크게 한 비대칭형 지붕의 경우에 겨울철 투과율을 10% 높일 수 있다고 하였다.

태양광의 파장은 주로 300~2500 nm 범위에 분포하지만, 이 중 400~700 nm의 파장 범위에 속하는 성분만이 식물체의 광합성에 이용되므로 이를 광합성유효방사(photosynthetically active radiation, PAR)라 한다. Guertal과 Elkins(1996)는 온실 내에 사방 40 cm 간격으로 529개의 센서를 설치하여 온실내 PAR의 공간적 변이를 측정하였다.

시설의 구조, 피복재의 종류와 피복 겹수, 외부 일사량 등에 따른 온실 내부 일사량 분포를 예측하는 것은 작물의 생육반응을 추정하는데 있어서 매우 중요하다. 본 연구는 표준형 비닐온실(1-2W형)과 무기등 비닐온실을 대상으로 시설의 구조에 따른 온실 내부의 PAR 투과율 변이를 실측을 통하여 비교하였다.

2. 재료 및 방법

1) 실험 온실

본 연구는 1995년도에 순천대학교 교내에 설치된 바닥면적이 14 m×23 m인 표준형 개

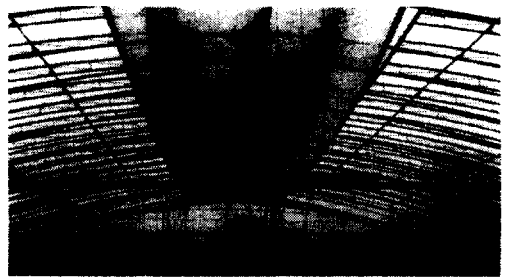
* 순천대학교 농과대학 농업기계공학과

** 순천대학교 농과대학 자원식물개발학과

량아취 연동형 온실(1-2W형)과 내부 바닥면적이 14 m×21 m인 (주)원예공업의 무기등 온실을 대상으로 실시되었다. 두 개의 온실은 모두 동서 방향으로 설치되었다. 표준형 온실은 2중으로 피복 되었으며, 외부와 내부 피복에는 각각 0.1 mm 와 0.06 mm 두께의 필름을 사용하였다. 무기등 온실은 비닐이 3중으로 피복 되어 있으며, 외기와 접하는 외부 측은 0.1 mm 두께의 E.V.A. 필름으로, 내부는 0.06 mm 두께의 필름으로 2중 피복 되었다. 그림 1은 각 온실의 지붕 구조를 비교한 것으로서 무기등 온실은 단동형으로 물받이와 보온 커튼이 설치되어 있지 않은 반면, 표준형 온실에는 중앙에 물받이가 설치되어 있으며, 겨울철 야간의 보온을 위한 부직포가 설치되어 있다.



(b) Standard type



(a) Postless single type

Fig. 1. Structure of the roofs of the experimental greenhouses.

2) 측정 장치

PAR을 측정하기 위하여 두 개의 측정 장치를 사용하였다. 투과율 계산의 기준이 되는 온실 외부의 PAR 강도를 측정하기 위하여 LI-COR사의 모델 LI-190SA 양자(quantum) 센서를 사용하였다.

온실 내부의 PAR 분포를 측정하기 위하여 Decagon Devices사의 AccuPAR PAR 측정기를 이용하였다. AccuPAR는 0.98 cm 간격으로 80 개의 광센서 어레이가 설치되어 있으며, PAR의 공간적 변이를 측정하기에 적합하였다. AccuPAR는 자체 메모리(64KB)에 저장된 데이터를 직렬통신 포트를 통하여 PC에 전송할 수 있다.

매우 흐린 날의 산란광과 대낮의 직사광선 등 다양한 자연광 조건하에서 두 측정기기로 PAR을 측정하여 AccuPAR를 구성하는 80 개의 광센서 출력을 각각 교정하였다. 교정의 기준으로는 LI-190SA 센서의 메이커에서 제공한 검사 결과를 이용하였다.

3) 측정 방법

온실내 PAR 변이를 1997년 6월 11일부터 6월 21일 사이에 조사하였다. 표준형 비닐온실과 무기등 비닐온실에 대하여 각 온실을 길이 방향으로 4등분한 세 위치에서 길이 방향에 수직으로 약 14 m의 온실 폭에 해당하는 직선을 따라 PAR의 변이를 AccuPAR PAR 측정기를 이용하여 조사하였다. 자체 제작한 높이 1.2 m의 거치대 위에 측정기를 수평으로 설치

한 후 78.5 cm 간격으로 이동하며 PAR을 측정하였다. 1회 측정 범위인 78.5 cm를 측정할 때마다 외부의 그늘이 없는 곳에 별도로 설치한 양자 센서를 이용하여 PAR을 5회 정도 측정하여 투과율 계산의 기준으로 하였다. 14 m 거리를 북에서 남으로 이동하며 PAR을 측정하는데 약 5 분이 소요되었다. 하루 중 측정 시각은 9시, 12시 및 15시를 기준으로 하였다. 표준형 온실은 천창이 닫힌 상태에서 측정하였으며, 무기동 온실은 내부에 설치된 두 겹의 피복이 모두 닫힌 상태, 한 겹이 열린 상태 및 두 겹이 모두 열린 상태에 대하여 측정하였다. 조사는 각 온실 및 피복 조건에 따라 3회씩 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

1) PAR 측정기의 교정

LI-COR사의 LI-190SA 양자 센서를 기준으로 하여 다양한 자연광 조건에서 86회의 반복 측정을 통하여 AccuPAR 측정기를 교정하였다. 교정을 실시한 기간 중 자연광의 PAR 범위는 약 400~2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로서 이는 구름이 짙은 산관광 조건에서부터 청명한 정오의 직사광선까지를 포함하는 것이다.

분석 결과 두 개의 PAR 측정기 사이에는 고도의 직선 상관관계가 있는 것으로 나타났다. AccuPAR를 구성하는 80 개 센서의 각 출력을 LI-190SA 양자 센서의 출력으로 교정하기 위하여 구한 80 개의 직선 회귀식의 결정 계수는 모두 0.998 이상으로 매우 높았다.

2) 표준형 온실의 PAR 투과율 변이

2연동 표준형 비닐 온실은 중앙에 물받이 홈통이 있으며, 겨울철 야간 보온을 위하여 설치된 부직포가 온실의 중앙과 남·북측 가장자리에 접혀 있기 때문에 이에 의한 그림자의 영향으로 일사량의 변이가 상대적으로 컸다. 천창이 닫힌 상태에서 두 겹의 비닐 피복을 통한 PAR 투과율의 14 m 온실 폭에 대한 평균은 0.37~0.48의 범위에 있었으며, 변이 계수는 0.18~0.27 이었다.

정오의 직사광선 하에서는 평균 투과율이 높았으며, 그림자가 짙게 형성되기 때문에 투과율의 변이가 심하여 변이 계수도 큰 값을 나타내었다. 오전 9시 또는 오후 3시 무렵에는 정오에 비하여 평균 투과율과 변이 계수가 감소하였다. 정오의 직사광선 하에서 그늘이 생기지 않은 부분의 PAR 투과율은 최대 0.59에 달하였다. 이는 두 겹 비닐 피복의 PAR 투과율이 0.77~0.85인 것(이, 1998)을 감안 할 때 상대적으로 낮은 것으로서, 온실 설치 후 2년이 경과하여 피복에 부착된 먼지 등의 이물질이 광 투과율을 낮춘 데 기인한 것이다. 정오의 직사광선 하에서 물받이와 접혀진 부직포에 의하여 그늘이 생기는 온실 중앙 부분의 PAR 투과율의 평균은 0.13~0.17로 매우 낮았다.

3) 무기동 온실의 PAR 투과율 변이

무기동 비닐 온실에는 중앙에 물받이가 없으며 보온용 부직포를 설치하는 경우에도 부직

포가 온실 중앙이 아니고 가장자리에 모이지므로 일사량의 변이가 표준형 온실에 비하여 작다.

그림 2는 무기동 비닐 온실의 천창 개폐에 따라 지붕의 피복이 1겹, 2겹 및 3겹일 때의 PAR 투과율 변이를 나타낸 것이다. 온실 중앙 부분은 천창 개방시 피복재가 말아 올려지는 부분으로 천창의 개폐여부에 관계없이 항상 삼중 피복에 해당하므로 투과율은 피복 겹수에 무관하였다. 온실 중앙 부분의 PAR 투과율의 평균은 기상 조건에 따라 0.28~0.44의 범위에 있었으며, 정오 무렵에는 그 폭이 약 3 m 이었다. 온실 폭 14 m 대한 PAR 투과율의 평균값의 범위는 광 조건에 따라 1중 피복시에는 0.38~0.59, 2중 피복시에는 0.32~0.52, 3중 피복시에는 0.30~0.41 이었다.

무기동 온실은 광 분포의 변이가 상대적으로 크지 않아 14 m 폭에 대한 PAR 투과율의 변이 계수는 지붕이 1중 피복인 경우에는 0.06~0.24, 2중 피복의 경우에는 0.07~0.18, 3중 피복인 경우에는 0.07~0.14의 범위를 나타내었다.

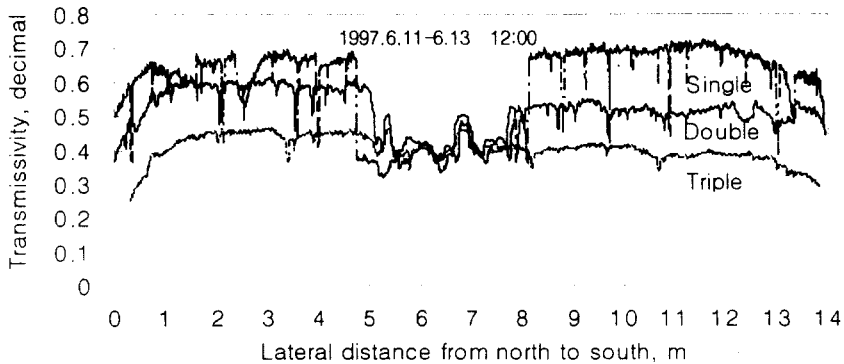


Fig. 2. Variability of the PAR transmissivity of the postless vinylhouse according to the number of covering films.

4) 표준형 온실과 무기동 온실의 PAR 투과율 비교

그림 3은 정오 무렵의 표준형 온실의 PAR 투과율과 피복 1겹을 개방하여 지붕이 두 겹의 필름으로 피복된 상태의 무기동 온실의 PAR 투과율의 변이를 비교한 것이다. 온실 폭 14 m에 대한 표준형 온실의 PAR 투과율 평균은 0.46, 변이 계수는 0.25 이었으며, 무기동 온실의 PAR 투과율 평균은 0.52, 변이 계수는 0.12 이었다. 표준형 온실의 중앙과 남·북측 가장 자리에서 투과율이 매우 낮은 것은 보온 부직포와 시설 구조물에 의한 그림자의 영향 때문이다. 그림 4는 그림 3의 PAR 투과율 분포를 히스토그램으로 나타낸 것이다.

그림 5는 측정 시간에 따른 온실 내 PAR 투과율의 평균치를 온실 종류 및 피복 겹수에 따라 나타낸 것이다. 정오 무렵의 투과율이 오전 9시 또는 오후 3시에 비하여 높은 것을 알 수 있다. 측정 시간과 광 조건을 모두 포함한 PAR 투과율의 전체 평균은 표준형 온실의 경

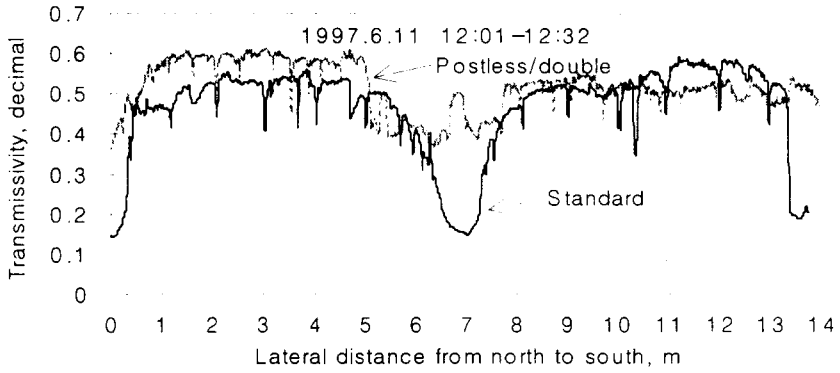


Fig. 3. Variability of PAR transmissivity of the two experimental greenhouses.

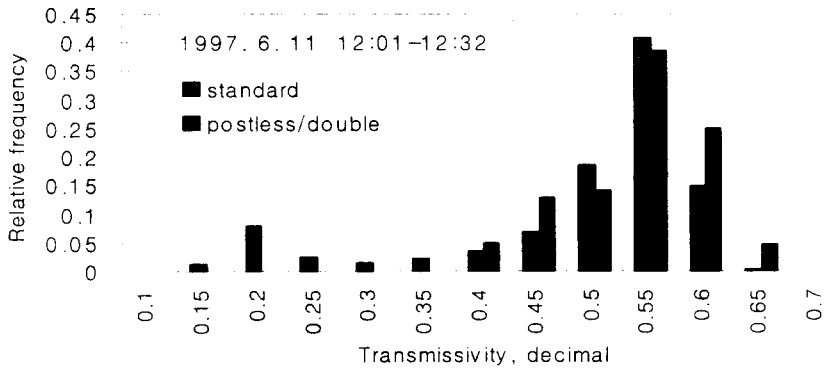


Fig. 4. Histograms of PAR distribution for the experimental greenhouses.

우에는 0.42 이었으며, 무기등 온실 1겹 피복, 2겹 피복, 3겹 피복의 경우에는 각각 0.49, 0.44 및 0.35 이었다. 따라서 무기등 온실은 천창을 개방하여 1겹 피복인 경우에는 표준형 온실 보다 평균 PAR 투과율이 평균적으로 18% 높았으며, 2겹 피복상태의 경우에는 6.5% 높았다. 반면 무기등 온실의 천창을 모두 닫아 3겹 피복 상태인 경우에는 표준형 온실 보다 평균 PAR 투과율이 15% 낮았다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 2연동 표준형 온실과 무기등 온실을 대상으로 지상 1.2 m 높이에서의 광합성 유효방사의 공간적 변이를 실측을 통하여 비교하였다. 표준형 온실의 PAR 투과율의 평균은 측정 시간과 광 조건에 따라 0.37 ~0.48의 범위에 있었으며, 14 m 온실 폭에 대한 투과율의 변이 계수는 0.18~0.27 이었다.

무기등 온실의 온실 폭 14 m 대한 PAR 투과율의 평균값의 범위는 광 조건에 따라 3중 피복시에는 0.30~0.41, 2중 피복시에는 0.32~0.52, 1중 피복시에는 0.38~0.59 이었다.

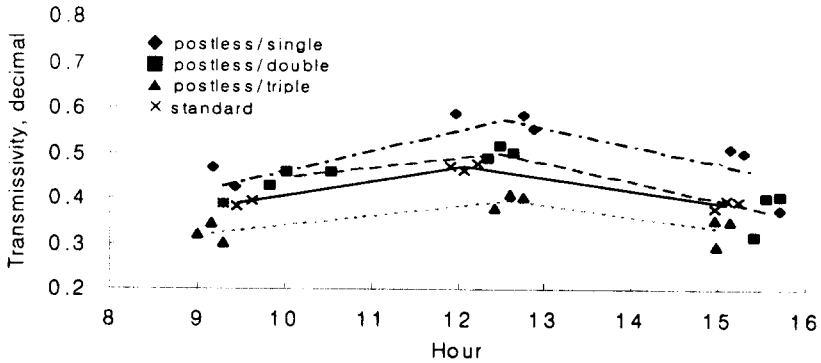


Fig. 5. Average PAR transmissivity values according to time of day and greenhouse type

무기둥 온실은 광 분포의 변이가 상대적으로 크지 않아 14 m 폭에 대한 PAR의 변이 계수는 지붕이 1중 피복인 경우에는 0.06~0.24, 2중 피복의 경우에는 0.07~0.18, 3중 피복인 경우에는 0.07~0.14의 범위를 나타내었다.

측정 시간과 광 조건을 모두 포함한 PAR 투과율의 전체 평균은 표준형 온실의 경우에는 0.42 이었으며, 무기둥 온실 1겹 피복, 2겹 피복, 3겹 피복의 경우에는 각각 0.49, 0.44 및 0.35 이었다. 따라서 무기둥 온실은 천창을 개방하여 1겹 피복인 경우에는 표준형 온실 보다 평균 PAR 투과율이 18% 높았으며, 2겹 피복상태의 경우에는 6.5% 높았다. 반면 무기둥 온실의 천창을 모두 닫아 3겹 피복 상태의 경우에는 표준형 온실 보다 평균 PAR 투과율이 15% 낮았다.

5. 참고문헌

- 이강오. 1998. 온실 구조에 따른 환기율과 일사량 분포의 비교. 순천대학교 대학원 농업기계 공학과 석사학위 논문. pp. 62-66.
- Critten, D.L. 1983. A computer model to calculate the daily light integral and transmissivity of a greenhouse. *J. agric. Engng. Res.* 28: 61-76.
- Critten, D.L. 1985. A theoretical assessment of the transmissivity of conventional symmetric roofed multispan E-W greenhouses compared with vertical south roofed greenhouses under natural irradiance conditions. *J. agric. Engng. Res.* 32: 173-183.
- Critten, D.L. 1987. The prediction of multispan greenhouse light transmission, with particular reference to tunnels under direct winter light conditions. *J. agric. Engng. Res.* 38: 57-64.
- Guertal, E.A. and C.B. Elkins. 1996. Spatial variability of photosynthetically active radiation in a greenhouse. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(2): 321-325.
- Kurata, K., Z. Quan and O. Nunomura. 1991. Optimal shapes of parallel East-West oriented single-span tunnels with respect to direct light transmissivity. *J. agric. Engng. Res.* 48: 89-100.
- Rosa, R., A.M. Silva and A. Miguel. 1989. Solar irradiation inside a single span greenhouse. *J. agric. Engng. Res.* 43: 221-229.