

천창을 설치한 토마토 재배 단동 온실의 환기성능 분석

남상운^{1*} · 김영식² · Arend-Jan Both³

¹충남대학교 지역환경토목학과, ²상명대학교 식물산업공학과, ³러거스대학교 환경과학과

Analysis on the Ventilation Performance of Single-span Tomato Greenhouse with Roof Windows

Sang-Woon Nam^{1*}, Young-Shik Kim², and Arend-Jan Both³

¹Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Department of Plant Science and Technology, Sangmyung University, Cheonan 330-720, Korea

³Department of Environmental Sciences, Rutgers, The State University of New Jersey, New Brunswick, NJ 08901, USA

Abstract. Ventilation rates, inside and outside weather data were measured in a arch-shape single-span plastic greenhouse growing tomatoes. On the roof of the experimental greenhouse, round windows which have a diameter of 0.6 m were installed at intervals of 8m. It showed that the number of air changes in this greenhouse were average 0.17 volumes per minute and in the range of 0.02 to 0.32 volumes per minute. These air changes are insufficient to meet the recommended ventilation rate for commercial greenhouses, and it is estimated that interval of 6 m is appropriate for spring or fall season. For summer season, it is necessary to narrow the space or to enlarge the open area of roof windows. Using the heat balance model, the evapotranspiration coefficients of greenhouse tomatoes were estimated from experimental ventilation data, overall heat transfer and solar radiation. It showed that the evapotranspiration coefficients were average 0.62 and in the 0.39 to 0.85 range. We suggest applying 0.6 as the evapotranspiration coefficient in design of ventilation for the single-span tomato greenhouses.

Key words : evapotranspiration coefficient, heat balance model, natural ventilation, roof window, single-span plastic greenhouse

서 론

우리나라의 온실은 거의 대부분 아치형 플라스틱 온실이며, 그 중에서도 단동 온실이 주류를 이루고 있다. 토마토 재배 온실에 대한 실태조사 결과를 보면 무려 77%가 단동 플라스틱 온실로 나타나고 있다(Nam and Kim, 2009). 아치형 단동 온실의 경우 천창을 설치하기가 어려운 구조로 되어 있어서 대부분 측창만을 설치하여 운영하고 있다. 그러나 측창만으로는 중력 환기가 불량하므로 바람이 불지 않을 경우 환기효과를 기대하기 어렵다. Son and Choi(2000)는 단동의 버섯 재배 온실에서 천창이 없는 시설은 환기가 불량하여

생육이 좋지 않고, 측창면적과 천창면적이 동일한 경우에 환기효율이 높다고 보고하였다. 온실재배에 있어서 가장 경제적인 환경조절 방법은 자연환기에 의한 것이므로 온실의 자연환기 성능을 극대화 하는 것은 매우 중요한 과제이다. 자연환기 성능을 극대화하기 위해서는 천창을 설치하는 것이 필수적이다. 최근 온실업계나 농민들도 이를 인식하고 단동온실에 설치할 수 있는 환기창을 개발하고 설치하는 농가가 늘고 있다. 충남 부여지역의 토마토 재배 온실에서도 창문이나 굴뚝식 천창을 설치한 농가가 전체 단동 온실의 32%에 이르고 있다. 그러나 이들에 대한 설치 기준이 없어 직경 60cm의 원형 환기창의 경우 설치간격이 3.0~9.4m(평균 6.2m)로 제각각이며 설치와 운영에 있어 많은 문제점을 내포하고 있다(Nam and Kim, 2009). 따라서 단동온실에서 소형 지붕 환기창 효과에 대한 검증과

*Corresponding author: swnam@cnu.ac.kr
Received May 31, 2011; Revised June 7, 2011;
Accepted June 9, 2011

이들의 설치 운영에 관한 가이드라인을 제시할 필요가 있다.

한편, 온실의 환기 설계를 위해서는 기온, 습도 및 탄산가스 농도 등을 일정한 수준으로 유지하기 위한 필요환기율을 결정해야 한다(Kim et al., 2000). 그 중에서도 일반적인 온실에서의 필요환기율은 고온억제를 위한 환기율을 기준으로 하며, 주로 열평형 모델을 사용하여 결정한다(ASAE, 1997). 환기설계를 위한 열평형 모델에서는 목표온도와 설계기상조건 외에 피복재의 광투과율과 열관류율, 작물의 증발산계수 등 많은 매개변수들이 설계인자로 고려된다. 이들 매개변수 중에서 증발산계수의 선택이 매우 중요하며 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 증발산계수의 자료 축적과 가이드라인 제정이 필요하다(Nam, 2000).

따라서 본 연구에서는 온실의 환기설계 기준 설정 및 단동 플라스틱 온실의 원형 천창 설치 가이드라인 제정을 위한 기초자료를 제공할 목적으로 천창이 설치된 토마토 재배 단동 온실에서 환기실험을 통하여 자연환기 성능을 분석하고, 열평형 모델을 이용하여 온실 재배 토마토의 증발산계수를 추정하였다.

재료 및 방법

실험온실은 충남 부여에 설치된 아치형 플라스틱 온실로 폭 6.1m, 길이 100m의 단동이며 주변에 같은 형태의 온실이 밀집된 토마토 재배 단지 내에 위치하고 있다. 온실의 높이는 측고 1.8m, 동고 2.6m이며 측벽에는 권취식 측창이 설치되어 있고, 지붕에는 지름 60cm의 원형 환기창이 8m 간격으로 설치되어 있다. 토마토는 2008년 10월 18일에 정식하여 2009년 1월 20일부터 수확을 시작하였으며 환기실험은 3월 15일부터 4월 6일까지 수확기간에 실시하였다. 온실 내부와 외부의 기상환경은 온습도(HTR10, Hans system), 일사량(LI200X, Campbell scientific Inc.) 및 풍속(Air velocity transmitter, Dwyer instruments Inc.)을 20분 간격으로 측정하였다. 환기량은 환기창의 단면 수직 풍속을 측정하여 구하였다. 실험에 사용한 온실은 인접동 간격이 1.2m에 불과한 밀집된 단지 내에 위치하고 있어서 풍력에 의한 환기효과를 기대하기가 어려웠다. 온실의 자연환기는 풍속 $2.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상인 경우에 풍

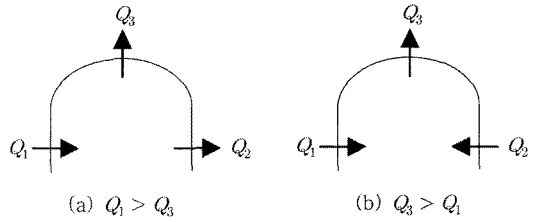


Fig. 1. Schematics of natural ventilation in single-span greenhouses.

력환기가 지배적이고, $1.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하에서는 중력환기의 영향이 크다(Kim et al., 2000). 실제 측창 주변에서 풍속을 측정한 결과를 보면 실험기간 동안 최대 $0.9\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 평균 $0.4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 불과했다. 본 연구에서는 지붕에 설치한 천창의 환기효과를 분석하기 위해 원형 천창의 중앙에 일방향 열선풍속계를 설치하여 단면 수직 풍속을 측정하고 여기에 단면적을 곱하여($Q=AV$) 유동량($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)을 구하였다. 풍상측 측창의 유동량을 Q_1 , 풍하측 Q_2 , 천창의 유동량을 Q_3 라 하면 Fig. 1과 같이 풍력환기가 우세할 경우 $Q_1 > Q_3$ 가 되고, 중력환기가 우세할 경우 $Q_3 > Q_1$ 이 된다.

좁고 긴 권취식 환기창에서 단면수직풍속을 측정하여 환기량을 구하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 중력환기가 우세한 것으로 판단하여 천창의 유동량을 기준으로 환기량을 구하였다. 환개구가 다른 개구에 비해 매우 크면 유동의 증가가 생긴다. 본 실험온실은 측창면적이 천창면적에 비해 40배 이상 크므로 유동증가율 38%를 적용하여 총 환기량으로 하였다(Hellickson and Walker, 1983).

증발산계수는 태양복사에 대하여 작물의 증발산에 의해 잠열형태로 소비되는 비율을 의미한다. 온실 내부로 유입되는 태양복사량은 환기 및 관류열 전달에 의해 배출되고 나머지는 증발산에 의해 소비된다(Hellickson and Walker, 1983; ASAE, 1997; Nam, 2000). 따라서 증발산계수(E)는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q_{ET} = Q_{SR} - (Q_V + Q_W) \quad (1)$$

$$E = \frac{Q_{ET}}{Q_{SR}} = \frac{Q_{SR} - Q_V - Q_W}{Q_{SR}} \quad (2)$$

여기서, Q_{ET} 는 증발산에 소비된 열량($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), Q_{SR} 은

태양복사 유입량($W \cdot m^{-2}$), Q_V 는 바닥면적당 환기전열량($W \cdot m^{-2}$), Q_W 은 바닥면적당 관류열전달량($W \cdot m^{-2}$)이다.

태양복사 유입량은 실내 일사량 측정 자료를 이용하였고, 바닥면적당 환기전열량과 관류열전달량은 환기량과 실내외 기온 측정 자료를 이용하여 다음 식으로 구하였다.

$$Q_V = \frac{Q C_p}{A_f v} (T_i - T_o) \quad (3)$$

$$Q_W = \frac{U A_c}{A_f} (T_i - T_o) \quad (4)$$

여기서, C_p 는 공기의 비열($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), v 는 실내공기의 비체적($m^3 \cdot kg^{-1}$), A_f 는 온실의 바닥면적(m^2), A_c 는 온실의 표면적(m^2), U 는 열관류율($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$), T_i 와 T_o 는 실내 및 실외온도($^\circ C$)이다.

결과 및 고찰

환기 실험은 실험기간동안 비교적 맑은 날 오전 10시부터 오후 5시까지 실시하였다. 20분 간격으로 측정된 자료 중에 상태가 양호한 조건의 데이터 141세트를 추출하여 분석에 이용하였으며 1시간 간격으로 평균한 47세트의 데이터를 도표 작성에 이용하였다. 실험기간동안 외기온은 평균 $16^\circ C$ (8.5~24.2), 실내기온은 평균 $21.2^\circ C$ (15.0~30.7 $^\circ C$)였고, 외부일사량은 평균 $563 W \cdot m^{-2}$ (139~770 $W \cdot m^{-2}$), 실내일사량은 평균 $278 W \cdot m^{-2}$ (70~384 $W \cdot m^{-2}$)으로 나타났으며 광투과율은 49.4%로 낮은 편이었다.

직경 60cm의 원형 천창을 지붕의 중앙에 8m 간격으로 설치한 단동온실의 자연환기 성능을 실험한 결과는 Fig. 2와 같다. 현재 농가에 많이 보급되고 있는 본 실험온실에 설치된 형태의 원형환기창은 6m 간격으로 설치하도록 제조회사에서 권장하고 있지만 명확한 설치기준이 없어 본 실험 농가에서는 8m 간격으로 설치하고 있다. 이 경우 천창 면적은 측창 면적의 2.4%에 불과하고, 환기회수는 분당 0.02~0.32회($p = 0.05$)의 범위를 보였으며 평균 0.17회 $\cdot min^{-1}$ 로 나타났다.

Hellickson and Walker(1983)와 Albright(1990)는 상업용 온실의 여름철 권장 환기율을 분당 0.75~1.0회

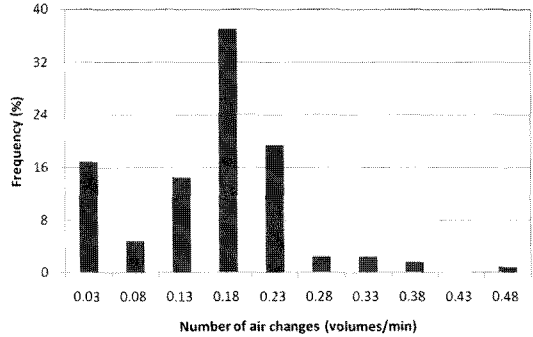


Fig. 2. Frequency distribution of air change rate in a single-span greenhouse with round roof windows.

로 제시하고 있으며, Lindley and Whitaker(1996)는 실내기온을 외기온 대비 $5^\circ C$ 이내로 유지하기 위해서는 분당 1회의 환기율이 필요하고 더 낮은 온도를 유지하려면 차광이나 냉방을 해야 한다고 하였다. 이들의 추천 값을 본 실험 결과와 비교하면 원형 환기창 설치간격을 2m 정도로 설치해야 권장 환기율을 만족할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이와 같은 환기창을 2m 간격으로 설치하려면 시설비가 많이 들 뿐만 아니라 광투과를 떨어뜨려 생산성 저하가 예상되므로 쉽게 적용하기는 어렵다. 여름보다는 적지만 비교적 많은 환기가 요구되는 봄이나 가을철의 적절한 환기를 위해서는 6m 정도의 설치간격이면 적당한 것으로 판단된다. 현재 원형 천창을 제조하는 업체에서 권장하는 설치간격 6m는 많은 농가에서 따르고 있지만 여름철 권장환기를 위해서는 턱없이 부족한 상황이다. 하지만 천창을 설치하면 환기성능이 개선되는 것은 분명한 사실이고, 원형 천창을 6m 간격으로만 설치하여도 봄이나 가을철에 필요한 환기량을 충분히 만족하므로 천창 설치를 권장할 필요가 있다. 또한 좀 더 환기성능을 높이기 위해서는 광투과를 저해하지 않으면서 지붕의 개구면적을 확대할 수 있는 방안을 찾아야 할 것으로 생각된다.

자연환기는 풍압력에 의한 풍력환기와 온실 내외의 온도차에 의한 부력으로 이루어지는 중력환기로 구분된다. 풍력환기는 풍속에 비례하고 중력환기는 온도차의 평방근에 비례하는 것으로 알려져 있다(Nam et al., 2008). 환기량과 실내외 온도 및 풍속 계측자료를 이용하여 회귀분석을 해 본 결과 다음과 같이 나타났다.

$$N = 1.1788X_1 (R^2 = 0.76) \quad (5)$$

천창을 설치한 토마토 재배 단동 온실의 환기성능 분석

$$N = 0.3174X_2 \quad (R^2 = 0.52) \quad (6)$$

$$N = 0.7035X_1 + 0.1550X_2 \quad (R^2 = 0.81) \quad (7)$$

$$X_1 = \sqrt{\frac{T_i - T_o}{T_i + 273.15}} \quad (8)$$

여기서, N은 분당 환기회수, X₂는 외부풍속(m·s⁻¹)이다. 식 (5)는 환기율과 실내의 온도차와의 관계를 분석한 것으로 중력환기의 영향을 나타낸 것이고, 식 (6)은 환기율과 외부풍속과의 관계를 분석한 것으로 풍력환기의 영향을 나타낸 것이다. 식 (7)은 중력과 풍력환기를 결합한 것으로 결정계수는 0.81로 나타났다. 재료 및 방법에서 언급한 바와 같이 본 실험에서는 외부풍속이 매우 낮아 풍력환기의 영향이 적을 것으로 예상되며 회귀분석 결과에서도 중력환기가 우세한 것을 알 수 있다.

온실의 환기 설계를 위한 열평형 모델은 온실로 유입되는 태양복사량이 환기전열과 열관류 및 작물의 증발산에 의해 소비되는 것을 기본으로 개발된 것이다 (ASAE, 1997). 식 (1)~식 (4)에서 보는 바와 같이 환기량과 실내의 기상환경을 실측하면 증발산 소비량을 제외한 모든 열수지항을 산정할 수 있다. 한편 태양복사에 대한 증발산 소비의 비를 나타내는 증발산계수의 선택이 온실의 환기 설계에서 매우 중요하다고 하였으며(Nam, 2000), 본 연구에서는 환기실험을 통하여 성숙기 토마토의 증발산계수를 분석하였다. 온실 내 태양복사량의 변화에 따른 증발산 소비량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 대체로 태양복사의 일정비율이 토마토 작물의 증발산으로 소비되는 것을 알 수 있으

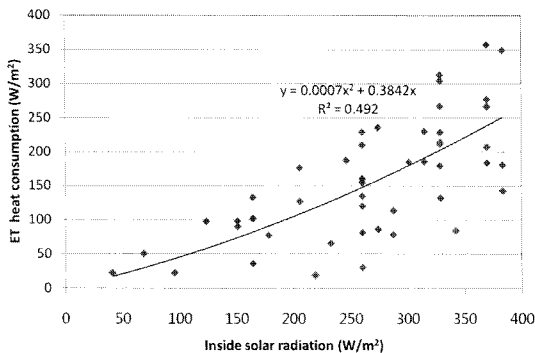


Fig. 3. Evapotranspiration heat consumption as a function of solar radiation in a tomato greenhouse.

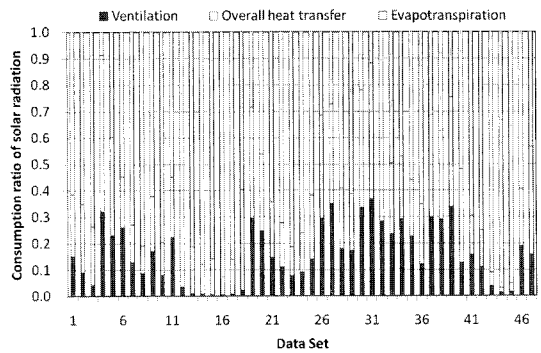


Fig. 4. Consumption ratio of solar radiation by ventilation, overall heat transfer and evapotranspiration in a tomato greenhouse.

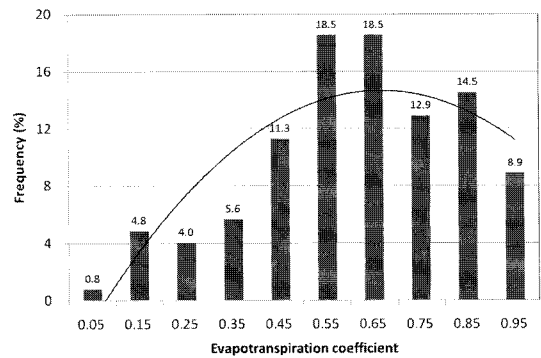


Fig. 5. Frequency distribution of evapotranspiration coefficient in a tomato greenhouse.

며 특정 범위의 증발산계수를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 태양복사량과 각 열수지항 및 증발산열의 비율을 나타낸 것이다. 온실로 유입되는 태양복사량 중에서 4~27%(평균 15%)는 환기로 배출되며 10~36%(평균 23%)는 관류열 전달에 의해서 배출되고, 39~85%(평균 62%)는 토마토 작물의 증발산에 의해 소비되는 것으로 나타났다. Fig. 5는 증발산계수의 빈도분포를 나타낸 것이다. 증발산계수는 0.39~0.85의 범위(p=0.05)를 보였고, 평균 0.62로 분석되었다. Tachibana 등(1979)은 작물의 무성한 정도에 따라 다르지만 순복사에 대한 증발산량의 비는 보통 0.5~0.65를 보인다고 하였으며, Hellickson과 Walker(1983)는 왕성하게 자라는 작물에 대해서 증발산계수는 0.5~1.0의 범위를 보이며 환기 설계시에는 0.5를 권장하고, ASAE(1997)는 작물이 작거나 증발냉각 중인 온실에서는 증발산계

수를 0.1~0.2, 성숙한 작물이나 습도비가 낮은 경우 0.8~0.9를 제시하고 있다. 본 실험에서 토마토 작물은 수확기간 이므로 성숙한 상태에서 다른 연구자의 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 생각된다. 따라서 토마토 재배 단동 플라스틱 온실의 환기설계시 증발산계수는 0.6 정도를 사용하면 적당할 것으로 판단된다.

재배 단동 플라스틱 온실의 환기설계에서 증발산계수는 0.6 정도를 사용하면 적당할 것으로 판단된다.

주제어 : 단동 플라스틱 온실, 열평형모델, 자연환기, 증발산계수, 천창

적 요

온실의 환기설계 기준 설정 및 단동 플라스틱 온실의 원형 천창 설치 가이드라인 제정을 위한 기초자료를 제공할 목적으로 천창이 설치된 토마토 재배 단동 온실에서 환기실험을 통하여 자연환기 성능을 분석하고, 열평형 모델을 이용하여 온실 재배 토마토의 증발산계수를 추정하였다. 직경 60cm의 원형 천창을 지붕의 중앙에 8m 간격으로 설치한 단동온실의 자연환기 성능을 실험한 결과 환기회수는 분당 0.02~0.32회(평균 0.17회 · min⁻¹)의 범위를 보여 상당히 낮은 것으로 나타났다. 그러나 상업용 온실의 권장환기율과 비교하면 6m 간격으로 설치할 경우에는 봄이나 가을철에 필요한 환기량을 충족할 수 있을 것으로 판단되며, 여름철 권장환기를 위해서는 2m 정도의 간격으로 설치해야만 가능할 것으로 판단되므로 광투과를 저해하지 않으면서 지붕의 개구면적을 확대할 수 있는 방안을 찾아야 할 것으로 생각된다. 실험에 사용한 단동 온실은 인접 동 간격이 1.2m에 불과한 밀집된 단지 내에 위치하고 있어서 측창 주변의 외부 풍속이 최대 0.9m · s⁻¹(평균 0.4m · s⁻¹)에 불과하고 풍력에 의한 환기효과를 기대하기가 어려웠다. 환기량과 풍속 및 실내외 온도차와의 관계를 비교 분석해 본 결과 증력환기가 우세함을 확인 할 수 있었다. 본 환기실험 자료를 온실의 환기설계를 위한 열평형모델에 적용하여 증발산계수를 추정해 본 결과 0.39~0.85의 범위(평균 0.62)를 보였고, 다른 연구자들이 제시하는 일반적인 온실의 설계 권장 값과 유사한 경향을 나타냈다. 따라서 토마토

인 용 문 헌

1. Albright, L.D. 1990. Environment control for animals and plants. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.200-201.
2. ASAE Standards. 1997. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.663-670.
3. Hellickson, M.A. and J.N. Walker. 1983. Ventilation of agricultural structures. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.103-124, p.297-319.
4. Kim, M.K., S.W. Nam, W.M. Seo, Y.C. Yoon, S.G. Lee, and H.W. Lee. 2000. Agricultural structures engineering. Hyangmoonsa Pub. Seoul. p.175-183(in Korean).
5. Lindley, J.A. and J.H. Whitaker. 1997. Agricultural buildings and structures. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.463-484.
6. Nam, S.W. 2000. Application of heat balance model to design of ventilating and cooling greenhouses. Journal of Bio-Environment Control 9(4): 201-206(in Korean).
7. Nam, S.W., W.M. Seo, Y.C. Yoon, S.K. Lee, I.B. Lee, H.W. Lee, and B.K. Cho. 2008. Bio-environment control engineering. Cheongsol Pub. Daegu. p.215-218(in Korean).
8. Nam, S.W. and Y.S. Kim. 2009. Analysis on the uniformity of temperature and humidity according to environment control in tomato greenhouses. Journal of Bio-Environment Control 18(3): 215-224(in Korean).
9. Son, J.E. and W.S. Choi. 2000. Analysis of climatic factors during growing period of high-quality oak mushroom. Journal of Bio-Environment Control 9(2): 115-119(in Korean).
10. Tachibana, K., K. Hanekura, K. Takahashi, and E. Ohtsuka. 1979. Design and construction of greenhouses for protected horticulture. Ohm Pub. Tokyo. p.91-103 (in Japanese).