

Application of Heat Balance Model to Design of Ventilating and Cooling Greenhouses¹⁾

Nam, Sang-Woon

Dept. of Agricultural Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

Abstract

A certain system to overcome high temperature should be introduced for the stable year-round cultivation in greenhouses. There are efficient methods to overcome high temperature such as ventilation system with shading screen, fan and pad system with screen, and fog system with screen. This study was carried out to find a means to determine the capacity of such systems. Heat balance equations for each system were established and verified by experimental results. The calculated ventilation rates from heat balance equations showed a good agreement with the measured ones. The evapotranspiration coefficient was the most important parameter affecting the ventilation requirement among input parameters except weather data. When the evapotranspiration coefficient increased 1%, the ventilation requirement decreased 1.3%. Therefore the data of evapotranspiration coefficient should be accumulated by various experiments, and then design standards and selection guidelines should be provided. The simulation results for same design conditions showed that air exchange requirement and evaporating water of fan and pad system were 5.1~7.7% and 6.8~9.3% larger than those of fog system, respectively.

Key words: greenhouse design, cooling, ventilation, heat balance model

¹⁾이 논문은 1999년도 농림부에서 시행한 농림기술개발과제의 일부로 수행되었음.

서 론

온실산업의 발전으로 높은 시설비를 투자한 주년재 배양 고정식 온실이 급속히 증가하였으나 여름철 고온 극복의 문제로 연간 시설 이용율이 낮은 실정이다. 하절기 온실의 활용실태 조사에 의하면 유리온실은 18.7%, 비닐하우스는 24.0%의 농가가 휴경하고 있으며, 나머지 경우도 매우 열악한 환경하에서 재배가 이루어지고 있는 것으로 보고되고 있다(Nam, 2000). 온실의 고온극복 방법으로는 차광, 환기, 증발냉각, 근권부나 작물체 주위 등의 국부냉방, 히트펌프, 지붕살수 등의 방법이 있으나 적극적인 환기와 차광의 병행 그리고 증발냉각시스템을 제외하고는 그다지 실용성이 높지 않은 것으로 알려져 있으며, 환기 및 냉방 설계기술의 정립, 비용절감 및 체계화 기술 개발이 과제로 남아 있다(Woo et al., 1996; Nam, 1996).

여름철 고온기에 시설 이용율을 높이고 안정적인 생산을 하기 위하여는 적극적인 차광환기시스템과 증발냉각시스템을 도입하는 것이 필요하다. 이러한 시스템

을 도입하기 위하여는 적정 설비용량의 결정이 중요하며, 이는 지역별 외부의 설계 기상자료로부터 구할 수 있다. 차광환기시스템에서 적정 차광율은 작물의 종류에 따라서 결정되어야 하며 따라서, 온실의 환기 및 냉방 시스템 설계에서 기본적으로 결정해야될 설계 인자는 목표온도를 달성하기 위한 필요환기율과 증발냉각시스템의 분무수량이다.

필요환기율과 증발냉각에 필요한 분무수량을 결정하기 위한 열평형 모델은 많지만 대부분 차광환기시스템과 fan and pad 시스템에만 적용이 가능하고(Choi, 1989; ASAE, 1997; Kim et al., 1997), 포그시스템에 적용할 수 있는 VETH 선도는 작성이 번거로우며 모든 경우에 적용이 불가능하고 조건에 따라 각각 작성해야하는 불편이 있다(Tachibana et al., 1979; Mihara, 1980). Fan and pad시스템의 경우에는 측벽에 설치된 패드에서 증발이 일어나고, 냉각된 공기가 환기시스템에 의하여 실내로 유입되는 것이므로 일반 환기시스템과 비슷하다. 그러나 포그시스템의 경우에는 실내에서 분무되고 증발이 일어나므로 일반 환기시스

템과는 다른 식이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 온실의 고온극복방법을 차광 환기시스템, 차광환기 패드시스템(fan and pad system with screen), 차광환기 포그시스템(fog system with screen)으로 설정하고, 온실의 고온극복을 위한 시스템의 설계제원 결정 알고리즘을 제공할 목적으로 각각의 시스템에 대한 열평형식을 구성하고 현장 실험을 통하여 적용성을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 열평형식의 구성

온실의 고온극복방법은 차광환기시스템, 차광환기 패드시스템, 차광환기 포그시스템으로 설정하였으며, 미국농공학회(ASAE, 1997)의 Design Standards에서 제시하고 있는 온실의 환기 및 냉방에 관한 열평형식을 기초로 수정식을 구성하였다.

1) 차광환기시스템

$$\alpha I_s A_f - U A_c (T_i - T_o) - \frac{Q C_p}{v} (T_i - T_o) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha = (1 - E)(\tau)(1 - r_s) \quad (2)$$

여기서, E는 태양복사에 대하여 작물의 증발산에 의해 잠열형태로 소비되는 에너지의 비율, τ 는 피복재의 일사 투과율, r_s 는 차광율, I_s 는 외부 수평면 일사량($W \cdot m^2$), U는 열관류율($W \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$), A_f 는 온실의 바닥면적(m^2), A_c 는 온실의 표면적(m^2), T_i 와 T_o 는 실내 및 실외 설계온도($^\circ C$), Q는 환기량($m^3 \cdot s^{-1}$), C_p 는 공기의 비열($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), v는 실내공기의 비체적($m^3 \cdot kg^{-1}$)이다.

2) 차광환기 패드시스템

차광환기 패드시스템은 fan and pad 시스템에 차광을 결합한 형태로서 열평형식은 차광환기시스템과 같으나, 환기전열항의 T_o 대신 T_w 을 사용한다.

$$T_w = T_o - \varepsilon(T_o - T_w) \quad (3)$$

여기서, T_w 은 패드시스템의 출구온도($^\circ C$), T_o 는 외기의 설계 습구온도($^\circ C$), ε 은 증발냉각 효율이다. 증발수량 $E_w(kg \cdot s^{-1})$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$E_w = \frac{Q}{v} (W_o' - W_o) \quad (4)$$

여기서, W_o 는 실외 습도비($kg \cdot kg^{-1}$), W_o' 은 패드시스템을 통과한 공기의 습도비이다.

3) 차광환기 포그시스템

차광환기 포그시스템은 포그시스템에 차광환기시스템을 결합한 형태로서 열평형식은 차광환기시스템의 열평형식에 실내에 분무된 물의 증발에 의한 잠열손실항이 추가되어 식(5)와 같이 되며, 이 때의 수분평형식은 식(6)으로 표현 할 수 있다.

$$\alpha I_s A_f - \left(U A_c + \frac{Q C_p}{v} \right) (T_i - T_o) - \lambda M = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\beta I_s A_f}{\lambda} + M - \frac{Q}{v} (W_i - W_o) = 0 \quad (6)$$

$$\beta = (E)(\tau)(1 - r_s) \quad (7)$$

여기서, M은 포그노즐의 분무량($kg \cdot s^{-1}$), λ 는 수분 증발잠열($2.5 \times 10^6 J \cdot kg^{-1}$), W_i 는 실내 습도비($kg \cdot kg^{-1}$; 목표 온도 및 상대습도로부터 계산), W_o 는 실외 습도비($kg \cdot kg^{-1}$; 설계용 기상자료로 제공 또는 건습구 온도로부터 계산)이다.

한편 식(5)와 식(6)을 연립으로 풀면 포그시스템의 필요환기량과 필요수량은 다음식으로 구할 수 있다. 공급수량은 필요수량을 증발효율로 나누면 된다.

$$Q = v \frac{(\alpha + \beta) I_s A_f - U A_c (T_i - T_o)}{C_p (T_i - T_o) + \lambda (W_i - W_o)} \quad (8)$$

$$M = \frac{Q}{v} (W_i - W_o) - \frac{\beta I_s A_f}{\lambda} \quad (9)$$

2. 열평형 모델의 검증 및 보정

1) 차광환기시스템의 열평형식 검증 실험

실험은 충북 음성에 위치한 길이 80 m, 면적 1600 m^2 인 이치형 3연동 온실(Fig. 1)에서 2000년 5월중에 실시하였다. 실내의 온습도는 HOB0 data logger (Onset computer co.)를 사용하여 계측하였으며, 실내 온도는 6개 측정(각동의 중앙단면의 1.3 m, 2.3 m 높이)에서 각각 측정하여 평균값을 취하였다. 실내의 일사량은 LI200X pyranometer(Campbell scientific Inc.)를 이용하여 측정하였다. 모든 환기창의 중앙단면에 1점씩 일방향 Air velocity transmitter(Dwyer instru-

온실의 환기 및 냉방 설계를 위한 열평형 모델의 적용

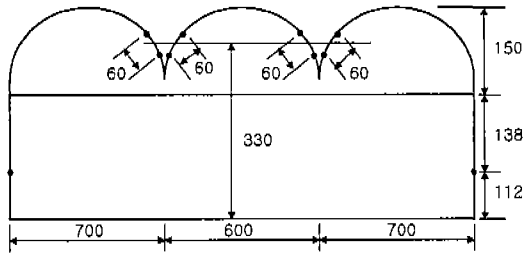


Fig. 1. Dimension of experimental greenhouse and opening widths of roof and side vents (unit : cm).

ments Inc.)를 수직방향으로 설치하여 환기창의 단면수직 풍속을 계측하였다. 재배작물은 포도(본엽 4~5매)였으며 환기량의 표준오차가 최소로 되는 E 값을 추정하였다. 모델의 검증은 실내외 온습도와 일사량으로부터 모델에 의하여 환기량을 계산하고 실측치와 비교하였다. 환기량의 실측치는 환기창 단면 수직 풍속 측정치로부터 환산($Q = AV$)하였다.

2) 차광환기 포그시스템의 모델 검증 및 적용

모델 검증을 위한 실험은 포그시스템이 가동중인 폭 6.5 m, 길이 18 m의 단동 유리온실(처마높이 2.5 m, 지붕높이 4.0 m)에서 2000년 8월중에 실시하였다. 각종 계측 방법은 차광환기시스템의 실험과 동일하다. 포그시스템의 분무입자는 3~30 μm 의 범위였으며 12 μm 이하의 분무입자가 91.2%인 노즐이 1 m 간격으로 설치되어 있다. 포그시스템 가동시의 열평형식에 의한 환기량 계산치와 실측치의 비교를 통하여 검증하였으며, 포그시스템의 실제 분무량과 수분평형식에 의한 증발량을 비교하여 증발율을 검토하였다.

또한 개발된 열평형 모델을 적용하여 Table 1과 같은 6가지 조건에 대하여 각각 fan and pad 시스템과 포그시스템의 필요환기량 및 증발수량을 결정하고 비

교하였다.

결과 및 고찰

열평형 모델에서 E 값은 작물의 상태에 따라 달라지는 값이다. 본 실험 결과의 분석에서는 환기량의 표준오차가 최소로 되는 값을 사용하였으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 0.29로 추정되었다. 차광환기시스템의 열평형식을 이용하여 계산한 환기량($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)과 실측치를 비교한 결과 Fig. 3과 같이 비교적 잘 일치하였다 ($r=0.638$, 유의한 $F=1.8 \times 10^{-26}$).

포그시스템 가동시의 실험 온실은 각종 채소를 바닥면적의 40% 정도에 재배하고 있었으며 E 값은 0.25로 추정되었다. Fig. 4는 차광환기 포그시스템의 열평형 모델을 이용하여 계산한 환기량과 포그시스템 가동 온실의 환기량 실측 결과를 비교한 것이다. 환기창 단면 풍속을 1분 간격으로 측정하여 유량으로 환산한 값을 환기량의 실측치로 하였기 때문에 큰 차이를 보이는 부분이 일부 있으나, 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다.

한편, 포그시스템의 실제 분무량과 수분평형식에 의해 구한 증발량을 비교하여 증발율을 검토해 보았다. 실험온실은 자연환기 상태에서 분무량 1.57 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 인 노즐 32개를 설치하여 40초 분무, 1분 30초 정지를 반복하도록 타이머로 세팅되어 있다. 증발율은 최소 21.3%, 최대 96.1%, 평균 54.4%로 나타났으며, 포그 냉방을 실시한 10시~16시 사이의 실내평균기온은 34.5°C, 평균습도는 62.6%로 증발효율(냉방효율)이 그다지 좋지 못했다.

환기 및 냉방설비의 용량을 결정하기 위한 열평형 모델의 입력변수중 설계자가 값을 선택해야 할 주요

Table 1. Design conditions for application of heat balance model.

| Case | Outside weather data for design | | | | Inside air temperature (°C) |
|------|----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | Solar radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | Dry bulb temperature (°C) | Wet bulb temperature (°C) | Relative humidity (%) | |
| 1 | 900 | 33 | 26 | 57.7 | 32 |
| 2 | 900 | 35 | 26 | 49.3 | 32 |
| 3 | 900 | 35 | 27 | 54.1 | 32 |
| 4 | 1,000 | 33 | 26 | 57.7 | 32 |
| 5 | 1,000 | 35 | 26 | 49.3 | 32 |
| 6 | 1,000 | 35 | 27 | 54.1 | 32 |

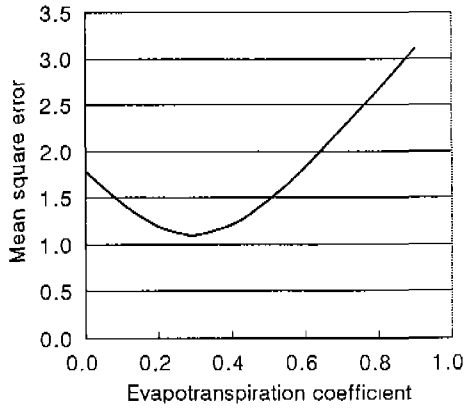


Fig. 2. Change in mean square error of ventilation rate($m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$) with evapotranspiration coefficient.

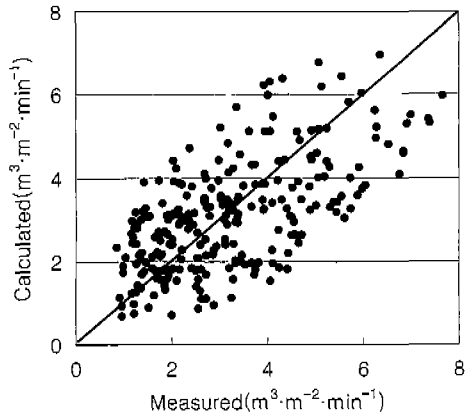


Fig. 3. Comparison of calculated and measured ventilation rates.

매개변수는 피복재의 열관류율(U)과 태양복사에 대하여 작물의 증발산에 의해 잠열형태로 소비되는 에너지

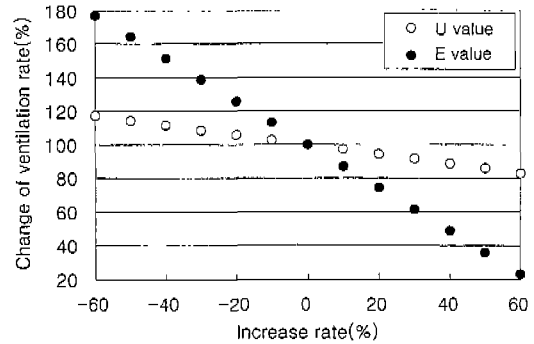


Fig. 5. Changes in required ventilation rate for the increase in U and E value from its base value.

의 비율(E)이다. 이들 매개변수가 필요 환기량에 미치는 영향을 평가하기 위해서 각각의 매개변수 값을 기본값($U=6.5 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$, $E=0.5$)에 대하여 $\pm 60\%$ 범위에서 변화시키면서 시뮬레이션을 실시하였으며, Fig. 5는 각 매개변수의 증가율에 따른 필요환기량의 변화를 나타낸 것이다. U값이 1% 증가할 때 필요환기량은 0.3% 감소하는 것으로 나타났으며, E값이 1% 증가할 때 필요환기량은 1.3%나 감소하는 것으로 나타나 E 값의 선택이 매우 중요함을 알 수 있다. 따라서 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 E 값의 변화를 실측한 자료의 축적이 필요할 것으로 판단된다.

Table 2는 온실의 환기 및 냉방 설계시 설비 용량 결정을 위한 열평형 모델의 적용성을 검토하기 위하여 6가지 조건의 외부기상자료에 대하여 실내 목표온도를 $32^\circ C$ 로 유지하는데 필요한 단위면적당 환기율과 증발수량을 구해본 결과이다. 설계조건은

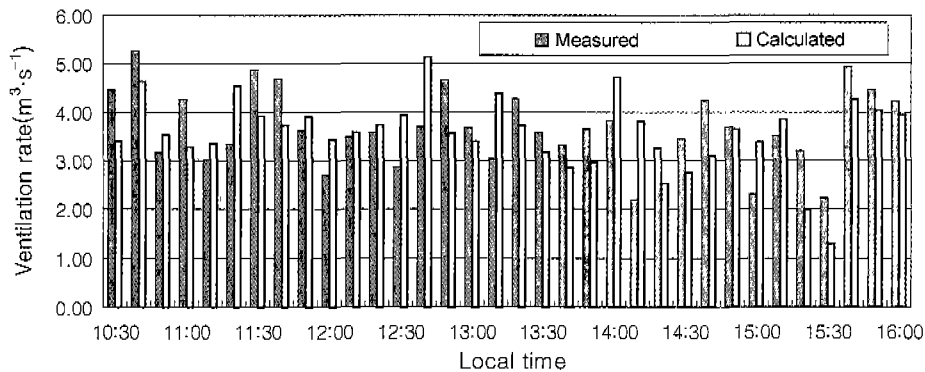


Fig. 4. Comparison of calculated and measured ventilation rates in the greenhouse with a fog system operated(Aug. 14, 2000).

Table 2. Comparison of ventilation rate and evaporating water requirement for various design conditions between fan and pad and fog systems.

| Case | Inside humidity (%) | Fan and pad system | | Fog system | |
|------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| | | Ventilation rate ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) | Evaporating water ($\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) | Ventilation rate ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) | Evaporating water ($\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) |
| 1 | 71.9 | 3.09 | 8.82 | 2.91 | 8.22 |
| 2 | 71.1 | 3.51 | 12.89 | 3.27 | 11.84 |
| 3 | 75.2 | 4.29 | 14.08 | 3.96 | 12.77 |
| 4 | 71.9 | 3.42 | 9.77 | 3.24 | 9.10 |
| 5 | 71.2 | 3.87 | 14.18 | 3.60 | 13.02 |
| 6 | 75.2 | 4.74 | 15.49 | 4.38 | 14.05 |

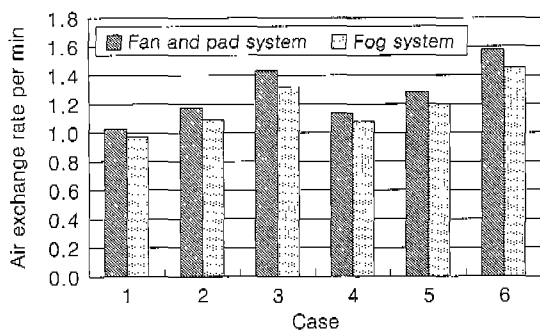


Fig. 6. Comparison of air exchange requirement between fan and pad and fog systems.

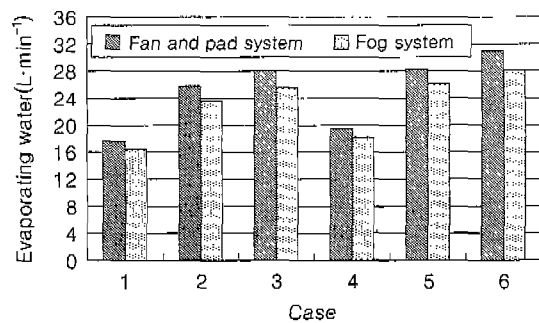


Fig. 7. Comparison of evaporating water requirement between fan and pad and fog systems.

2,000 m^2 (평균높이 3.0 m, 피복면적 3,000 m^2)의 플라스틱 온실(열관류율 6.8 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$, 광투과율 0.88)에 E=0.3, 차광율 50%로 설정하였다. 일사량 900 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 온도 35 $^{\circ}\text{C}$, 습도 49.3%의 외부기상조건에서 실내온도를 32 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지하기 위해서는 fan and pad 시스템에서 4.29 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 환기율과 14.08 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 증발수량이 필요하고, 포그시스템에서는 환기율 3.96 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, 증발수량 12.77 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 가 필요한 것으로 나타났다. fan and pad 시스템을 가동할 경우의 실내습도는 71.1~75.2%로 예측되었으며, 포그시스템에서는 이와 동일한 조건의 습도에 해당되는 실내습도비를 입력자료로 사용하였다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 fan and pad 시스템 및 포그 시스템 설계온실의 외부기상조건에 따른 필요 공기교환율과 증발수량을 비교한 것이다. 동일한 조건하에서 필요 공기교환율은 5.1~7.7%정도, 증발수량은 6.8~9.3%정도 fan and pad 시스템이 포그시스템에 비하여 큰 것으로 나타났다.

Literature cited

1. ASAE. 1997. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASAE standards.
2. Choi, H.L. 1989. Ventilation of agricultural structures. Daegwang Pub., Seoul. p.323-344 (in Korean).
3. Japan Greenhouse Horticulture Association. 1994. Handbook of greenhouse horticulture. Horticultural information center. p.198-224 (in Japanese).
4. Kim, M.K., S.K. Lee, S.J. Chung, K.H. Ryu, W.M. Suh, Y.C. Yoon, J.E. Son, H.W. Lee and S.W. Nam. 1997. Design standards for greenhouse environment. Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation. p.221-250 (in Korean).
5. Mihara, Y. 1980. Basic theory and practice of greenhouse design. Youkasiko Pub., Tokyo. p.160-169 (in Japanese).
6. Nam, S.W. 1996. Actual state and development strategies on greenhouse cooling technology. The Korea Society for Hightech Agricultural Facilities. Theses Collection Vol. 3:57-88 (in Korean).
7. Nam, S.W., M.K. Kim and J.E. Son. 1996. Nutrient solution cooling and its effect on temperature of leaf lettuce in hydroponic system. Acta Horticulturae

남 상 운

- 440:227-232.
- Nam, S.W. 1998. Adaptability of evaporative cooling system for greenhouses to the weather conditions of Korea. J. Bio-Env. Con. 7(4):283-289 (in Korean).
 - Nam, S.W. 2000. Actual utilization and thermal environment of greenhouses according to several cooling methods during summer season. J. Bio-Env. Con. 9(1):1-10 (in Korean).
 - Tachibana, K., K. Hanekura, K. Takahashi and E. Ohtsuka. 1979. Design and construction of greenhouses for protected horticulture. Ohm Pub., Tokyo. p.91-149 (in Japanese).
 - Whitaker, J.H. 1979. Agricultural buildings and structures. Reston Publishing Company. p.432-456.
 - Woo, Y.H., Y.I. Nam, C.H. Song, H.J. Kim and D.E. Kiml. 1994. Studies on management of effective temperature and humidity in greenhouse at summer season. J. Bio-Env. Con. 3(1):58-65 (in Korean).

온실의 환기 및 냉방 설계를 위한 열평형 모델의 적용

남 상 운

충남대학교 농공학과

적 요

여름철 고온기에 시설 이용율을 높이고 안정적인 생산을 하기 위해서는 고온 극복 시스템의 도입이 필요하며, 이러한 시스템을 도입하기 위하여는 적정 설비용량의 결정이 중요하다. 온실의 고온극복방법을 차광환기시스템, 차광환기 패드시스템, 차광환기 포그시스템으로 설정하고, 각 방법별로 시스템의 설계제원 결정을 위한 열평형식을 구성하였으며 현장 실험을 통하여 적용성을 검토하였다. 환기창 단면 풍속을 1분 간격으로 측정하여 유량으로 환산한 값을 환기량의 실측치로 하고 열평형식을 이용하여 계산한 환기량과 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 열평형 모델의 입력변수중 피복재의 열관류율이 1% 증가하면 필요환기량은 0.3% 감소하였고, 태양복사에 대한 증발산비(E)의 값이 1% 증가하면 필요환기량은 1.3%나 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, E 값의 선택이 매우 중요하며 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 E값의 변화를 실측한 자료의 축적을 통해 가이드라인이 제시되어야 할 것으로 판단된다. 온실의 환기 및 냉방 설비 용량 결정을 위한 열평형 모델의 적용성을 검토하기 위하여 6가지의 동일한 조건에 대하여 시뮬레이션한 결과, 필요 공기교환율은 5.1~7.7%정도, 증발수량은 6.8~9.3%정도 fan and pad 시스템이 포그시스템에 비하여 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 온실설계, 냉방, 환기, 열평형 모델