

水耕溫室의 養液 冷却負荷 豫測모델 開發

南相運 · 金文基 · 孫禎翼

서울대학교 農業生命科學大學 農工學科

Development of a Numerical Model for Prediction of the Cooling Load of Nutrient Solution in Hydroponic Greenhouse

Nam, Sang-Woon · Kim, Moon-Ki · Son, Jung-Eek

Dept. of Agr. Eng., Coll. of Agr. & Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744

Summary

Cooling of nutrient solution is essential to improve the growth environment of crops in hydroponic culture during summer season in Korea. This study was carried out to provide fundamental data for development of the cooling system satisfying the required cooling load of nutrient solution in hydroponic greenhouse.

A numerical model for prediction of the cooling load of nutrient solution in hydroponic greenhouse was developed, and the results by the model showed good agreements with those by experiments.

Main factors effecting on cooling load were solar radiation and air temperature in weather data, and conductivity of planting board and area ratio of bed to floor in greenhouse parameters.

Using the model developed, the design cooling load of nutrient solution in hydroponic greenhouse of 1,000m²(300pyong) was predicted to be 95,000 kJ/hr in Suwon and the vicinity.

키 워 드 : 양액냉각, 냉각부하, 수치모델, 수경온실, 열 및 물질평형

Key words : cooling of nutrient solution, cooling load, numerical model, hydroponic greenhouse, heat and mass balance

서 론

여름철 온실의 수경재배시 작물의 생육환경을 개선해 주기 위해서 양액의 냉각은 필수적이다. 수경재배의 경우 여름철 고온기의 액온은 29.5~32.7°C까지 상승하는 것으로 관측되고 있다^{10,20)}.

이와같이 높은 액온은 양액중의 용존산소량을 급격히 저하시켜 생육억제작용이 크며, 뿌리의 병원균에 대한 침입저항도 감소하므로, 25°C 정도를 고온 한계온도로 설정하여 냉각을 실시하는 것이 합리적인 것으로 보고되어 있다²⁴⁾.

이와같은 양액 냉각을 적절히 실행하기 위해서

는 먼저 시설내의 환경예측에 의한 양액의 냉각부하 산정 및 냉각부하에 따른 설비용량 결정이 필요하다. 온실의 열적환경에 관한 모델은 1963년 Businger가 처음으로 온실의 환경변화를 이론적으로 모형화한 이후 수많은 이론적 모델들이 개발되고 그 타당성이 입증되었다. 그러나 이들은 주로 시설원에 재배시의 열손실을 줄이고, 보온효과를 증진시켜 투입에너지를 감소시키려는 의도에서 시도되었으며 대부분 무가온 또는 난방 온실을 대상으로 하고 있다^{6, 22)}.

난방에 비하여 냉방을 대상으로 하는 온실 모델은 극히 일부분에 지나지 않는다. Mahrer와 Flaherty⁹⁾는 에너지 평형식을 이용하여 온실의 열적환경을 예측할 수 있는 모형을 만들어 증발냉각 시스템의 효과를 분석하였다. Van Bavel 등¹⁶⁾은 모델을 이용하여 유리온실에서의 증발냉각 및 지붕에 지하수를 흘릴때의 효과를 분석하였다. Quan과 Takakura¹²⁾는 냉방온실을 대상으로 한 모델을 개발하여 야간냉방온실의 설계용 냉방부하를 구하고, 관류열율, 間隙換氣전열계수, 지중전열량등을 분석하여 냉방부하 감감대책을 고찰하였다.

이와같이 온실의 모델에 관련된 많은 연구에도 불구하고, 수경재배를 대상으로 하는 모델은 찾아보기 어렵다. 토경재배의 경우는 근권부 환경이 地中이므로 온실모델에서 별도로 취급하지 않고 있으나 수경재배의 경우 배드를 흐르고 있는 양액과 접하고 있으므로 전열특성이 매우 다르다. 더우기 양액의 냉각부하를 구하기 위해서 기존의 온실모델을 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 수경재배 양액시스템의 근권부 환경을 고려한 새로운 온실 모델의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수경온실의 환경예측 및 여름철 고온기 수경재배 작물의 생육환경개선을 위한 양액냉각 시스템 개발에 기초자료를 제공할 목적으로 양액냉각부하 산정용 數値모델을 개발하고 실험을 통하여 타당성을 검증하였으며, 개발된 모델을 이용하여 설계용 양액냉각부하를 산정해 보았다.

양액냉각부하 예측모델

1. 모델의 개요

Fig. 1에 수경온실의 열전달 과정을 표시한 概要圖를 나타내었다. 온실 지표면 위에 배드를 설치한 담액 수경온실내의 열적환경을 피복재, 내부 공기, 작물, 양액, 정식판 및 토양층으로 나누어 熱 및 物質平衡式을 구성하였으며, 일부 수정에 의하여 NFT(nutrient film technique)방식이나 벤치를 설치한 경우에도 적용할 수 있도록 하였다.

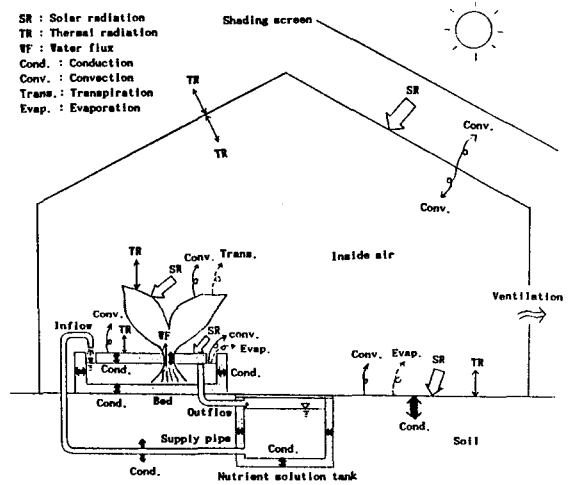


Fig. 1. Schematic illustration of the heat and mass flow in hydroponic greenhouse.

1) 수경온실의 열 및 물질평형식의 구성

여름철 주간에는 피복재에 水分凝縮 현상이 발생되지 않고, 본 모델은 주간의 양액 냉각부하 산정이 목적이므로 수분응축은 무시하였다. 피복재의 열평형방정식은 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$C_c V_c \frac{d\theta_c}{dt} = QS_c + QH_{oc} + QH_{ac} + QR_{pc} + QR_{fc} + QR_{sc} - QR_{cc} \quad (1)$$

실내공기의 열평형식은 식(2), 수분평형식은 식(3)과 같다.

$$C_a V_a \frac{d\theta_a}{dt} = QH_{pa} + QH_{ca} + QH_{fa} + QH_{ga} + QH_{na} - QV - \lambda ET_n \quad (2)$$

$$\rho_a V_a \frac{dW_a}{dt} = \rho_a \cdot Ven(W_o - W_a) + ET_n + ET_p + ET_g \quad (3)$$

여기서, λ 는 水分潛熱(kJ/kg), ρ 는 밀도(kg/m³)이다.

작물의 열평형식은 식(4)와 같다.

$$C_p V_p \frac{d\theta_p}{dt} = QS_p + QH_{ap} + QR_{cp} + QR_{fp} - QR_{ps} - \lambda ET_p - Q_{ET} - QC_{pm} \quad (4)$$

여기서, Q_{ET} 는 蒸散流의 흐름에 의한 양액과 작물간의 열교환량(kJ/hr)이다.

양액은 탱크와 베드를 연속적으로 순환하고 있으므로 수경베드, 양액탱크 및 급액파이프의 3개 부위로 나누어 열평형식을 구성하였다.

$$C_n V_n \frac{d\theta_n}{dt} = QF_n + QC_{pn} + QH_{an} + QC_{fn} + QC_{bn} + QC_{un} - Q_{cool} \quad (5)$$

$$C_n V_{nt} \frac{d\theta_{nt}}{dt} = QF_{nt} + QC_{nt} \quad (6)$$

$$C_n V_{np} \frac{d\theta_{np}}{dt} = QF_{np} + QC_{np} \quad (7)$$

정식판은 일반적으로 단열재인 스티로폼을 많이 사용하고 있다. 정식판은 양액의 수면과 접하고 있는 것으로 간주하여 정식판 표면으로부터 양액으로 열전도가 이루어진다고 가정하였으며, 정식판의 표면으로부터 두께 1mm를 표면층으로 가정하였다.

$$C_n V_f \frac{d\theta_f}{dt} = QS_f + QH_{af} + QR_{cf} + QR_{pf} - QR_{fs} - QC_{fn} \quad (8)$$

온실 토양층에서의 열흐름은 3차원 열전도이지만 실제 수평방향의 열흐름은 수직방향 열흐름의 약 1% 정도로 보고되어 있다¹⁴⁾. 따라서 온실 토양층에서의 열흐름은 수직방향의 열전달만을 고려하였다. 또한 7~8월에 地中 60cm 이상의 깊이에서는

지온의 일변화가 거의 없는 것으로 관측되고²⁵⁾ 있어서 60cm 깊이를 境界層으로 온실 토양층을 5개 층으로 나누었으며, 지표면 및 각층(i)사이의 열평형식을 유도하면 식(9) 및 식(10)과 같다.

$$C_g V_g \frac{d\theta_g}{dt} = QS_g - QR_g - QR_{gs} - QH_{gs} - \lambda ET_g + QC_{bn} + QC_{agl} \quad (9)$$

$$C_g V_{g(i)} \frac{d\theta_{g(i)}}{dt} = QC_{g(i-1)g(i)} - QC_{g(i)g(i+1)} \quad (10)$$

식(1)에서 식(10)까지의 열평형식을 구성하는 주요 인자들은 다음과 같은 방법으로 구하였다. 온실내의 일사량 부분은 태양과 지구의 위치 관계와 대기의 透過特性으로부터 이론적으로 구한 일사량에 대하여 온실의 기하학적 특징 및 피복재의 특성을 고려하여 예측하는 방법을 적용하였다¹⁷⁾.

온실내부공기와 피복재 내면, 지표면, 정식판 표면과의 대류열전달계수 $h(kJ/m^2hr^\circ C)$ 는 식(11), 작물과 내부공기는 식(12), 피복재와 외부공기는 식(13)을 적용하였다^{1, 2, 22)}.

$$h_{ia} = 5.472 | \theta_i - \theta_{ai} |^{\frac{1}{3}} + 18.72 \left(\frac{U_m}{L_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$h_{pa} = 6.84 \left(\frac{|\theta_p - \theta_{ai}|}{L_p} \right)^{\frac{1}{4}} + 18.72 \left(\frac{U_p}{L_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$h_{co} = 10.08 + 10.8 U \quad (13)$$

여기서, U_m 은 온실내부풍속(m/s), U 는 외부풍속(m/s), L_i 는 i면의 특성길이, i 는 피복재 내면, 지표면 및 정식판 표면을 의미한다.

정식판 틈사이의 자유수면의 대류열전달계수는 풍속이 없는 것으로 간주하여 식(11)을 적용하였고, 급액파이프의 열관류계수는 水蓄熱式 地中熱交換 시스템의 PVC파이프에 대한 실험결과인 40 kJ/m²hr^{°C}를 적용하였다¹¹⁾.

작물의 증산속도, 토양면 증발속도 및 양액 수면의 증발속도는 각각 내부 공기와의 比濕差와 水蒸氣擴散抵抗의 함수로 표현된다. 이때 각 부분별 수증기확산저항(R_i)은 식(14)에 의하여 구하였다.

$$R_i = \frac{\rho_a C_a}{h_{ia}} Le^{0.67} + R_s \quad (14)$$

식(14)의 우변 첫째항은 각 부분의 경계층저항

을 나타내고, 둘째항은 부분별 특징을 내포한 수증기확산저항치로서 작물의 경우 다음 식(15)와 같이 표현되는 엽내의 氣孔抵抗을 나타낸다¹⁹⁾.

$$R_s = \frac{d_{st} + r_{st}}{d_n A_{st}} \quad (15)$$

여기서, D_s 는 수증기확산계수(m^2/hr), d_{st} , r_{st} 는 기공의 깊이(m) 및 반경(m), nA_{st} 는 단위 엽면적당 기공의 有效開度面積(m^2)이다. 지표면의 경우는 일사강도 등에 따라서 결정되는 수분확산저항으로, 주간 0.05, 야간 0.83hr/m로 하여 일출에서 일몰까지 일사강도에 따른 곡선으로 유도하여 적용하였으며^{2, 7)}, 정식판 틈사이 양액수면의 수증기확산저항에서는 무시하였다.

온실 각 부분과 天空과의 복사열교환은 외기온으로부터 유도된 식(16)의 천공등가온도를 적용하여 구하였으며, 피복재와 온실내부 각 면사이의 복사열교환은 동심원통에서의 열교환해법에 의하여 구하였다^{1, 22)}.

$$T_{sky} = 0.0552T_o^{1.5} \quad (16)$$

여기서, T_{sky} 는 天空等價溫度(K), T_o 는 외기온(K)이다.

온실 피복재에 흡수되는 일사량은 외부에서 흡수되는 양과 투과된 일사량중 온실내부로부터 반사되어 흡수되는 양, 온실내 각 부분의 일사흡수량은 실내일사량과 피복재의 반사일사량 등 1차 반사까지를 고려하였다.

양액의 냉각부하량은 배드내의 양액온도가 냉각설정 온도보다 상승했을 경우에 양액의 열량 증가율로부터 식(17)에 의하여 구하였다.

$$Q_{cool} = \begin{cases} C_n V_n (\theta_n - \theta_{cool}) & (\theta_n > \theta_{cool}) \\ 0 & (\theta_n \leq \theta_{cool}) \end{cases} \quad (17)$$

여기서, θ_{cool} 은 냉각설정 온도($^{\circ}C$)이다.

2) 시뮬레이션 모델의 구축

앞에서 유도된 수경재배 온실의 열 및 물질 평형 방정식을 해석하기 위하여 CSMP(Continuous System Modeling Program)의 PC 버전인 PCSMP를 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. PCSMP는 FORTRAN언어의 서브루틴을 사용할 수 있기 때문에 양액 냉각부하 산정부분과 일사량

서브모델은 FORTRAN으로 작성하였다. 모든 미분방정식은 Runge-Kutta method로 해석하고, 적분은 Simpson method로 수행되도록 하였다.

2. 모델의 검증

1) 모델 검증을 위한 실험

모델의 타당성 검증을 위하여 Table 1의 제원을 갖는 공시온실에 담액 수경재배 시스템을 설치하여 환경요인의 변화를 실측하였다. 공시작물은 적축면상추로 93년 4월24일에 파종하여 5월26일 정식하였고, 배양액 조성은 원시처방에 의하였다²¹⁾.

Table 1. Input data of the experimental hydroponic greenhouse for validating the simulation model.

Greenhouse	
Latitude	37.27 deg.
Longitude	126.98 deg.
Direction	East-West
Width	3.0 m
Length	4.0 m
Eaves height	1.5 m
Ridge height	2.1 m
Window area of side wall	4.0 m ²
Covering	
PE film(thickness)	0.05 mm
Index of refraction	1.526
Coefficient of extinction	0.0441
Transmissivity of diffusion radiation	0.55
Absorptivity of diffusion radiation	0.12
Transmissivity of long wave radiation	0.70
Hydroponic system	
Area ratio of bed to floor	0.48
Leaf area index	2.0
Bottom and wall thickness of bed (styrofoam)	5.0 cm
Planting board thickness (styrofoam)	2.0 cm
Depth of nutrient solution in bed	4.0 cm
Capacity of nutrient solution tank (1mm steel plate+5cm styrofoam)	0.16m ³
Flow rate of nutrient solution	0.16m ³ /hr
Supply pipe of nutrient solution (PVC)	
Length	4.0 m
Inside diameter	16.0 mm

측정항목은 온실내부의 건구온도, 습구온도, 수경베드내 액은 6점, 양액탱크내 액은 3점, 정식판 표면온도 2점, 온실피복재온도 2점, 온실 지표면 및 지중온도 4점, 작물체온 6점, 지하수 냉각 튜브의 입구 및 출구온도를 0.3mm T형 열전대로, 실내 일사량을 전천일사계로 측정하였으며 데이터는 기록계(Hybrid 2300, Yokogawa)로 10분간격으로 기록하였다. 온실내부 및 환기창의 풍속을 열선풍속계로 측정하였으며, 온실외부의 기상자료는 실험장소로부터 약 500m 떨어진 수원기상대의 관측자료를 이용하였다.

2) 모델의 검증 결과

본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 수경온실의 환경요인 예측 및 양액냉각부하 예측에 대하여 타당성 검증을 실시하였다.

먼저, 수경재배 온실내부 환경요인의 실측치를 모델에 의한 예측치와 비교하였다. Fig. 2는 이들

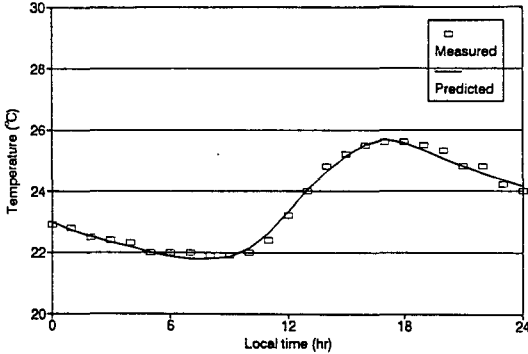


Fig. 2. Measured and predicted temperatures of nutrient solution(Jun. 17, 1993).

중의 한 예로서 양액온도의 실측치와 모델에 의한 예측치를 비교하여 나타낸 것이고, Table 2는 모델에 의한 수경온실의 실내환경요인의 예측결과와 실측치 사이의 관계를 분석한 것으로서 RMS(root mean square)오차는 0.13~1.46°C의 범위를 보였다.

모델에 의한 냉각부하 예측의 타당성을 검증하기 위하여 모델에서 양액온도를 기지조건으로 했을때의 냉각부하 계산 결과와 양액냉각 튜브내의

지하수 온도차에 의한 냉각부하 실측 결과를 비교하였다.

Fig. 3은 냉각부하의 실측치와 모델에 의한 예측

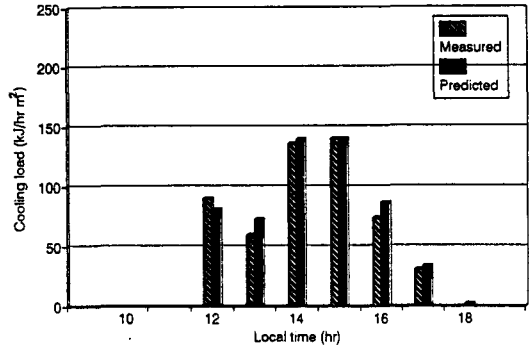


Fig. 3. Measured and predicted cooling loads of nutrient solution in the hydroponic greenhouse(Jun. 23, 1993).

치를 비교하여 나타낸 것이고, Table 3은 이들의 오차를 분석한 결과이다. 최대냉각부하는 1.1~11.3%, 1일 총냉각부하는 2.2~7.7%의 상대오차를 보이고 있으며, 매시간별 냉각부하 예측치의 RMS 오차는 6.8~19.9kJ/hr m²로 비교적 정확하게 예측하고 있는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면 본 시뮬레이션 모델은 실측치와 예측치가 잘 일치하여 타당성이 입증되었으며, 이를 이용하여 외적 환경요인의 변화에 따른 수경온실의 열적환경의 변화를 예측할 수 있고, 양액의 냉각부하 산정에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

설계용 양액냉각부하 산정에 및 고찰

1. 양액냉각부하에 미치는 주요인자

외부 기상자료 및 수경재배시스템의 주요 매개변수들이 수경온실의 양액냉각부하에 미치는 영향을 비교해 보았다.

Table 2. RMS errors between measured and predicted environmental factors.

Factors	Shading(93/6/16)		No-shading(93/6/17)	
	R ²	RMS	R ²	RMS
Inside air temp.	0.954	0.95°C	0.964	0.84°C
Nutrient solution temp.	0.886	0.27°C	0.991	0.13°C
Planting board temp.	0.941	0.79°C	0.953	1.12°C
Soil surface temp.	0.861	1.10°C	0.935	1.46°C
Plant temp.	0.950	0.79°C	0.956	1.16°C
Inside solar radiation	0.928	88.4kJ/m ²	0.965	169.8kJ/m ²

Table 3. Relative and RMS errors between measured and predicted cooling loads.

Date	Maximum cooling load			Daily cooling load			RMS error (kJ/hr/m ²)
	Measured	Predicted	Error(%)	Measured	Predicted	Error(%)	
93/6/18	144.7	128.4	11.3	536.9	548.6	2.2	19.9
19	92.8	85.0	8.4	221.6	205.3	7.4	6.8
21	83.8	79.4	5.3	310.6	299.8	3.5	7.7
23	141.6	140.2	1.1	532.4	558.2	4.8	8.2
26	157.1	162.3	3.3	702.1	734.0	4.5	7.1

1) 기상자료

본 시뮬레이션 모델에 입력자료로 쓰이는 기상 자료는 외기의 건구온도, 절대습도, 수평면일사량, 풍속 및 토양경계층의 지중온도이다. 이들 기상요소들이 독립적으로 부하에 영향을 미치는 것은 아니지만, 각각의 상대적인 영향정도를 검토함으로써 설계용 기상자료의 작성시 고려하기 위하여 다른 기상요소들은 평균적인 상태값을 취하고 1개의 기상요소만을 변화시키면서 냉각부하의 변화를 시뮬레이션 하였다. Fig. 4는 냉각설정온도를 25°C로 한 경우의 1일 일사량, 최고기온, 평균절대습도, 평균풍속 및 지중 0.6m의 토양온도의 변화에 대한 최대냉각 부하 예측치의 변화를 각각 보인 것이다.

대체로 일사량과 기온, 풍속의 영향이 크고, 습도 및 토양경계층 온도의 영향은 작게 나타났다. 냉각부하는 일사량 및 기온과 직선적인 관계를 보이고 있으며, 일사량에 의한 냉각부하 증가가 좀 더 큰것으로 판단되었다. 풍속에 따른 냉각부하의

변화는 곡선적으로 나타났으며, 저풍속에서 변화율이 심하게 나타났다. 본 시뮬레이션의 결과는 측창에 의한 자연환기만을 고려한 것이므로 부하에 미치는 풍속의 영향이 크게 나타났지만, 강제 환기를 실시할 경우에는 외부풍속의 변화에 따른 냉각부하의 변화는 크지 않을 것으로 판단되며, 실제 냉각부하의 변화에 관여하는 인자는 외부풍속 보다는 환기율이라고 생각한다.

2) 수경재배 시스템의 매개변수

수경재배 시스템의 주요 媒介變數가 양액의 냉각부하에 미치는 영향을 평가하기 위해서 앞절의 모델 검증에 사용한 매개변수 값을 기초로 하여 각각의 매개변수 값을 20% 범위에서 변화시키면서 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 4는 선정된 주요 매개변수에 대하여 시뮬레이션 결과로 부터 계산한 매개변수 값 1%의 증가에 대한 최대냉각부하 및 1%의 증가에 대한 최대냉각부하 및 1일 냉각부하의 변화율을 나타낸 것이다.

양액의 냉각부하에 가장 큰 영향을 미치는 매개 변수는 정식판의 열전도율로 나타났다. 다음으로 는 온실면적에 대한 베드면적 비율, 양액탱크용량, 베드내 양액의 수심, 정식판의 일사흡수율, 베드 바닥재료의 열전도율 등이 부하에 큰 영향을 미치는 인자로 판명되었다.

따라서 수경재배시스템의 설계시 양액 냉각부하가 적도록 하기 위해서는 이들 인자들을 고려할 필요가 있으며, 또한 모델을 통한 설계용 양액 냉각부하 산정시에는 이들 매개변수에 대하여는 정확한 값을 입력하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

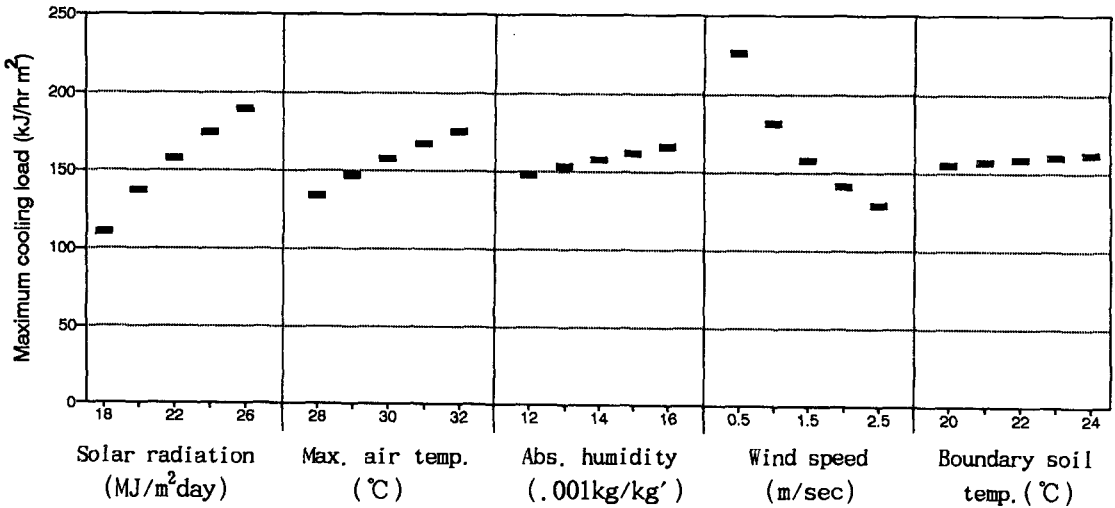


Fig. 4. Relations between maximum cooling load and various weather data.

Table 4. The sensitivities of maximum and daily cooling loads to the 1% increase of each greenhouse parameter.

Parameter	Base value	Unit	Change of cooling load	
			Maximum	Daily
Leaf area index	2.0		-0.209	-0.246
Conductivity of bed	0.181	$\text{kJ/hr m}^\circ\text{C}$	0.247	0.334
Conductivity of solution tank	2.0	"	-0.011	-0.021
Conductivity of planting board	0.181	"	0.603	0.571
Conductivity of bed wall	0.181	"	0.057	0.061
Conductivity of plant	2.054	"	0.076	0.091
Solar radiation absorptivity of planting board	0.5		0.298	0.287
Emissivity of planting board	0.85		-0.021	-0.018
Thermal radiation transmissivity of cover	0.70		-0.115	-0.159
Soil wetness factor	0.8		-0.102	-0.176
Solution depth in bed	4.0	cm	-0.297	-0.558
Volume ratio of nutrient solution in tank to bed	0.8		-0.345	-0.372
Circulation rate of nutrient solution in tank	0.8	hr^{-1}	0.086	0.089
Area ratio of bed to floor	0.476		0.431	0.266
Ratio of planting board gap to bed area	0.02		0.010	0.015

Table 5. Design weather data for each risk during summer in Suwon.

Risk (%)	Temperature(°C)			Solar radiation (MJ/m ² day)	Average wind speed (m/sec)
	Mean	Max.	Min.		
0.0	29.9	35.4	25.9	26.75	0.4
2.5	28.6	34.0	24.8	24.14	0.7
5.0	28.3	33.4	24.4	22.98	0.8
7.5	27.8	33.0	24.3	22.01	0.8
10.0	27.7	32.5	24.2	21.41	0.9
12.5	27.4	32.3	24.0	21.04	0.9
15.0	27.2	32.0	23.8	20.52	1.0
17.5	27.0	31.7	23.6	19.68	1.0
20.0	26.7	31.4	23.4	19.28	1.0

2. 설계용 기상자료

냉난방 설계용 부하를 산출하여 공기 등 의 장치용량을 결정하기 위한 기상조건이 설계용 기상자료이다. 설계용 기상조건 의 작성에 있어서는 과거 10~20년간의 기상관측치를 통계분석하지만 통계기간의 최고치, 최저치 등의 極致를 이용하는 것은 아니다. 경제적인 설계를 위해 다소의 危險率을 설정하는 경우가 많다. 위험율이란 설계치를 넘는 확률이며, 기간중에 몇 시간이 설계치를 넘는 경우가 있더라도 그것을 허용하고자 하는 것이다. 그러나 이와 같이 정한 기상조건은 각 기상요소간의 관계가 고려되어 있지 않으므로 기온, 일사량, 습도 등의 모든 항목이 최고치에 가까운 과대한 설계조건을 만들 위험이 있다. 따라서 그중에서 하나에 대해 위험율을 설정하고 현실적으로 있을 법한 기상자료를 작성하는 연구도 하고 있다²³⁾.

일본에서는 일반 건축물의 공조관련 설계용 기상자료는 대부분 標準氣象資料를 기준으로 하고 있다. 그런데 우리나라에는 현재 서울지역만이 표준기상자료가 작성되어 있어서 설계적용에 제한요인이 되고 있다¹⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 표준기상자료를 비롯하여 여러종류의 설계용 기상자료를 작성하여 비교검토하였다.

1) 표준기상자료의 작성

표준기상자료는 일본의 공기조화 위생공학회에

서 제시한 평균적 기상자료의 정리방법을 이용하였다.

수원지방의 1964년부터 1991년까지 28년 자료로부터 7, 8월의 기상이 가장 평균적인 연속 10년의 자료를 각각 추출하고, 이로부터 가장 평균적인 해를 골라 각 월에 대하여 평균 월을 선택한다. 그 결과 7월은 1988년, 8월은 1982년이 평균월로 선택되었다. 즉, 1988년 7월과 1982년 8월의 기상자료가 수원지방의 동적인 열부하 산정을 위한 표준기상자료가 된다.

그런데, 본 연구에서는 설계용 최대냉각부하의 산정이 목적이므로 이들 2개월의 기상자료 가운데 구름의 양이 0으로 관측된 淸明日만을 선택하여 매 시간별로 평균을 취한 기상자료를 냉각부하 산정시의 표준기상자료로 사용하였다.

2) 위험율별 기상자료의 작성

표준기상자료 작성에 사용한 기상자료로 부터 작성한 위험율별 기상조건은 Table 6과 같다. 이들 위험율별 기상조건을 앞에서 작성한 표준기상자료의 변동형에 근사시킨 기상자료를 위험율별 기상자료로 사용하였다. 지중온도와 절대습도는 일변동이 거의 없기 때문에 위험율별 기상자료에서 제외시켰다.

3) 청명일사량의 이론적 계산

지구와 태양사이의 기하학적 위치 및 대기의 투과특성을 고려하여 이론적인 방법으로 일사량을 계산하여, 표준기상자료의 일사량 부분을 대체하여 설계용 기상자료의 비교에 사용하였다.

3. 수경온실의 양액냉각부하

앞절에서 작성한 기상자료를 이용하여 경기도에서 시행한 첨단 수경재배 단지 설계자료중 1000m²(300평) 규모의 수경온실 규격을 적용하여 양액냉각부하를 시뮬레이션 하였다.

표준기상자료, 위험율 5%의 기온을 사용한 표준기상자료, 위험율 5%의 일사량을 사용한 표준기상자료, 모든 항목에 위험율 5%를 적용한 기상자료, 일사와 기온에만 위험율 5%를 적용한 표준기상자료 및 일사량에 계산치를 사용한 표준기상자료를 각각 입력기상자료로 하여 설계용 냉각부하를 계산하였다. 대상 온실의 설정조건은 Table 6과 같다.

Fig. 5는 각 입력 기상자료에 의한 냉각부하 계산결과와 1990에서 1992년까지 3개년 청명일의

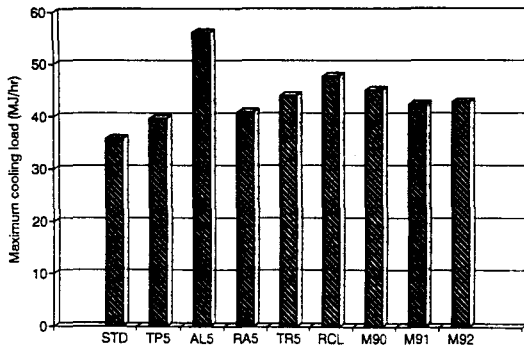


Fig. 5. Maximum cooling loads of nutrient solution for various weather conditions.

Note)

- STD : Standard weather data
- TP5 : Air temperature of 5% risk + STD
- AL5 : All Weather data of 5% risk
- RA5 : Solar radiation of 5% risk + STD
- TR5 : Temperature and radiation of 5% risk + STD
- RCL : Calculated solar radiation + STD
- M90 : Observed weather data in 1990 (average value of clear days)
- M91 : Observed weather data in 1991 (average value of clear days)
- M92 : Observed weather data in 1992 (average value of clear days)

실측 기상자료에 의한 냉각부하 계산결과를 비교한 것이다. 일사량에 계산치를 사용한 표준기상자료와 모든항목에 위험율 5%를 적용한 기상자료를 입력한 경우를 제외하고는 모두 실측치를 입력한 경우보다 최대 냉각부하가 낮게 나타났다. 그러나 모든항목에 위험율 5%를 적용한 경우에는 실측치에 비하여 매우 높게 나타나서 과대설계의 가능성이 있으므로 일사량에 계산치를 사용한 표준기상자료가 설계용 기상자료로 적절할 것으로 판단된다.

Table 6의 설정조건하에서 수원지방 수경온실의 설계용 양액냉각부하는 온실면적 $1,000m^2$ (300평)에 약 95,000kJ/hr 정도로 나타났다.

Table 6. Input data for simulation model to estimate cooling load.

Greenhouse	
Width	2 × 14.0 m
Length	36.0 m
Eaves height	3.1 m
Ridge height	6.0 m
Window area of side wall	57.6 m ²
Covering	
PET film (thickness)	0.12 mm
Hydroponic system	
Area ratio of bed to floor	0.5
Leaf area index	2.5
Capacity of nutrient solution tank (concrete)	2 × 10.0 m ³
Flow rate of nutrient solution	8.0 m ³ /hr
Supply pipe of nutrient solution (PVC)	
Length	40.0 m
Inside diameter	25.0 mm

요약 및 결론

여름철 고온기 수경재배 작물의 생육환경 개선을 위해서 양액의 냉각은 필수적이다. 본 연구는 양액 냉각을 적절히 수행할 수 있는 설비용량의 결정과 그에 따른 냉각시스템의 개발을 위한 기초로서 수경온실의 熱 및 物質平衡 이론에 근거를 둔 양액냉각부하 산정용 數值모델을 개발하고, 개발된 모델을 이용하여 설계용 양액냉각부하를 산정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수경재배 온실의 양액냉각부하 산정을 위하여 시뮬레이션 모델을 개발하였으며 실험을 통하여 온실내 열적환경 변화와 양액 냉각부하를 검증한 결과 실험치와 예측치는 잘 일치하였다.

2. 양액냉각부하에 미치는 주요인자를 분석한 결과 氣象資料로는 일사량과 기온, 온실 媒介變數 중에서는 정식판의 열전도율 및 온실지표면에 대한 수경베드의 면적비율이 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3. 여러종류의 설계용 기상자료를 작성하여 냉각부하를 구하고 실측치와 비교한 결과 일사량에 계산치를 사용한 표준기상자료가 냉각부하 산정을 위한 설계용 기상자료로서 적절한 것으로 판단되었다.

4. 수원지방의 설계용 기상자료를 적용한 결과 1,000m²(300평) 규모의 플라스틱온실에서 설계용 양액냉각부하는 약 95,000kJ/hr로 나타났다.

본 연구에서 개발된 모델은 양액냉각시스템의 설계를 위한 냉각부하 산정에 이용할 수 있을 뿐만 아니라, 외적환경요인의 변화에 따른 수경온실의 열적환경의 변화도 예측할 수 있으므로 기타 수경온실의 환경설계 등에도 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

<기호설명>

C : 용적비열(kJ/m³°C), ET : 증발산량(kg/hr), QC : 전도열전달량(kJ/hr), QF : 양액순환시 유출입 열량(kJ/hr), QH : 대류열전달량(kJ/hr), QR : 복사열전달량(kJ/hr), QS : 일사흡수량(kJ/hr), QV : 환기전열량(kJ/hr), V : 체적(m³), Ven : 환기율(m³/hr), W : 습도비(kg/kg), θ : 온도(°C)

<첨자>

a : 실내공기, b : 수경베드, c : 피복재, f : 정식판, g : 온실지표면, n : 양액, np : 급액파이프, nt : 양액탱크, p : 작물, s : 천공, w : 수경베드벽체

참 고 문 헌

1. Arinze, E.A., G.J. Schoenau and R.W. Besant, 1982. A dynamic solar-assisted greenhouse and thermal storage performance prediction model, ASAE Paper No.82-4564.
2. Chandra, P., L.D. Albright, N.R. Scott, 1981. A time dependent analysis of greenhouse thermal environment, Trans. of the ASAE., 24:442-449.
3. Duncan, G.A., O.J. Loewer and D.G. colliver, 1981. Simulation of energy flows in a greenhouse : Magnitudes and conservation potential, Trans. of the ASAE., 24:1014-1021.
4. Fuller, R.J., C.P. Meyer and P.J.M. Sale, 1987. Validation of a dynamic model for predicting energy use in greenhouses, J. Agric. Engng Res., 38:1-14.
5. Jansen, D.M., Dierkx, R.T., Van Larr, H.H. and Alagos, M.J., 1988. PCSMP on IBM PC-AT's or PC-XT's and compatibles. Simulation Reports CABO-TT, No. 15:pp64.
6. Kano, A. and E.J. Sadler, 1985. Survey of greenhouse models, J. Agr. Met., 41:75-81.
7. Kindelan, M., 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment, Trans. of the ASAE., 23:1232-1239.
8. Kozai, T., Z. Quan, M. Hayashi and I. Watanabe, 1985. Cooling load of a greenhouse (1):Characteristics of cooling load in summer nighttime, J. Agr. Met., 41:121-130.
9. Mahrer, M.J. and O'Flaherty, T., 1973. An analysis of greenhouse climate, J. Agric. Engng Res., 18:197-203.
10. Matsuoka, T. and H. Suhardiyanto, 1992. Thermal and flowing aspects of growing petty tomato in cooled NFT solution during summer, Environ. Control in Biol., 30:119-125.
11. Okano, T. and Y. Yamamoto, 1986. Water thermal storage type solar greenhouse(2): Basic study on an underground thermal storage system, J. Agr. Met., 42:95-101.
12. Quan, Z. and T. Takakura, 1988. Estimation of the seasonal cooling or heating load using a simulation model, J. Agr. Met., 44:187-194.
13. Tachibana, K., 1981. Heat transfer matrix, heating and ventilation of greenhouses, J. Agr. Met., 37:19-27.
14. Takakura, T., K.A. Jordan and L.L. Boyd, 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse, Trans. of the ASAE., 14:964-971.
15. Takakura, T., 1989. Digital dynamic simulation in agricultural sciences, Lab. of Environ. Eng., Dept. of Ag. Eng., Univ. of Tokyo.

16. Van Bavel, C.H.M., Damagnez, J., and Sadler, E.J., 1981. The fluid-roof solar greenhouse: energy budget analysis by simulation, Agric. Meteor., 23:61-76.
17. 고학균, 김문기, 김용현, 1989. 플라스틱하우스의 직달 및 산란일사량 해석, 태양에너지 9: 13-24.
18. 공기조화·냉동공학회, 1991. 서울 표준기상데이터.
19. 남상운, 김문기, 1990. 열수지 해석에 의한 온실 수경재배 작물의 증산속도 추정에 관한 연구, 태양에너지 10:27-34.
20. 남상운, 김문기, 손정익, 1992. 수경재배시스템의 전열특성 및 양액냉각이 작물체온에 미치는 효과, 서울대학교 농학연구 17:97-104.
21. 박상근, 김광용, 1992. 수경재배, 오성출판사.
22. 박재복, 고학균, 1987. 플라스틱 온실의 일사량 분석과 열적환경의 시뮬레이션에 관한 연구: 플라스틱 온실의 열적환경의 시뮬레이션, 한국농업기계학회지 12:16-27.
23. 權 在永, 1988. 溫室의 冷房負荷에 關する 研究, 東京大學 農業工學科 博士論文.
24. 橘 昌司, 1986. 養液栽培における 環境要因と 根の機能, 農業および園藝 61:223-228.
25. 日本太陽エネルギー學會, 1985. 太陽エネルギー利用ハンドブック, pp.71-76.
26. 林眞紀夫, 古在豊樹, 權 在永, 1986. 園藝環境工學における 最近の話題(11)暖冷房負荷の算定法, 農業および園藝 61:1443-1448.
27. 藏田憲次, 岡田益己, 1984. パソコン環境工學入門, サイエンスハウス.

● 신 간 소 개 ●

農學·生物學 分野의 電氣電子計測

저 자 : 橋本 康 의 6명

역 자 : 손정익, 김문기

출 판 : 한국원예기술정보센터

202-5296-7(Fax : 202-5298)

발행년도 : 1993년, 정가 10,000원

(내 용)

- 센서 및 전자회로의 기초

- 디스플레이 및 기록장치

- 데이터 해석

- 토양과 물에 관한 계측

- 미기상에 관한 계측(I, II)

- 재배에 관한 계측(I, II)

- 수리, 토질에 관한 계측

- 농업기계 및 농산가공에 관한 계측

- 환경 제어에 관한 계측

- 화상계측 및 광계측

<윤 . 남 규>