

시뮬레이션 모델에 의한 溫室의 熱環境 分析¹⁾

徐元明 · 尹龍喆
慶尙大學校 農科大學 農工學科

Analysis of Greenhouse Thermal Environment by Model Simulation

Suh, Won Myung and Yong Cheol, Yoon
Dept. of Agr. Engg., Coll. of Agr., Gyeongsang Nat'l Univ.,
Jinju 660-701, Korea

Abstract

The thermal analysis by mathematical model simulation makes it possible to reasonably predict heating and/or cooling requirements of certain greenhouses located under various geographical and climatic environment. It is another advantages of model simulation technique to be able to make it possible to select appropriate heating system, to set up energy utilization strategy, to schedule seasonal crop pattern, as well as to determine new greenhouse ranges.

In this study, the control pattern for greenhouse microclimate is categorized as cooling and heating. Dynamic model was adopted to simulate heating requirements and/or energy conservation effectiveness such as energy saving by night-time thermal curtain, estimation of Heating Degree-Hours(HDH), long time prediction of greenhouse thermal behavior, etc.

On the other hand, the cooling effects of ventilation, shading, and pad & fan system were partly analyzed by static model. By the experimental work with small size model greenhouse of 1.2m×2.4m, it was found that cooling the greenhouse by spraying cold water directly on greenhouse cover surface or by recirculating cold water through heat exchangers would be effective in greenhouse summer cooling.

The mathematical model developed for greenhouse model simulation is highly applicable because it can reflect various climatic factors like temperature, humidity, beam and diffuse solar radiation, wind velocity, etc. This model was closely verified by various weather data obtained through long period greenhouse experiment.

Most of the materials relating with greenhouse heating or cooling components were obtained from model greenhouse simulated mathematically by

¹⁾ 이 논문은 1992년도 교육부 학술연구조성비 대학부설연구소지원에 의하여 연구되었음.

using typical year(1987) data of Jinju Gyeongnam. But some of the materials relating with greenhouse cooling was obtained by performing model experiments which include

analyzing cooling effect of water sprayed directly on greenhouse roof surface.

The results are summarized as follows :

1. The heating requirements of model greenhouse were highly related with the minimum temperature set for given greenhouse. The setting temperature at night-time is much more influential on heating energy requirement than that at day-time. Therefore it is highly recommended that night-time setting temperature should be carefully determined and controlled.

2. The HDH data obtained by conventional method were estimated on the basis of considerably long term average weather temperature together with the standard base temperature(usually 18.3°C). This kind of data can merely be used as a relative comparison criteria about heating load, but is not applicable in the calculation of greenhouse heating requirements because of the limited consideration of climatic factors and inappropriate base temperature.

By comparing the HDH data with the results of simulation, it is found that the heating system design by HDH data will probably overshoot the actual heating requirement.

3. The energy saving effect of night-time thermal curtain as well as estimated heating requirement is found to be sensitively related with weather condition. Thermal curtain adopted for simulation showed high effectiveness in energy saving which amounts to more than 50% of annual heating requirement.

4. The ventilation performances during warm seasons are mainly influenced by air exchange rate even though there are some variations depending on greenhouse structural difference, weather and cropping conditions. For air exchanges above 1 volume per minute, the reduction rate of temperature rise on both types of considered greenhouse becomes modest with the additional increase of ventilation capacity. Therefore the desirable ventilation capacity is assumed to be 1 air change per minute, which is the recommended ventilation rate in common greenhouse.

5. In glass covered greenhouse with full production, under clear weather of 50% RH, and continuous 1 air change per minute, the temperature drop in 50% shaded greenhouse and pad & fan systemed greenhouse is 2.6°C and 6.1°C respectively. The temperature in control greenhouse under continuous air change at this time was 36.6°C which was 5.3°C above ambient temperature. As a result the greenhouse temperature can be maintained 3°C below ambient temperature.

But when RH is 80%, it was impossible to drop greenhouse temperature below ambient temperature because possible temperature reduction by pad & fan system at this time is not more than 2.4°C.

6. During 3 months of hot summer season if the greenhouse is assumed to

be cooled only when greenhouse temperature rise above 27°C, the relationship between RH of ambient air and greenhouse temperature drop(ΔT) was formulated as follows :

$$\Delta T = -0.077RH + 7.7$$

7. Time dependent cooling effects performed by operation of each or combination of ventilation, 50% shading, pad & fan of 80% efficiency, were continuously predicted for one typical summer day long. When the greenhouse was cooled only by 1 air change per minute, greenhouse air temperature was 5°C above outdoor temperature. Either method alone can not drop greenhouse air temperature below outdoor temperature even under the fully cropped situations. But when both systems were operated together, greenhouse air temperature can be controlled to about 2.0~2.3°C below ambient temperature.

8. When the cool water of 6.5~8.5°C was sprayed on greenhouse roof surface with the water flow rate of 1.3 liter/min per unit greenhouse floor area, greenhouse air temperature could be dropped down to 16.5~18.0°C, which is about 10°C below the ambient temperature of 26.5~28.0°C at that time. The most important thing in cooling greenhouse air effectively with water spray may be obtaining plenty of cool water source like ground water itself or cold water produced by heat-pump. Future work is focused on not only analyzing the feasibility of heat pump operation but also finding the relationships between greenhouse air temperature(T_g), spraying water temperature(T_w), water flow rate(Q), and ambient temperature(T_o).

키 워 드 : 난방, 냉방, 온실, 모형 시뮬레이션

Key word : heating, cooling, greenhouse, model simulation

서 론

시설농업은 에너지 집약적 농업이다. 전체 경지면적 중 시설농업 면적 규모에 비하여 시설농업에 투입되는 에너지 비중은 대단히 크다. 저온기의 난방, 고온기의 냉방과 관련된 에너지는 양적인 확대는 물론 사용되는 에너지의 질적인 면에서도 점차 고급화되고 있으며, 시설농업의 규모확대와 노동의 질적 향상을 위해 요구되는 기계화 및 자동화는 필연적으로 에너지 의존적인 경향을 보일 것으로 판단된다. 시설농산물의 생산성 제고와 고급화를 통한 국제경쟁력 강화를 위해서는 규모의

대형화와 집단화가 불가피하며, 적지선정과 배치 및 그 규모를 결정하는 데는 전문 노동력의 이용성과 에너지 특히 냉방 및 난방에너지의 효율성이 지배요인으로 작용될 것이다.

본 연구에서는 온실환경을 관리하는데 투입되는 에너지를 절약하기 위한 수단으로 제반 보온 및 난방 설비를 설치함에 있어서 경제적인 측면에서 최적화를 꾀하기 위한 수단으로 온실에 대한 수치모형을 이용하여 다각적인 검토를 시도해 보았다. 시뮬레이션 기법은 Computer의 성능이 발달됨에 따라 여타분야에서도 활발하게 이용되는 기법으로서 실험을 통한 연구에 비하여 시간이나 경비의 절약 면에서 탁월할 뿐만 아니라 실험에 따르는 오

차나 시행착오를 배제할 수 있다는 측면에서 큰 이점이 있다.^{1, 2, 10, 11, 30, 31)}

온실의 미기상 환경을 예측하기 위하여 개발된 환경수치모형이 아직 온실의 형상변화를 완벽하게 수용할 수 있는 단계는 아니다. 따라서 실제 온실에서 야기되는 시시각각의 세부적인 형상을 정확하게 추적하지는 못하지만, 온실을 운영하는데 있어서 중·장기적으로 열적거동을 살펴보는 데는 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 장기간에 걸친 다양한 온실의 열환경 관련 실측자료를 중심으로 이론적 전개와 자료검정을 거친 수치모형에 의한 시뮬레이션 기법을 주로 이용하여 기상조건에 따른 온실의 열환경을 예측하고, 예측된 열환경을 중심으로 난방 소요열량을 산정하고, 냉방시스템별 냉방성능을 분석해 봄으로서 부분적이지만 시설농업에서의 에너지 이용과 관련된 검토의 가능성을 타진해 보는데 주된 목적을 두고 다음과 같은 구체적인 세부목표를 마련하였다.

1) 특정지역의 전형적인 년 기상자료와 일반 농가에 보편적으로 보급된 대표적인 온실 형태를 중심으로 작물재배 전 기간동안의 장기적인 열환경 분석으로 순간 최대 난방 소요열량을 비롯하여 시간별, 일별, 월별 및 계절별 난방 소요열량을 산정한다

2) 다단계 변온조절 방식에 따라 주간과 야간의 설정온도를 변화시켜 재배작물의 종류와 재배시기에 따른 난방에너지의 변화를 검토한다.

3) 실용적인 보온방식 중에서 에너지 절감효과가 가장 두드러진 것으로 알려진 야간 커튼시스템^{3, 4, 17, 26)}에 대한 효과검정과 계절별 성능을 분석하여 커튼의 전열특성에 따른 에너지 절감효과를 검토한다

4) 재래식 난방 소요열량 예측방식에서 채택하고 있는 Heating Degree-Hour(HDH)^{20, 21, 22)}를 대표적인 온실의 최저 설정온도하에서 산정하고, HDH와 난방소요열량간의 적합성 여부를 확인한다.

5) 하절기 온실냉방²³⁾을 위하여 채택되고

있는 온실의 환기성능, 차광효과, 살수^{26, 29, 32, 33, 35)} 또는 Pad & Fan 시스템 등에 의한 개별적 및 복합적 냉방효과를 분석하고 보다 실용적인 냉방방식을 추구한다.

재료 및 방법

온실의 미기상 환경변화를 다각적으로 검토하기 위해서는 엄청난 시간과 예산이 수반되어야 하는 실험의 한계를 극복하는 수단으로 수치 해석적 접근^{2, 11, 27)}이 불가피하다. 본 연구에서는 온실의 경시적 열환경 분석이 필요한 경우에 대해서는 동적 모형을 이용하였으며, 환기성능을 비롯하여 차광효과 등과 같이 정적인 현상을 분석하는 데는 간단한 수치적 계산모형을 이용하였다. 즉, 주어진 기상여건을 기본 경계조건으로 가정하여 제반 환기 및 냉각시스템의 온도저감 효과를 검토하고자 정적 환경모형을 적용했다.

본 연구에 이용된 온실의 수치 환경모형은 다양한 온실의 형태와 재배작물에 대하여 응용성이 뛰어난 특징을 지니고 있다. 특히 온실의 냉·난방과 관련되는 열환경은 온실 외부의 기상상태는 물론 온실의 형식과 규모, 재배작물의 종류 및 생육상태, 보온장치, 등에 따라 예민하게 변하므로 시간을 변수로 하는 연속적인 추정이 가능해야 한다. 본 연구를 위해 개발된 수치모형¹⁾은 열복사 전달모형을 비롯하여 태양 복사모형, 지중열 전달모형, 작물 성장모형, 수분전달모형, 탄산가스 확산모형 등으로 이루어져 있다.

1. 시뮬레이션에 이용된 기상자료 및 각 온실의 제반 특성

본 연구에서는 그동안 실측을 통해 다양하게 수집된 온실의 제반 열환경 관련자료를 바탕으로 충분히 검정된 환경 수치모형으로 농가보급형 21m×100m 규격의 아치 3연동 파이프온실(Plastic-single)과 27m×100m 규격의 양지붕 3연동 철골온실(Glass-single)을

대상으로 난방소요열량 및 보온커튼의 보온성을 검토하였고, 고온기의 냉방효과를 검토하기 위하여 가정된 기상조건 하에서의 각종 온도저감방식별 실내온도의 변화특성을 비교하였다.

특히 환기율에 따른 실내·외 간의 온도차를 비롯하여 외기온을 중심으로 작물상태별 온도변화, 차광 유무별 온도변화, Pad & Fan 시스템의 냉방효과를 분석할 때는 편의상 이미 확보되어 있는 경남 진주지방의 '87년도 시간별 기상자료를 이용하였다.

다만 기존 및 새로운 방법에 의한 HDH 자료산정과 주간 및 야간 최저 설정온도의 변화에 따른 난방 소요열량 산정에는 기존자료와 비교하고자 농가보급형 표준단면이 아닌 부착식 외지붕 2중피복 플라스틱 단동온실(Plastic-double)을 대상으로 하였으며 그 밖의 조건은 표준온실에 대한 것과 동일하게 하였다.

시물레이션에 이용된 세 가지 온실의 재원 및 관련 특성치들은 표 1과 같다.

2. 시물레이션 용 환경 수치모형의 개요

시물레이션에 이용된 환경수치모형은 徐¹⁰⁾에 의하여 개발된 다이나믹 모형으로서 지금까지 개발된 여타의 온실 열환경모형^{2, 27, 30, 31)}에 비하여 범용성이 높은 모형으로 개발되었으며^{10, 11)}, 그동안 다양하게 수집된 자료를 바탕으로 충분한 검토가 이루어졌다고 판단된다. 온실의 환경예측에 필요한 계산과정 및 모형의 전반적인 구성에 관한 요약도는 그림 1과 같으며, 단계별 주요 내용은 다음과 같다:

1) 물리적인 상수, 온실 파라메타, 초기치

입력

온실의 시물레이션을 위해서는 일차적으로 온실의 형상과 관련된 제반 치수를 비롯하여 온실구성 인자의 물리적인 특성치와 대략적인 초기치를 입력자료로 필요로 한다. 난방 소요열량을 비롯하여 제반 에너지 및 수분전달과 관련하여 시물레이션에 필요한 기본적인 파라메타들은 대상온실의 특성에 따라 차이가 있으나 3연동 플라스틱 피복온실의 경우를 소개하면 표 2와 같다. 여기에는 온실이 설치되는 곳의 위도, 경도를 비롯하여 온실의 단면치수, 길이, 작물상태, 환기 및 난방 설정온도 및 조절용량, 피복재의 광학적, 물리적 특성 등이 포함된다. 다음으로는 매 시간별 기상자료가 요구되는데 경우에 따라서는 측정된 자료의 여건에 맞추어 측정된 자료의 간격만 입력하면 환경모형 내에서 산정할 수 있도록 되어 있다.

2) 시간별 기상자료 입력

온실환경의 시물레이션에 필요한 기상자료는 월, 일, 시간, 외기온 및 노점온도, 수평면 일사량, 대기압, 풍속, 운량, 강설량 등이다. 지역별 기상자료를 중심으로 해당지역의 설계 기상자료를 구축함으로써 지역특성에 맞는 시물레이션이 가능할 것이나 부분적으로 표준기상년 자료가 구축되어 산발적으로 이용되고 있을 뿐 아직 체계적인 자료구축이 이루어지지 못하고 있다.

3) 작물의 성장 및 형상계수 산정

재배작물의 종류에 따른 성장 수치모형에 의하여 작물의 형상 및 치수를 계산하여 여타 주변 표면들과의 형상계수를 계산하는 과정이

Table 1. Properties of model greenhouses adopted for simulation.

Greenhouse Types	Floor Area $A_f(m^2)$	Surface Area $A_s(m^2)$	Volume $V(m^3)$	Thermal Radiation Transmittance, τ	Overall Heat Transf. Coeff. $U(W/m^2-^\circ C)$
Glass-single	2,700.0	3,765.0	10,330	0.88	6.3
Plastic-single	2,100.0	3,227.0	8,350	0.89	7.1
Plastic-double	133.6	209.1	230	0.80	4.1

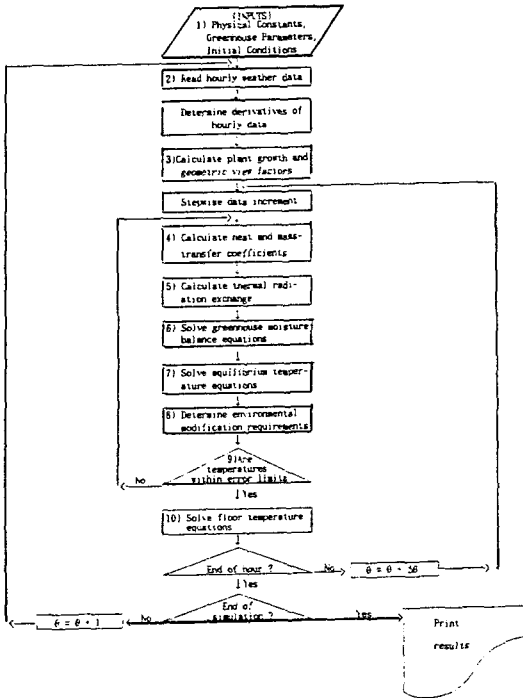


Fig. 1. Flow chart of greenhouse environment simulation

다. 여기서 계산되는 형상계수는 일사량의 투과 및 반사, 흡수를 포함하여 장파장 열복사와 관련된 에너지 교환에 이용되는 값으로서 작물의 성장에 따라 연속적으로 변하게 된다.

4) 열 및 수분 전달계수 산정

열전달 및 수분전달과 관련된 계반 계수를 결정하는 단계로서 각각의 열 및 수분 교환표면의 온도를 비롯한 수증기압, 풍속, 형상계수 등에 따라 복사, 전도, 대류 열전달 및 수분전달량의 산정에 필요한 계산이 이루어진다.

5) 열 복사교환량 산정

이상과 같은 기본적인 파라메타들에 대한 계산이 끝나면 일차적으로 복사열 전달과정이 계산된다. 여기서는 각종 열교환 표면의 온도에 따라 열복사에너지의 유입 및 유출관계가 결정된다.

6) 온실 수분 평형방정식의 해

작물 엽면에서의 증발산량 및 수분응축을 비롯하여 지반 및 피복재 표면에서의 증발 및 응축과 환기 및 누기에 따른 공기치환 등을 고려하여 온실공기의 증기압이 계산된다.

7) 온도 평형공식의 해

실내공기를 비롯하여 작물의 엽면, 지표면 등의 온도가 평형상태에 있다는 전제하에서 각각의 온도가 연립방정식의 해를 구하는 형식으로 결정된다.

8) 환경조절량 산정

난방 및 환기 설정온도를 기준으로 이상에서 계산된 평형온도와 관련하여 소요 난방열량 및 환기량이 계산된다.

9) 계산된 온도의 수렴성 검토

이상에서 계산된 각종 온도는 일정 시간 간격별(본 모델의 경우 3분)로 계산되는 값으로서 반복 계산방식으로 특정한 값에 수렴하게 된다. 따라서 전후 계산치가 일정한 오차범위(여기서는 0.1°C)내에 수렴할 때 까지 계산과 검정이 반복된다.

10) 지중 온도방정식의 해

위에서 계산된 지표면 온도를 중심으로 온실바닥을 이루고 있는 지중온도를 계산하는 단계로서 지반은 비열이 무시할 수 없을 정도로 큰 관계로 비정상상태(transient state)이므로 온도 평형공식과 같이 해를 구할 수 없다. 따라서 주변조건에 따른 비정상상태의 미분방정식의 해를 별도로 구하게 된다.

3. 暖房 에너지 算定

1) 暖房 所要熱量 計算 및 保溫性能 分析

난방 설정온도는 시간대 별로 차이를 두는 변온조절방식을 적용하였으며, 재배작물은 토마토를 가정하여 가을철 작기는 9월 1일에 정식하여 익년 1월 15일에 끝나는 것으로 하였으며, 겨울철 작기는 1월 15일에 정식하여 5월 31일에 끝나는 것으로 가정하였다. 그림 2는 난방열량 산정에 적용한 변온조절 모형으로서 일출 전후 및 일몰 전후에 각각 3단계 및 4단계로 구분함으로써 총 7단계로 이루어졌으며, 주간과 야간의 최저 설정온도를 각각

Table 2. Parameters used for greenhouse simulation.

Parameters	Symbols	Values
Time increment size	dt	180(second)
Latitude of greenhouse site	latit	0.614(radian)
Longitude of greenhouse site	long	128.06(digree)
Light scattering coefficient for greenhouse covering	sc	0.10(ratio)
Solar absorptance of plants	alphap	0.80(ratio)
Solar absorptance of floor	alphap2	0.74(ratio)
Solar absorptance of north wall	alphap3	0.75(ratio)
Transparent cover thickness	thin	0.152(mm)
Refractive index of transparent covers	refin	1.515(ratio)
Solar radiation extinction coeff. of transparent covers	ecoeff	0.752(mm ⁻¹)
Thermal radiation extinction coeff. of transparent covers	tecoeff	1.77(mm ⁻¹)
Greenhouse low ventilation capacity	qventl	63.88(m ³ /s)
High ventilation capacity	qventh	127.75(m ³ /s)
Greenhouse covering surface area	ac	3081.3(m ²)
Mature plant age	am	120.0(day)
Number of plant per row	pno	220.0(numbers/row)
Number of row of plants	rno	21.0(numbers)
Mature plant height	phm	1.93(m)
Mature plant diameter	pdm	0.5(m)
Pot or bad or bench height	poth	0.32(m)
Mature leaf area(one-side)	pleafm	1.46(m ² /plant)
Transpiration resistance(top of leaf)	rpt	312.0(sec/m)
Transpiration resistance(bottom of leaf)	rpb	97.8(sec/m)
Soil surface area per plant	apot	0.134(m ² /plant)
Thermal resistance of north wall	rwall	1.00(m ² , °C/W)
Thermal resistance of greenhouse perimeter(foundation)	reperi	1.21(m ² , °C/W)
initial plant age	ap	0.0(day)
Allowable iteration error	e	0.1(°C)
Thermal emittance of floor	eif	0.9(decimal)
Thermal emittance of north wall	ew	0.4(decimal)
Thermal emittance of plants	ep	0.94(decimal)
Specific heat of soil	cps	1339.0(J/kg, °C)
Bulk density of soil	bds	1600.0(kg/m ³)
Floowr thermal conductivity factor	akrf	0.05(ratio)
Specific heat of rock	cpr	906.0(J/kg, °C)
Bulk density of rock	bdr	1390.0(kg/m ³)
Thermal conductivity of rock	kr	1.80(W/m, °C)
Thermal conductivity of soil	ks	1.00(W/m, °C)
Width of exterior soil influence zone	lpw	1.20(m)

Table 2. Continued

Parameters	Symbols	Values
Thicknees of top floor temperature node	dely1	0.03(m)
Thicknees of second floor temperature node	dely2	3.91(m)
Deep ground soil temperature	tcon	13.8(°C)
Horizontal floor temperature gradient factor	corect	0.82(ratio)
Greenhouse width	gw	21.0(m)
Greenhouse length	gl	100.0(m)
Height of greenhouse north wall	bh	2.70(m)
Greenhouse width from north wall to peak	bw	10.50(m)
Greenhouse peak height	ph	4.60(m)
Greenhouse south wall height	fh	2.700(m)
Greenhouse roof shading factor	rfr	0.963(ratio)
South wall shading factor	sfr	0.963(ratio)
East wall shading factor	efr	0.75(ratio)
West wall shading factor	wfr	0.85(ratio)
Characteristic height for greenhouse covering	height	3.60(m)
Spacing between greenhouse covers	spaced	0.203(m)
Maximum condensate on the inside cover	condm	0.1205(kg/m ²)
Diurnal furance setpoint temperature	tfuel1	10.0(°C)
Nocturnal furance setpoint temperature	tfuel2	22.0(°C)
Low capacity ventilation setpoint temperature	tvent1	27.0(°C)
Full capacity ventilation setpoint temperature	tventh	29.0(°C)
Ventilation fan mechanical efficiency	effv	0.20(decimal)
Maximum acceptable greenhouse temperature	tmax	33.0(°C)

22°C 및 10°C로 하였다. 보온에 사용된 보온 커튼은 일몰 직전에 닫혀서 일출 직후에 열리는 것으로 하였으며, 커튼의 열 특성치는 알루미늄 포일과 같다고 가정¹⁹⁾하여 반사율을 86%로 하고 흡수율 및 투과율을 각각 13% 및 1%로 하였다.

2) 設定 溫度別 暖房 所要熱量 變化

재배작물에 따라서 또는 주간과 야간에 따라서 온실에 조성되는 온도환경은 달라진다. 즉, 저온작물의 경우와 고온작물의 경우가 상이하고 일사량이나 탄산가스 농도와 함께 주간동안 광합성이 이루어지는 상황에서 온도의 조건과 야간의 온도조건이 상이하다²⁰⁾.

본 연구에서는 이와 같이 상이한 설정온도에 따라 동일한 기후여건 하에서 난방 소요열량의 변화를 주간과 야간으로 나누어 살펴보

며, 주간과 야간별로 설정온도가 난방 소요열량에 미치는 감도를 검토함으로써 설정온도의

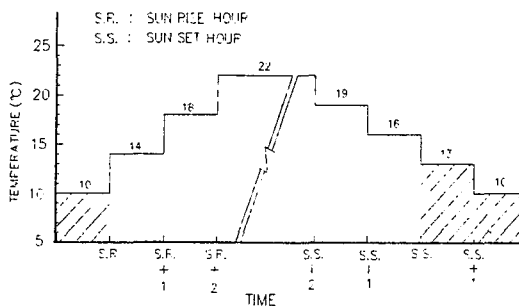


Fig. 2. Time dependent temperature control pattern for the simulation of greenhouse heating energy requirements.

선택 과정이나 설정 후의 유지상태에 따른 에너지 관리효율을 확인코자 한다.

3) Heating Degree-Hour(HDH)와 暖房 所要熱量

HDH는 지금까지 제반 난방관련 에너지 대책을 수립하는데 가장 보편적으로 활용된 자료이며, 이의 산정방법에 대해서는 다양한 논리가 존재한다^{18, 21, 22)}. 林眞²²⁾ 등은 일몰 전후에서 일출 전후까지 외기온(T_{AMB})과 설정온도(T_{SET})간의 관계로서 산정의 기점을 잡았으며, 三原²¹⁾은 일조가 없는 동안에 대하여 외기온과 설정온도의 차를 지속시간으로 적산하는 방법을 사용하였다.

어느 방법을 막론하고 HDH 자료에 의한 난방에너지 산정은 정확성보다는 간편성에 역점을 두고 있다. 일반적으로 실제 온실의 경우 재배작물의 종류와 생육단계에 따라서 조건이 달라지며, 주간과 야간에 따라 변온관리를 할 경우에는 더욱 상이한 조건이 형성된다¹⁸⁾. 더욱이 일 평균기온의 사용으로 경시적인 변화에 대한 고려가 어렵고, 주어진 기상여건 하에서 온실내에 형성되는 2차적인 온도변화가 반영되지 않음으로서 HDH 값과 실제 난방 소요열량 간에는 상당한 차이가 있을 것으로 판단되어 三原²⁰⁾에 의한 방식(OLD)과 모형 시뮬레이션 방식(NEW)별 HDH를 다음과 같이 계산하여 비교해 보기로 하였다:

$$(NEW): HDH = \sum (T_{SET} - T_{AIRG}) dt$$

$$(OLD): HDH = \sum (T_{SET} - T_{AMB}) dt$$

여기서, T_{AIRG} 는 온실이 존재함으로서 야기되는 영향을 반영한 기온으로서 주간의 일사와 야간의 지면 열전달이 고려된 기온으로 간주하였다.

4. 冷房시스템의 性能 檢討

정의된 제반조건을 중심으로 열 평형식과 수분 평형식을 이용하여 외부환경의 변화에 따른 온실내부의 미기상 상태를 예측함은 물론 설정된 온실내부의 온도에 따라 소요환기량, 소요난방량 등을 결정하게 된다. 따라서

온실의 구조형상, 사용자재의 구성, 재배상황, 설계조건, 난방 및 환기율에 따라 온도 및 습도의 변화를 다양하게 추정하였다.

본 연구에서는 플라스틱 피복온실을 대표하여 농가보급형 온실 구조인 아치 3연동 파이프온실(폭 7m×3연동×100m 길이)과 양지붕 3연동 철골온실의 경우는 3-2G형⁹⁾(폭 9m×3연동×100m 길이)을 중심으로 하절기 온도 조절과 관련하여 살펴보았다. 계산에 필요한 설계외기온(T_o), 상대습도(RH)별 공기의 습구온도(T_{wb}) 및 밀도(V), 그리고 표준일사량³⁵⁾(I) 등은 다음과 같다:

$$T_o = 31.3^{\circ}\text{C} \text{ (7월 반순별 최고)}$$

$$\text{RH} = 50\% \quad T_{wb} = 22.8^{\circ}\text{C}, \quad V = 0.882\text{m}^3/\text{kg}$$

$$\text{RH} = 80\% \quad T_{wb} = 28.0^{\circ}\text{C}, \quad V = 0.894\text{m}^3/\text{kg}$$

$$I = (0.136 + \sin\beta)1.085 \cdot e^{-0.207/\sin\beta}$$

여기서, β =태양고도= $90 - \theta_z$, $\cos\theta_z = \cos\delta \cos\phi \cos\omega + \sin\delta \sin\phi$, ϕ =위도(진주, 35.2°), ω =시간각(태양정오, 0.0°), δ =태양적위(7월 평균일, 21.2°)

5. 撒水式 冷房시스템의 性能試驗

동절기 보온을 목적으로 수막장치를 하는 것과 유사한 방법으로 하절기에 냉수를 피복면에 살수함으로써 냉방효과를 거둘 수 있다는 가능성을 확인하기 위하여 폭 1.2m×길이 2.4m의 1중 플라스틱 모형온실을 제작하여 평면적 1m²당 1.1~1.5 liter/min의 유량으로 지붕 상부에 일정 간격으로 설치된 노즐로서 살수하였다. 이 때 사용된 수온은 5~9°C 였으며, 당시 주변기온은 27~35°C 였다.

結果 및 考察

1. 暖房 에너지 算定

1) 暖房 所要熱量 計算 및 保溫性能 分析

수치모형 자체에서 계산된 일출시간을 중심으로 일출 이전까지의 야간에는 난방 설정온도를 10°C로 하고 일출시부터 일출후 2시간까지 매시간별로 4°C씩 증가시켜서 주간동안에

는 22℃를 난방 설정온도로 하여 일몰전 2시간까지 유지한다. 일몰시간으로 부터 2시간전부터 일몰후 1시간까지는 4단계로 매시간 3℃씩 감소시킴으로서 일몰후 1시간 이후는 다시 야간의 설정온도인 10℃로 유지하도록 하였다.

표 3은 가정된 변온조절 모형에 따라 9월에서 익년 5월까지 9개월 동안 경남 진주지역의 매 시간별 기상자료를 중심으로 야간에 보온 커튼을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대하여 각각 산정된 난방소요량을 월별로 대비한 것이다. 표 3을 통하여 알 수 있듯이 월별 난방소요열량은 외기온의 상태와 직결된 양상을 보이고 있으며, 1월에 가장 많은 난방열이 소요되어 전체의 25%가 집중되고 있음을 알 수 있고, 본격적인 난방이 이루어지는 11월에서 익년 4월까지의 6개월 동안에 소요되는 난방열량이 총 소요난방열량의 96%를 차지함을 알 수 있다. 특히 혹한기가 계속되는 12월에서 익년 2월까지의 3개월 동안이 전체의 65%를 차지함을 알 수 있다.

야간커튼의 보온성능은 월별 기상여건에 따라 현저한 차이를 보여 50.3% - 72.3%까지의 난방열량을 절약하는 효과를 보이고 있으며, 전체 재배기간을 통하여 56%의 난방비를 절약할 수 있다는 결론이다.

이와 같은 시뮬레이션 결과는 커튼의 작동 방식이나 작물별 설정온도, 변온조절 모형 등에 따라서도 상당한 차이를 보일 것이며, 연료비용 역시 사용 연료의 종류를 비롯하여 난방기의 효율에 따라 차이가 있을 것이다. 그러나 온실 경영과 관련된 에너지 절감대책의

수립이나 온실경영의 기본계획을 수립하는 데는 본 연구에서와 같은 접근방법이 합리적이며, 그 결과는 매우 유익하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 設定 溫度別 暖房 消遙熱量 變化

표 4는 주요 작물들의 관리 기준온도를 중심으로 주간과 야간별로 설정온도를 달리하여 온실에 소요되는 난방열량을 시뮬레이션 방식으로 산정하여 월별로 정리한 것이다.

딸기를 비롯한 저온성 작물의 경우에는 주간과 야간의 설정온도를 각각 18℃ 및 3℃로 했을 경우 19,212MJ의 난방열이 요구되나 동일한 작물을 고온으로 재배하는 경우를 전제로 하여 주간과 야간 설정온도를 각각 23℃ 및 10℃로 했을 경우에는 무려 51,258MJ이 소요되어 동일한 작물이라 하더라도 설정온도의 선택에 따라 2.7배의 차이를 보임을 알 수 있다.

고온성 작물인 고추의 경우에도 주간과 야간을 25℃ 및 15℃로 할 경우와 30℃ 및 20℃로 할 경우 각각 84,909 MJ 및 138,814 MJ의 난방열이 요구되어 현저한 차이가 있음을 발견할 수 있다.

3) Heating Degree-Hour(HDH)와 暖房 所要熱量

표 5는 두 가지 상이한 기준에 의하여 계산된 결과로서 서로 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 새로운 방법으로 적산된 값이 기존방식으로 적산된 값의 1/3정도에 불과함을 알 수 있다.

Table 3. Monthly heating energy requirements simulated.

Month	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Total
without thermal curtain ¹⁾	8,056	26,520	117,224	231,552	245,427	164,576	126,609	58,190	16,200	993,479
with thermal curtain ²⁾	2,228	9,284	49,220	92,586	111,443	81,831	62,306	27,613	4,990	441,883
	(27.7%)	(35.0%)	(42.0%)	(40.0%)	(45.4%)	(49.7%)	(49.2%)	(47.5%)	(30.8%)	(44.0%)

() : 2) ÷ 1) × 100 (%)

Table 4. Heating requirements for various minimum setting temperature.

Set Temp.(°C)		Vent. Temp. (°C)	Monthly Heating Requirement(MJ)									
Night	Day		Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Total
3.0	18.0	30.0	351	448	1830	4452	5373	3682	2092	673	345	19212
5.0	18.0	30.0	356	520	2583	6116	7010	4684	2723	864	351	25164
7.5	20.5	30.0	413	767	4059	8606	9674	6607	7327	1576	473	36457
8.0	20.0	33.0	415	781	4164	8827	9845	6648	4406	1592	463	37095
8.0	23.0	35.0	467	934	4542	9030	10307	7161	5064	2038	580	40081
10.0	20.0	35.0	508	1093	5460	10960	12003	8085	5717	2253	657	46693
10.0	23.0	35.0	569	1254	5819	11182	12439	8586	6377	2711	805	49698
10.0	23.0	30.0	596	1315	5974	11486	12811	8870	6576	2819	853	51258
10.5	22.5	35.0	596	1335	6088	11707	12913	8880	6624	2814	843	51757
12.0	25.0	35.0	853	2013	7725	13736	15165	10611	8619	4055	1358	64089
12.5	22.5	35.0	793	1972	7747	14077	15326	10515	8328	3821	1222	63760
12.5	25.5	35.0	954	2263	8264	14416	15879	11154	9148	4457	1551	68046
13.0	23.0	35.0	875	2206	8287	14760	16021	11042	8953	4208	1382	67693
13.0	25.0	35.0	987	2416	8637	14981	16392	11473	9556	4628	1609	70538
15.0	25.0	35.0	346	3345	10623	17608	18927	13340	11485	5969	2295	84904
15.0	28.0	35.0	627	3765	11290	18040	19585	14109	12527	6807	2843	90559
15.5	25.5	35.0	513	3691	11213	18339	19666	13935	12161	6484	2573	89550
17.5	27.5	35.0	371	5316	13901	21482	22751	16469	15003	8682	3983	109926
18.0	25.0	35.0	2348	5336	13897	21808	22852	16372	14783	8466	3828	109660
18.0	28.0	35.0	2636	5760	14646	22243	23521	17126	15836	9300	4386	115423
20.0	30.0	35.0	3965	7866	18565	25513	26748	19865	18990	11940	6320	138814
20.5	27.5	35.0	3927	7806	17449	25803	26814	19647	18542	11621	6088	137734
23.0	30.0	37.0	5954	10734	21152	29843	30884	22876	22497	14951	8800	167785

최저 설정온도가 주간 22.5°C 야간 10.5°C 일 때 주간과 야간의 구성비를 살펴보면 기존 방식의 경우 주간동안의 HDH 값이 야간의 HDH 값의 3배나 됨을 알 수 있다.

표에서 알 수 있듯이 HDH 에 결정적인 영향을 미치는 요인은 최저 설정온도로서 설정 온도 1°C의 증가에 HDH 값이 25% 정도의 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

이와 같이 기존의 HDH 자료는 온실과 같은 특수한 환경을 추정하기에 적합하지 못하며, 실제 난방열량보다 지나치게 높은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 사실은 앞에서 언급한 난방 소요열량을 여기

서 계산된 HDH 값에 대상온실의 열전달계수 및 열전달 표면적을 곱한 값과 직접적으로 비교해 봄으로써도 확인할 수 있다.

결과적으로 기존의 HDH 자료에 근거한 난방열량 산정법은 지나치게 높은 값을 제시할 가능성이 있으므로 온실과 같이 기상변화에 민감한 특수 구조체에 대한 열적인 해석은 본 연구에서 처럼 범용성이 강한 모형의 시뮬레이션 방법으로 산정함이 합리적이라고 판단된다.

2. 冷房시스템의 性能

가정된 기상조건 하에서의 두 가지 대표적인 농가 보급형 온실을 대상으로 하여 환기를

서·윤 : 시뮬레이션 모델에 의한 溫室의 熱環境 分析

Table 5. Comparison of estimated Heating Degree-Hour between two different methods.

Set Temp.(°C)		Method	Period	Monthly Heating Degree-Hour(°C - hour)									
Night	Day			Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Total
10.5	22.5	New	Day	39	138	509	408	920	943	817	394	79	4227
			Night	37	169	1385	3644	3704	3161	1308	380	60	12847
			Total	76	307	1924	4052	4625	3104	2125	774	138	17124
		Old	Day	597	1396	3343	4586	5563	5093	4829	2961	1393	29761
			Night	33	246	1786	4813	4976	3283	2199	660	80	18076
			Total	630	1642	5129	9399	10539	8376	7028	3621	1473	47837
6.0	6.0	New	Day	0	7	70	73	180	213	100	23	0	666
			Night	1	27	524	1972	2001	1080	463	58	0	6126
			Total	1	34	594	2045	2181	1292	563	80	0	6792
		Old	Day	1	15	284	1002	1447	1081	548	119	1	4499
			Night	0	37	703	2781	2882	1799	877	146	0	9224
			Total	1	52	987	3782	4329	2880	142	265	1	13722
10.5	10.5	New	Day	4	27	174	186	399	404	23	96	3	1521
			Night	37	169	1379	3625	3669	2140	129	377	60	12747
			Total	41	195	1553	3811	4057	2543	1532	473	63	14269
		Old	Day	14	91	798	1970	2674	2095	1391	472	59	9564
			Night	33	245	1752	4731	4883	3210	2133	643	80	17708
			Total	46	335	2550	6700	7557	5305	3524	1115	139	27272

의 변화에 따른 온실 내부온도의 변화를 살펴 보았다. 기본적으로 환기율의 변화에 따른 실내온도의 변화를 알아볼 수 있도록 환기율 곡선을 형성하고, 작물의 재배 유무와 아울러 차광율에 따른 기온변화를 살펴보았으며, 통상적인 Fan & Pad시스템의 성능과 외기의 상대습도의 관계를 알아보았다.

1) 환기 성능

배출식 강제환기 시스템을 갖춘 온실에서 환기율에 따라 실내기온의 변화를 알아보기 위하여 이론적인 계산방법²³⁾을 적용하였다. 표 6 및 표 7은 각각 유리 1중 온실과 플라스틱 1중 온실에 대해 주어진 외기조건하에서의 환기율의 변화에 따른 온실의 내부온도를 시뮬레이션한 결과이다.

그림에서 알 수 있듯이 환기율이 1/4회/min 이하로 떨어질 경우, 실내온도가 외기온 보다

15°C 이상으로 증가하기 때문에 외기온이 35°C 정도이면 실내기온이 50°C 이상까지 상승함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 환기효과 실험을 통하여 얻어진 실측치²⁴⁾와 유사한 것이다. 지역적인 기상여건에 따라서 실내온도가 차이를 보일 수 있으나 외기온에 대한 실내기온의 증가분은 유사할 것으로 예상된다.

또 환기율이 1회/min 전후에서 환기율의 증가에 따른 온도의 강하 효과가 급격히 둔화되는 현상을 발견할 수 있다. 결국 두가지 온실 모두 1회/min 정도의 환기율이 작물이 왕성하게 생육하고 있는 1중 또는 2중 피복 온실에 바람직한 환기율임²⁵⁾을 확인할 수 있다. 다양한 시뮬레이션 결과에 의하면 1중피복시와 2중피복시의 환기율 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 6. Temperature rise(ΔT) depending on ventilation rate in glass house.

Ventilation Rate (volume/min)	Temperature Rise(ΔT)	
	Ambient RH=50%	Ambient RH=80%
1/4	15.89	16.03
1/2	9.50	9.60
1	5.26	5.33
2	2.78	2.80
4	1.48	1.45

Table 7. Temperature rise(ΔT) depending on ventilation rate in plastic house.

Ventilation Rate (volume/min)	Temperature Rise(ΔT)	
	Ambient RH=50%	Ambient RH=80%
1/4	14.99	15.13
1/2	9.03	9.13
1	5.03	5.09
2	2.67	2.70
4	1.38	1.39

2) 작물 재배효과

온실에서 재배되는 작물의 종류나 생육단계에 따라 증발산량이 달라지므로 온실내로 유입되는 태양복사량 중에서 작물에 의하여 배제되는 에너지의 양도 달라질 수 밖에 없다. 일반적으로 작물이 왕성하게 자라고 있는 온실에서는 온실내부에 유입되는 태양에너지의 50% 전후의 에너지가 작물의 증발산에 잠열 형태로 소비되는 것으로 추정되고 있다¹¹⁾. 따라서 여기서는 작물이 없는 경우, 50% 정도 채워진 경우, 100% 채워진 경우에 대하여 온실내로 유입된 태양에너지의 해당비율만큼 증발산에 소비되는 형식으로 추정되었다.

표 8 및 표 9는 표준 3-2G(유리 1중) 및 1-2W(플라스틱 1중) 온실에서 작물의 재배상태별 환기율에 따른 실내기온의 증가 정도를 보인 것으로서 재배되고 있는 작물의 증발

산에 의한 냉각효과를 분명히 발견할 수 있다. 환기율이 1.0회/min인 경우 작물이 없는 온실에서는 온도증가 효과가 10°C 이상이지만 작물이 100% 채워진 온실에서는 온도증가 효과가 5°C에 불과함을 알 수 있다.

따라서 온실내부의 식생상태에 따라서 소요 환기량을 현저히 달리해야 함을 알 수 있다.

3) 차광효과

고온기 온실의 기온을 상승시키는 요인은 태양 복사에너지이다. 따라서 복사에너지의 투입량이 줄어드는 만큼 온도증가분의 폭을 줄일 수 있게 되는 셈이다. 따라서 일사량의 투과율에 따른 환기율별 실내기온의 상승관계를 추정해 보았다.

Table 8. Temperature rise depending on ventilation rate under different cropping level in glass house.

Ventilation Rate (volume/min)	Temperature Rise (ΔT)		
	Full Cropped	Half Cropped	No Cropped
1/4	16.03	24.05	32.06
1/2	9.60	14.40	19.20
1	5.33	8.00	10.66
2	2.82	4.23	5.64
4	1.45	2.18	2.90

Table 9. Temperature rise depending on ventilation rate under different cropping level in plastic house.

Ventilation Rate (volume/min)	Temperature Rise (ΔT)		
	Full Cropped	Half Cropped	No Cropped
1/4	14.66	22.00	29.32
1/2	9.00	13.50	18.00
1	5.08	7.62	10.16
2	2.71	4.07	5.42
4	1.40	2.10	2.80

표 10 및 표 11은 작물이 왕성하게 자라는 두 가지 표준온실에 대해 차광을 하지 않는 경우에 대하여 50%의 차광을 한 경우, 환기율의 변화에 따른 실내기온의 상승범위를 알아 본 것으로 차광율에 따른 실내기온의 변화가 현저하다. 이는 작물의 재배 상태별 실내기온 변화와 유사한 관계로서 차광율 만큼 실내기온의 상승을 줄일 수 있는 것이다.

표에 의하면 두 경우 모두 유사한 효과를 보임을 알 수 있다. 50% 차광한 경우에는 1/4회/min 정도의 환기율로서 비차광 온실의 3/4회/min에 해당하는 환기효과를 가져올 수 있음을 알 수 있으며, 플라스틱 온실에서 환기

Table 10. Temperature rise depending on ventilation rate under different solar intensity in glass house.

Ventilation Rate (volume/min)	Temperature Rise(ΔT)	
	No Shade	50% Shade
1/4	16.03	8.02
1/2	9.60	4.80
1	5.33	2.67
2	2.82	1.41
4	1.45	0.73

Table 11. Temperature rise depending on ventilation rate under different solar intensity in plastic house.

Ventilation Rate (volume/min)	Temperature Rise(ΔT)	
	No Shade	50% Shade
1/4	14.66	7.33
1/2	9.00	4.50
1	5.08	2.54
2	2.71	1.36
4	1.40	0.70

율을 1.0회/min으로 동일하게 했을 경우 비차광 온실과 차광 온실에서의 온도증가분이 각각 5.08°C 및 2.54°C로서 차광율 만큼 온도증가분을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

4) 환기율과 Pad & Fan시스템의 냉방효과

표 12 및 표 13은 각각 유리피복 온실과 플라스틱 피복온실에서 차광상태를 비롯하여 외기의 상대습도, Fan & Pad 시스템의 효율 등에 따른 환기율별 실내기온의 변화를 예측한 결과이다. 그림 3 및 그림 4는 표 12에 제시된 자료를 도시한 것으로서 외부 건구온도 31.3°C 하에서 상대습도가 각각 80% 및 50%인 경우 유리피복 온실의 실내온도 변화를 나타낸 것이고, Fig. 5 및 Fig. 6은 표 13에 제시된 자료를 도시한 것으로서 동일한 외기조건 하에서 PVC피복 온실의 실내온도 변화를 보여 주고 있다. 대체적으로 온실의 피복재료에 의한 차이는 미미하며, 환기율이 증가할수록 그 차이가 더욱 줄어들어서 환기율이 1.0회/min 이상에서는 차이를 거의 발견할 수 없게 된다. 그러나 동일한 피복온실에서 외기의 상대습도 차이에 의한 Fan & pad & Pad

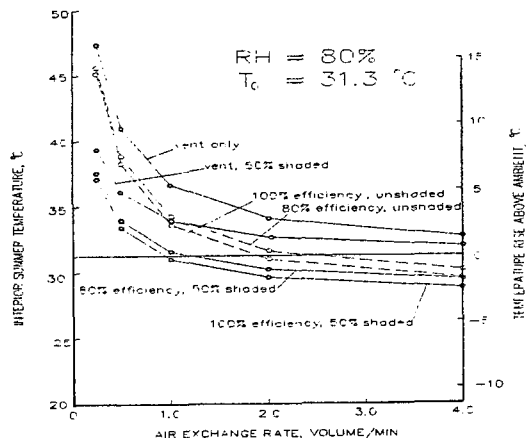


Fig. 3. The reduction in temperature in a ventilated greenhouse where incoming air is cooled by Fan & Pad system(glass covered).

Table 12. Variation of greenhouse temperature(T_i) depending on ventilation rate, efficiency of pad & fan system, solar intensity in glass house($T_o=31.3$).

Ventilation Rate (volume/ min)	RH=50%						RH=80%					
	Effi.=0%		Effi.=80%		Effi.=80%		Effi.=0%		Effi.=80%		Effi.=80%	
	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%
1/4	47.19	39.25	42.61	34.67	41.47	33.52	47.33	39.32	45.57	37.55	45.12	37.11
1/2	40.80	36.05	35.72	30.58	33.96	19.21	40.90	36.10	38.78	33.98	38.25	33.45
1	36.56	33.93	30.50	27.87	28.98	26.35	36.63	33.97	34.28	31.61	33.69	31.03
2	34.08	32.69	27.67	26.28	26.07	24.60	34.12	32.71	31.63	30.22	31.01	29.60
3	32.73	32.02	26.13	25.41	24.48	23.77	32.75	32.03	30.19	29.46	29.55	28.82

Table 13. Variation of greenhouse temperature(T_i) depending on ventilation rate, efficiency of pad & fan system, solar intensity in plastic house($T_o=31.3$).

Ventilation Rate (volume/ min)	RH=50%						RH=80%					
	Effi.=0%		Effi.=80%		Effi.=80%		Effi.=0%		Effi.=80%		Effi.=80%	
	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%	Shade 0%	Shade 50%
1/4	46.29	38.80	41.56	34.27	40.46	33.19	46.43	38.63	44.30	36.97	43.88	36.55
1/2	40.33	35.82	34.93	30.48	33.61	29.16	40.43	35.80	38.26	33.76	37.75	33.25
1	36.33	33.82	30.38	27.87	28.89	26.39	36.39	33.84	34.07	31.54	33.50	30.96
2	33.97	32.64	27.64	26.30	26.05	24.71	34.00	32.66	31.55	30.20	30.94	29.58
3	32.68	31.99	26.12	25.43	24.49	23.79	32.69	32.00	30.15	29.46	29.52	28.82

시스템의 성능 차이는 물론 시스템의 효율에 따른 냉각효과도 현저함을 발견할 수 있다. 특히 외기의 상대습도가 낮은 경우에는 통상적으로 이용되는 1회/min 이하의 환기율에서도 Fan & Pad 시스템을 이용할 경우 실내온도를 외기온 이하로 충분히 떨어뜨릴 수 있음을 알 수 있다.

5) 시뮬레이션에 의한 경시적 냉방효과 추정

표 14는 경남 진주지역의 대표적인 하절기 주간 기상하에서(RH=70%) 하루동안의 외기온 변화에 따른 온실 내부기온을 매 시간별로 시뮬레이션한 결과이며, 그림 7과 그림 8은

그 결과를 작물이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 도시한 것이다. 그림에 나타난 곡선들은 1회/min의 환기율에 의한 강제환기만에 의한 냉방을 대조구로 하고 차광시스템의 차광율과 Fan & Pad시스템의 효율에 따른 냉방 성능의 차이를 보여주고 있으므로 외기온(T_{amb})에 대한 실내기온의 조절범위를 확인할 수 있다. 대체적으로 작물의 유무에 따른 차이는 냉방방식에 따라 평균 0.3~1.0°C 정도이고, 작물이 왕성하게 자라고 있는 일반적인 온실의 경우 환기에만 의존할 경우에는 실내기온이 외기온 보다 평균 1.6°C 높으며, 50%의 차광상태에서 환기를 시킬 경우에는 실내

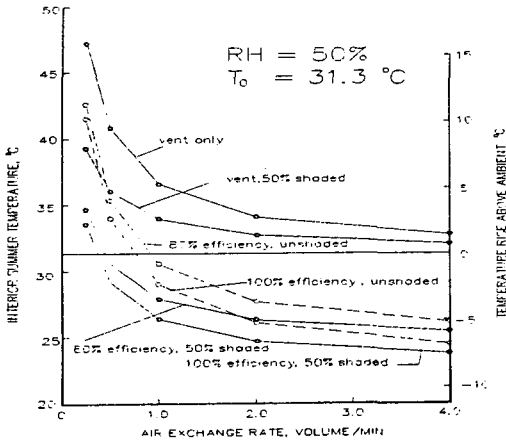


Fig. 4. The reduction in temperature in a ventilated greenhouse where incoming air is cooled by Fan & Pad system(glass covered).

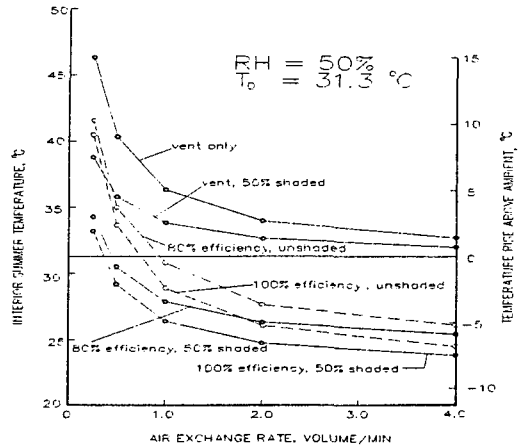


Fig. 6. The reduction in temperature in a ventilated greenhouse where incoming air is cooled by Fan & Pad system(PVC covered).

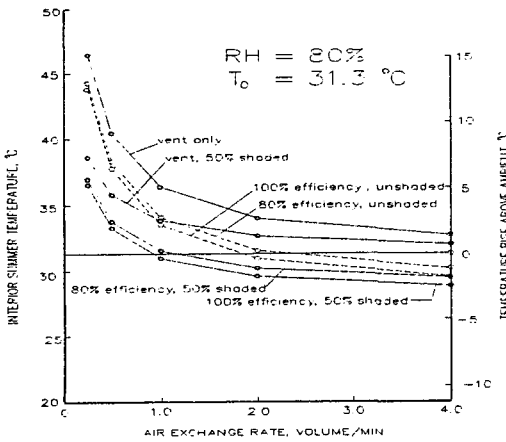


Fig. 5. The reduction in temperature in a ventilated greenhouse where incoming air is cooled by Fan & Pad system(PVC covered).

기온이 외기온에 가깝게 접근하게 된다. 그러나 80%의 효율을 가진 Fan & Pad 시스템을 작동할 경우에는 실내기온을 외기온 보다

1°C 낮게 유지할 수 있으며, 여기에 50%의 차광이 이루어질 경우에는 실내기온을 외기온 보다 2.3°C까지 낮게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결과는 일반 원형온실에서 평균적으로 관찰되는 현상과 유사한 것으로 판단된다. 따라서 본 미기상 예측모형을 온실의 계획과 예비설계에 이용함으로써 보다 효율적인 온실의 냉·난방 설계가 가능할 것으로 판단된다.

3. 살수식 냉방시스템

보온용 수막시스템에서와 마찬가지로 온실 내부기온에 영향을 미치는 요인이 수온(T_w)를 비롯하여 외기온(T_o), 살수율(Q) 등 다양하므로^{26, 35)} 제한된 실험자료에 근거하여 효과를 가늠하기는 어려우나 유량에 따른 온도변화가 예민하고 살수방법에 따라 조성되는 피복재와 수막의 접촉면적이 온도강하에 결정적인 역할을 한다¹⁰⁾는 것을 발견할 수 있었다. 이와 같은 사실은 온실의 표면을 얇은 천으로 덮어

Table 14. Simulated greenhouse air temperature under different cooling methods.

Cooling methods	Time(hour)	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Avr.
		Ambient	T_{dr}	23.8	24.6	25.4	26.1	26.8	27.5	27.7	27.9	28.0	27.6	27.2	26.8
	T_{dc}	18.6	19.2	19.7	20.3	20.9	21.6	21.8	21.9	22.0	21.8	21.6	21.5	21.5	21.0
full cropped	pad & fan +50% shade	22.2	22.5	23.3	23.6	25.0	25.8	26.0	26.0	25.7	25.3	24.4	23.8	22.0	24.3
	pad & fan only	22.3	23.1	24.7	25.2	27.6	28.4	28.5	28.2	27.5	26.5	25.1	24.0	22.8	25.7
	50% shade only	23.4	24.6	25.7	26.2	27.7	28.4	28.7	28.7	28.4	27.8	27.0	26.2	23.9	26.7
	control	23.5	25.4	27.2	27.9	30.3	31.1	31.4	31.2	30.3	29.1	27.6	26.4	24.7	28.2
non cropped	pad & fan +50% shade	22.5	22.7	23.6	23.9	25.5	26.2	26.5	26.4	26.1	25.5	24.6	23.9	22.3	24.6
	pad & fan only	22.6	23.5	25.3	25.8	28.7	29.5	29.7	29.2	28.3	27.0	25.4	24.2	23.3	26.3
	50% shade only	23.9	25.2	26.4	26.9	28.5	29.3	29.6	29.6	29.3	28.7	27.8	26.9	24.6	27.4
	control	24.0	26.0	28.0	28.7	31.7	32.6	32.8	32.4	31.5	30.2	28.6	27.2	25.7	29.2

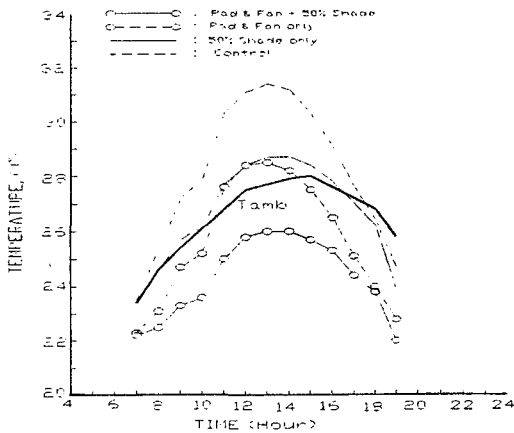


Fig. 7. Simulated greenhouse air temperature under fully cropped situation.

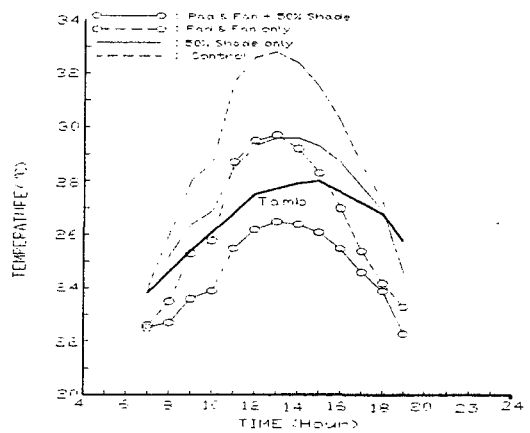


Fig. 8. Simulated greenhouse air temperature under uncropped situation.

살수된 수분이 피복면과 고르게 접촉케 한 경우에는 무처리 때에 비하여 냉방효과가 현저히 개선되는 현상에서도 확인할 수 있다.

그림 9는 살수식 냉방 실험을 통하여 관찰

되는 대표적인 온도환경이다. 비록 한정된 자료와 소규모 모형실험이라는 한계를 안고 있지만 살수시스템에 의한 냉방의 가능성을 발견할 수 있다.

일사가 차단된 27.5 ~ 28.5 °C 의 외기온 하에서 6.5~8.5°C의 냉수를 온실 바닥면적 1m²당 1.3 liter/min의 유량으로 온실표면에 살수했을 때 실내기온을 외기온 보다 10°C 낮은 16.5~18.0°C 정도로 낮출 수 있었다.

이 그림은 평균유량 1.34 liter/min으로 약 8°C의 냉수를 얇은 천으로 덮은 온실표면에 살수한 경우로서 살수가 개시된 시점으로부터 약 10분이 경과하면서 실내기온이 18°C 전후로 안정되었다가 살수 후 15분이 경과된 시점에서 젖은 천을 제거했을 때 실내기온의 상승과 동시에 유출수온이 하강하는 현상을 발견할 수 있다. 이와 같은 현상은 열교환 표면이 감소하는 만큼 실내기온이 상승하게 되면서 유출수온의 강하현상이 야기된 것으로 판단된다.

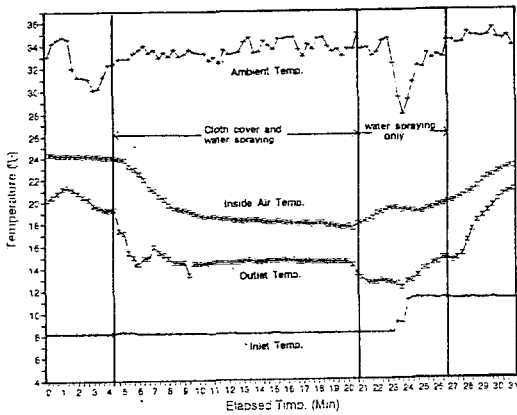


Fig. 9. Cooling of model greenhouse by spraying cool water on cover surface with and without wet cloth cover.

적 요

본 연구에서 수행한 Model 시뮬레이션에 의한 열환경 분석 기법은 지역별로 다양한 기상여건 하에서 대상온실의 난방 및 냉방부하를 보다 합리적으로 예측할 수 있을 뿐만 아니라

냉방이나 난방용 시스템의 결정을 비롯한 난방대책을 수립하고, 에너지 이용 전략의 수립이나 계절적인 작부계획 수립, 온실산업용 적지선정 등에 유익하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구에서는 온실의 적극적인 환경조절 유형을 난방과 냉방의 두 가지로 대별하고, 난방 소요열량 산정을 비롯하여 야간의 보온 커튼효과, Heating Degree-Hour 산정 등 난방과 관련된 시뮬레이션은 동적 모형을 이용하여 시간별, 일별 및 월별로 검토하였으며, 환기를 비롯한 차광, 증발냉각시스템의 효과 분석은 정적모형을 이용하여 검토하였다. 특히 하절기 지하수와 같은 저온수를 직접 이용하거나 Heat Pump를 통하여 확보될 수 있는 저온수를 이용하여 온실의 피복면에 살수함으로써 확보할 수 있는 온실냉방효과를 검토하는 데는 1.2m×2.4m 크기의 모형온실을 제작하여 기초실험을 수행함으로써 동절기의 수막시스템의 보온효과와 마찬가지로 하절기 냉방효과를 거둘 수 있다는 가능성을 확인하였다.

본 연구에 활용된 온실의 수치 환경모형 중 난방관련 시뮬레이션용 동적 수치모형은 소기의 목적을 달성하는데 충분히 응용될 수 있는 이론모형이다. 이 이론모형이 범용성이 높은 것은 온실 내·외의 미기상 변화, 특히 난방이나 냉방이 본격적으로 요구되는 기간동안에 온도, 습도, 일사, 풍속 등의 미기상 인자들을 면밀하게 관찰하여 실측된 자료를 바탕으로 개발되었고, 다양한 자료에 의해 충분히 검증되었기 때문이다.

본 연구에서는 경남 진주지역의 어느 특정기간(1987년)의 시간별 기상자료를 중심으로 온실의 열적 환경변화에 대한 수치모형 시뮬레이션을 실시하였으며, 아직 수치모형에 의한 시뮬레이션이 불가능한 일부 냉방효과를 검토하는 데는 모형실험을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다:

1. 주간과 야간의 설정온도를 달리하고 단단계 변온조절방식으로 시뮬레이션을 행한 결과 난방 소요열량은 난방 설정온도에 따라 현저한 차이를 보였다. 특히 주간 설정온도에

비하여 야간 설정온도가 난방 소요열량에 예민하게 영향을 미치므로 야간의 설정온도 결정에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

2. 기존의 Heating Degree-Hour 자료는 평균 외기온을 중심으로 임의의 설정온도에 대하여 산정된 값이므로 난방 소요열량에 대한 상대적인 비교수단은 되나 고려되는 기상인자의 제한과 설정온도의 임의성 때문에 실용성이 부족하다. 따라서 본 연구에서 제시된 것처럼 온실 주변의 제반 미기상인자나 경계조건이 반영됨은 물론 작물의 생육상태 및 구체적인 설정온도까지도 고려하는 동적 수치모형으로 시시각각으로 예측된 실내기온을 중심으로 재배기간 동안의 난방열량을 적산합이 합리적이라 판단된다. 기존의 HDH 자료로 난방설계를 할 경우에는 지나치게 과잉설계 될 가능성이 있다.

3. 산정된 난방 소요열량은 물론 커튼의 보온성능도 월별 기상여건에 따라 현저한 차이를 보이며, 시뮬레이션에 이용된 커튼의 경우 높은 보온효과를 보임으로서 년평균 50% 이상의 난방 에너지를 절감할 수 있으며, 동절기 3~4개월의 집중 난방기에 에너지가 크게 절감됨을 발견할 수 있다.

4. 고온기 환기성능은 온실의 구조, 기상조건, 작물의 생육상태 등에 따라 다소의 차이가 있으나 환기율에 의해 크게 좌우되며, 시뮬레이션에 이용된 두 가지 농가보급형 온실 모두 환기율의 증가에 따른 실내기온의 강화효과가 환기율이 1회/min 정도를 넘어서면서 급격히 둔화되는 현상을 보인다. 이는 기존에 권장되고 있는 적정 환기율인 1회/min 전후의 환기 시스템을 갖추는 것이 합리적임을 확인해 준다.

5. 작물이 성숙된 유리온실에서 외기의 상대습도가 50%인 쾌청한 주간동안 연속적으로 1회/min로 환기를 시킬 경우 실내기온 36.6°C의 대조구에 비한 온도강하는 50% 차광만 했을시 2.6°C이고 효율 80%의 Pad & Fan 시스템만 작동시 6.1°C 정도이며, 차광과 냉각시스템을 동시에 작동시는 약 8.6°C로서 외기온보다 3.3°C가 낮은 28°C까지 실내온도를 낮출

수 있으나, 동일조건하에서 외기의 상대습도가 80%로 높은 경우에는 Pad & Fan 시스템에 의한 온도강하가 2.4°C에 불과하여 50% 차광하에서도 외기온 이하로 실내온도를 낮출 수 없음을 알 수 있다..

6. 하절기 3개월(6/1~8/31)동안 Pad & Fan 시스템의 냉방효과(ΔT)는 설정된 작동온도에 따라 다소 차이를 보일 것으로 예상되나 본 시뮬레이션에서 설정한 시스템의 작동온도 27°C에서 상대습도와 상관계는 대략 다음과 같았다:

$$\Delta T = -0.077RH + 7.7$$

7. 전형적인 하절기 주간기상하에서 경시적 냉방효과를 분석한 결과 환기만으로는 실내기온을 외기온 보다 5°C 높게 유지하는 정도가 고작이고, 차광이나 증발식 냉방시스템 만으로는 작물이 성숙한 단계에서조차도 외기온 이하로 떨어뜨리기가 어려우나 차광과 아울러 증발식 냉방을 병행할 경우에는 작물상태에 따라 다소 차이는 있지만 실내기온을 외기온보다 2.0~2.3°C 낮게 유지할 수 있음을 발견할 수 있다.

8. 일사가 차단된 27.5~28.5°C의 외기온하에서 6.5~8.5°C의 냉수를 온실 바닥면적 1m² 당 1.3 liter/min의 유량으로 온실표면에 살수했을 때 실내기온을 외기온보다 10°C 낮은 16.5~18.0°C 정도로 낮출 수 있었다. 앞으로 살수 수온(T_w)이나 외기온(T_o) 뿐만아니라 살수율(Q)에 따라 온실기온(T_g)에 미치는 상관관계 $T_g = f(T_w, Q, T_o)$ 를 구명하여 지하수 자체 또는 Heat Pump를 이용한 지하수온 이하의 냉수로 온실냉방의 가능성을 구명하는 것이 앞으로의 과제이다.

인용문헌

1. 高倉 外. 1985. 農業環境調節工學. 朝倉書店. 日本. pp. 224.
2. Tadashi Takakura. 1993. Climate under Cover. Kluwer Academic Publishers.

- Japan. pp. 155.
3. Robert W. Langhans. 1980. Greenhouse Management. Halcyon press of Ithaca. U. S.A. pp. 239.
 4. Robert A. Aldrich. 1992. Greenhouse Engineering. Cooperative Extension. U.S.A. pp. 203.
 5. James H. Whitaker. 1979. Agricultural Buildings and Structures. Reston Publishing Company. U.S.A. pp. 530.
 6. 徐元明 外. 1988. 農業施設工學 . 서울大學校出版部. pp. 490.
 7. 農漁村振興公社 農漁村研究院. 1993. 園藝施設の構造設計指針. 경북대 농업과학기술연구소 보고서. pp. 50
 8. 徐元明. 1993. 기상이변에 따른 남부지방의 적설 피해와 경감대책. 施設園藝研究 6(2) : 28-45.
 9. 朴重春. 1993. 농가보급형 온실의 특성과 표준모델. 施設園藝研究 6(2) : 10-28
 10. 徐元明. 1991. 태양열 에너지의 저장과 탄산가스 조작기능을 갖춘 Solar Greenhouse의 수학적 범용 모형화를 위한 실험연구. 韓國科學財團 研究報告書. pp. 296.
 11. Suh, W.M. 1986. Modeling of a greenhouse equipped with a solar rockbed system and with carbon dioxide enrichment. Dissertation in Ag. Engg., The Kansas State Univ., Manhattan, KS.
 12. 이석건 역. 1992. 農業環境調節工學. 敎保文庫. pp. 329.
 13. Mylo A. Hellickson 外. 1983. Ventilation of agricultural structures. ASAE. U.S.A. pp. 372.
 14. 渡部一郎 外. 1991. 果樹の施設栽培と環境調節. 轉友社. 日本. pp. 370.
 15. 農漁村振興公社 農漁村研究院. 1993. 園藝施設の構造安全基準 作成(1). 경북대 농업과학기술연구소 연구보고서. pp. 201.
 16. 日本施設園藝協會. 198. 園藝用施設安全構造基準. 日本施設園藝協會. 日本. pp. 143.
 17. Joe J. Hanan 1978. Greenhouse Management. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. U.S.A. pp. 532.
 18. David P Shelton 외. 1984. Variable Base Heating Degree-Day Data, Transaction of ASAE. U.S.A. pp. 1887-1890.
 19. Duffie, J.A., and W.A. Beckmen. 1980. Solar energy thermal process. John Wiley and Sons, New York, NY.
 20. 이용범. 1985. 시설원예 재배환경 안전기준 설정연구. 농시논문집 27(1) : 1-5.
 21. 三原義秋. 1978. 日照を考察した溫室暖房 Degree-Hour 算定式. 農業氣象 34(2).
 22. 林眞紀夫, 古在豊樹. 1982. 各種暖房 Degree-Hour 算定値と實測値の比較によひ暖房 Degree-Hour線圖の提案. 農業氣象 38(1).
 23. Mylo A. Hellickson 외. 1983. Ventilation of Agricultural Structures. ASAE. USA. pp. 372.
 24. C Kittas. 1995. A simple climagraph for characterizing regional suitability for greenhouse cropping in Greece. Agri. and Fore. Meteor. pp. 133-141.
 25. Heinemann, P.H., and P.N. Walker. 1986. Modeling heat loss from surface heated greenhouse water. TRANSACTIONS of the ASAE 29(5): 1378-1384.
 26. Inowoe, Isigawa, Aoki. 1981. Experiment on water curtain system: The temperature difference between inside and outside greenhouse air. Proceeding of the 57th fall meeting on vegetable section. pp. 320-321.
 27. Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. Trans. of the ASAE. 23(5).
 28. Meijer, J. 1980. Reduction of heat losses from greenhouse means of internal blinds with low thermal emissivity. Journal of AE. Research, 25.
 29. Rotz, C.A. and R.A. Aldeich. 1979.

- Feasibility of greenhouse heating in Pennsylvania with power plant waste heat. TRANSACTION of the ASAE 22 (6):1375-1379.
30. Seginer, I., and N. Levav. 1971. Models as tools in greenhouse climate design. Ag. Engg. Station, No. 115. Technion-Israel Inst. of tech. Heifer, Israel.
31. Takakura, T., K.A. Jordan, and L.L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. Trans. of ASAE, 14(5).
32. Walker, P.N. 1978. Surface heating greenhouse with power plant cooling water. TRANSACTIONS of the ASAE 21(2): 322-328.
33. Walker, P.N. 1979. Greenhouse surface heating with power plant cooling water; Heat transfer characteristics. TRANSACTIONS of the ASAE 22(6): 1370-1380.
34. Walker, P.N., S.S. Lazarus, and J.B. Braden. 1982. Surface heating greenhouse:microeconomics. TRANSACTIONS of the ASAE 25(2): 408-412.
35. Walker, P.N., J.N. Scarborough, and H.J. Rand. 1982. An experimental surface-heated greenhouse. TRANSACTIONS of the ASAE 25(4): 1022-1025.
36. ASHRAE Guide and Data Book Fundamentals. 1981. Americal Society of Heating Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. New York.