

## 열수지 해석에 의한 온실 수경재배 작물의 증산속도 추정에 관한 연구

남 상 운 · 김 문 기\*

서울대학교 대학원  
서울대학교 농공학과\*

### The Estimation of Transpiration Rate of Crops in Hydroponic Culture in the Plastic Greenhouse

Sang-Woon Nam · Moon-Ki Kim\*

Seoul National Univ.  
Seoul National Univ. College of Agriculture Dept. of Agricultural Engineering.\*

#### 요 약

온실 수경재배 작물의 증산속도와 환경요인과의 관계를 규명할 목적으로 플라스틱 온실 내부 작물의 엽면 열수지식을 해석하여 온실 내부의 환경요인에 따른 엽온 및 증산속도를 추정할 수 있는 컴퓨터 모형을 개발하였다. 여기서 개발된 모형은 실제 플라스틱 온실에서 실시한 상추의 수경재배 실험 결과를 이용하여 검증하였으며, 앞으로 다른 작물에 대한 연구가 보완된다면 이 모형을 이용하여 시설재배 작물의 물관리 연구 및 열환경 분석에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### ABSTRACT

The main objective of this study was to find the relationship between transpiration rate and environmental factors for crops in hydroponic culture within plastic greenhouse by using the computer model developed from the heat balance around leaves of a crop.

A computer model was developed and verified through comparison with the experimental results for lettuce in hydroponic culture in a polyethylene film house.

The model may be extensively used for the water management and thermal environment study of crops in protected culture, if the supplemented studies for some crops would be accomplished.

## 1. 서론

온실내의 수경재배작물에 있어서 증발산량의 중요 구성부분인 증산속도를 환경요인의 영향에 따라 정량적으로 밝히는 것은 시설재배 및 환경조절공학적 입장에서 매우 중요한 과제로 생각된다.

증산작용의 통로가 되는 식물의 엽면 주변에서의 열수지식의 구성요소는 잎으로부터 입사 또는 방출되는 순복사량, 현열량, 잠열량으로 크게 나눌 수 있다. 이들 구성요소는 여러가지 기상환경요소, 기공개도, 증산잠열등의 요인이 복합적으로 연결되어 있으므로, 열수지식의 적절한 해석을 통하여 기상환경요인, 기공개도, 엽온, 증산속도 등의 상호관계를 밝힐 수 있을 것으로 판단된다.

식물잎의 열수지식을 해석하여 증산과 기상요소와의 관계를 밝힌 시도는 Raschke<sup>1)</sup>, Linacre<sup>6)</sup>, Gates<sup>2)</sup> 및 Haseba<sup>3)</sup> 등 여러 학자들에 의해서 수행된바 있다. 그러나 경지상의 작물을 대상으로 한 것 뿐으로 온실 내부의 작물에서는 열전달에 있어서 상당한 차이를 보인다.

또한 그간 많이 수행되어온 플라스틱 온실에 대한 열적환경 시뮬레이션 중의 물질전달 분석에서도 작물이 없는 것으로 간주하는 경우가 많았고, 작물을 고려했다 해도 수분확산저항치를 가정해서 사용하는 등 온실작물의 증산속도를 추정하는데는 많은 어려움이 있었다.

이와같은 배경하에서 설정된 본 연구의 목적은 첫째 온실 수경재배작물에 대하여 온실내부 환경요인으로 부터 엽온 및 증산속도를 추정하기 위한 엽면열수지식을 해석적으로 구성하여 이를 컴퓨터 모형화 하고, 둘째 온실 수경재배상추를 선택하여 온실내부의 환경요인, 엽온 및 증산속도를 계측하고, 그 결과를 개발된 모형에 적용하여 모형의 응용성을 검토하며, 셋째 개발된 모형에 의하여 온실 수경재배작물에 있어서, 기상환경요인이 증산속도에 미치는 영향을 추정하는데 있다.

## 2. 엽면 열수지식의 구성

온실내의 작물의 온도는 재배 밀집상태, 작

물의 종류 및 크기에 따라 작물의 각 부위별로 약간의 차이가 있다. 그러나 작물을 개개로 보지않고 작물군으로 보아 균일하다고 가정하였으며 양액과 접촉하고 있는 작물줄기와 양액, 그리고 작물과 수경베드(발포스치로폴) 사이의 열전달은 무시하였다. 작물의 열평형에 관련된 항목으로는 낮 동안 작물이 받는 일사량, 내부공기와의 대류열전달, 작물의 복사열전달, 작물의 증산작용에 의한 잠열 등이 있다. 즉, 온실작물의 잎의 표면으로 또는 표면으로부터 전달되는 에너지는 정상상태를 가정할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다. (Fig.1)

$$Q_{abs} = R + C + LE \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $Q_{abs}$ 는 작물에 흡수되는 일사량,  $R$ 은 작물의 복사열교환,  $C$ 는 내부공기와의 대류열전달,  $LE$ 는 작물의 증산작용에 의한 잠열이다. (cal / cm<sup>2</sup> / hr)

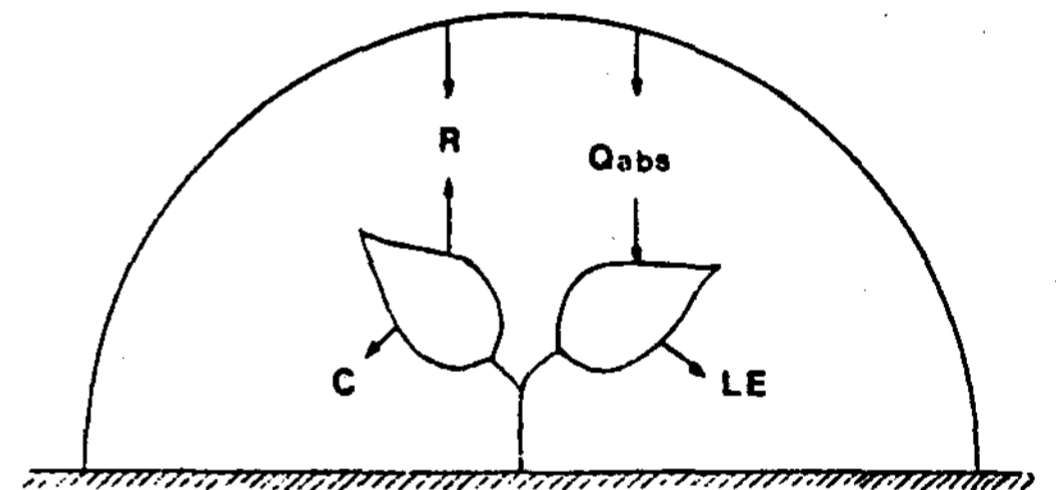


Fig.1 Thermal balance for plant canopy in plastic greenhouse

### 2.1 태양복사에너지

온실내의 일사량을  $I_{sr}$ 이라 하면 작물이 흡수하는 일사량은 다음식과 같다.

$$Q_{abs} = I_{sr} \frac{23.9(1 - \gamma_p + \gamma_p \cdot \gamma_{dc})}{3600 LAI} \dots (2)$$

여기서,  $\gamma_p$ 는 작물의 태양광 반사율,  $\gamma_{dc}$ 는 온실피복재의 산란광 반사율,  $LAI$ 는 엽면적지수(leaf area index)이다.

### 2.2 작물의 복사열전달

복사열전달은 대단히 복잡한 현상으로 모든 조건을 고려하여 이론적으로 분석하기는 거의

불가능하므로 복사열전달을 보다 용이하게 분석하고자 다음과 같은 가정을 하였다. 즉, 온실내 복사열 교환 매체인 피복재 및 작물의 표면은 회체(gray body)이고, 각각의 표면은 그 표면에서 등온(isothermal)으로, 온실내부공기는 복사열교환에 관여하지 않는 것으로 가정하였으며, 온실지표면(발포스티로폴의 수경베드)과 작물 사이의 복사열교환은 무시하였다.

작물과 온실피복재와의 복사열전달은 다음식과 같다.

$$R = \frac{\sigma(T_p^4 - T_c^4)}{LAI \{1/E_p + (A_p/A_c)(1/E_{cl} - 1)\}} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma$ 는 Stefan-boltzman 상수,  $E_p$ ,  $E_{cl}$ 는 작물 및 피복재 하면의 방사율,  $T_p$ ,  $T_c$ 는 작물 및 피복재온도,  $A_p$ ,  $A_c$ 는 작물재배면적, 피복재 표면적이다.

### 2.3 온실내부공기와 작물과의 대류열전달

온실내부공기와 작물과의 대류열전달은 다음식으로 정의된다.

$$C = 2H_{pa}(T_p - T_a) \cdot S_{hf} \quad (4)$$

여기서,  $H_{pa}$ 는 작물과 주변공기와의 대류열전달계수,  $S_{hf}$ 는 작물의 열전달 저항계수이다. 여기서 열전달 저항계수  $S_{hf}$ 는 작물의 종류, 재배상태등에 따라서 결정되는 상수이다. 작물의 대류열전달 현상은 엽면의 상하에서 일어나므로 식(4)에서 상수 2를 곱하게 된 것이다.

Haseba<sup>3)</sup>는 작물과 주변공기와의 대류열전달계수를 다음식과 같이 정의하였다.

$$H_{pa} = H_f + H_n \quad (5)$$

여기서  $H_f$ 는 강제대류에 의한 엽면 열전달계수로서 다음식과 같다.

$$H_f = 0.332 \alpha Pr^{1/4} Re^{1/2} \frac{k_a}{\ell} \quad (6)$$

여기서,  $Pr$ 은 Prandtl 수,  $Re$ 는 Reynolds 수,  $k_a$ 는 공기의 열전도율,  $\ell$ 은 잎의 특성길이,  $\alpha$ 는 엽형계수이다.  $H_n$ 은 자연대류에 의한 엽면 열전달계수로서 다음 식과 같다.

$$H_n = 0.205 \alpha Pr^{1/4} Gr^{1/4} \frac{k_a}{\ell} \quad (7)$$

여기서,  $Gr$ 은 Grashof 수이다.

### 2.4 작물의 증산에 의한 잠열

잠열량은 평균수분확산(증산)속도  $E$ 와 수분잠열  $L$ 의 곱이다. 온실내부공기와 작물사이의 증산속도에 대하여 Nobel<sup>6)</sup>은 다음과 같이 정의하였다.

$$E = 2 \rho \frac{(W_p - W_a)}{R_p} S_{mf} \quad (8)$$

여기서,  $W_p$ 는 작물온도에서의 내부공기의 포화습도비,  $W_a$ 는 온실내부공기의 습도비,  $R_p$ 는 작물의 증산저항(sec/cm),  $S_{mf}$ 는 작물의 물질전달 저항계수이다. 작물의 증산저항  $R_p$ 는 태양에너지의 영향을 직접적으로 받게되며 이것은 작물의 엽면경계층저항과 엽내기공저항으로 나누어지게 된다.

$$R_p = R_{av} + R_v \quad (9)$$

작물의 엽면에서 주변공기와의 수분확산은 근본적으로 대류열전달 현상과 동시에 일어난다. Campbell<sup>1)</sup>과 Murphy and Knoerr<sup>7)</sup>는 엽면경계층저항을 다음식으로 정의하였다.

$$R_{av} = \frac{\rho \cdot C_p}{H_{pa}} Le^{-0.67} \quad (10)$$

여기서,  $C_p$ 는 공기의 비열,  $Le$ 는 Lewis 수 이다.

Nobel<sup>6)</sup>은 기공저항  $R_v$ 를 기공개도의 함수로서 다음과 같이 정의하였다.

$$R_v = \frac{D_{st} + R_{st}}{D_j \cdot n \cdot A_{st}} \quad (11)$$

여기서,  $D_{st}$ 는 기공깊이,  $R_{st}$ 는 기공반경,  $A_{st}$ 는 기공의 유효면적(개도면적),  $D_j$ 는 수증기확산계수,  $n$ 은 단위엽면적당 기공수이다.

## 3. 열수지식의 컴퓨터 모형화

### 3.1. 모형의 컴퓨터 프로그래밍

위에서 유도된 플라스틱 온실내 작물의 엽면 열수지식을 분석하기 위하여 수치해석방법을 이용하였다. 작물의 열전달 현상은 정상상태로 간주하였으며 Modified Newton-Raphson 방법을 이용하여 해석하였다. 프로그램 작성에 사용된 언어는 FORTRAN 77이며 컴퓨터 프로그램의 흐름도는 Fig.2와 같다.

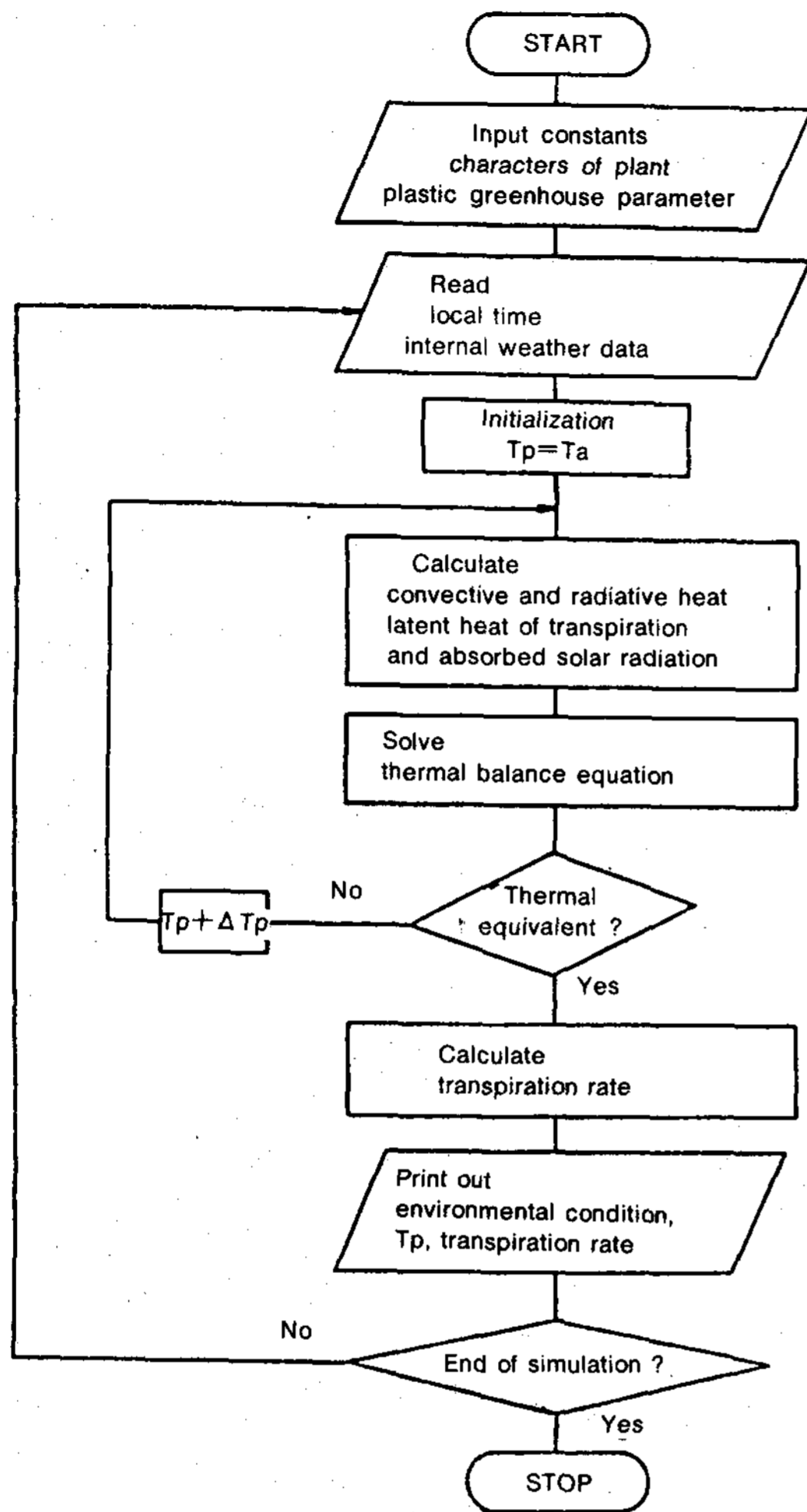


Fig.2 Flow chart of the computer program for estimation of transpiration rate in the plastic greenhouse

컴퓨터 프로그램의 주요 입력자료는 다음과 같다. (Table.1)

〈입력자료〉

- 1) 잎의 특성길이 2) 엽면적지수 3) 온실피복재, 온실지표면 및 작물 재배면적 4) 엽면적당 기공의 수 및 기공크기 5) 온실내부의 건구온도, 습구온도, 일사량, 풍속 6) 작물의 열 및 물질전달 저항계수 7) 온실피복재 온도 8) 온실피복재 및 작물의 복사열 방사율.

위의 자료들로부터 프로그램이 수행된 후에 얻어지는 출력 자료는 다음과 같다.

〈출력자료〉

- 1) 온실내부공기의 상대습도 및 엽온 2) 온실내부작물의 대류, 복사, 잠열 등의 열전달량과 증산속도.

Table 1. Parameter for plastic greenhouse used in the computer model

Symbol	Description	Reference number	Value	Unit
$A_c$	Area of plastic greenhouse cover	Measured	203.52	$m^2$
$A_p$	Area of plants	Measured	6.4	$m^2$
$l$	Characteristic length of leaf	Measured	10.4	cm
LAI	Leaf area index	Measured	1.12	
$\gamma_p$	Solar radiation reflectivity of plant	13	0.15	
$\gamma_{dc}$	Solar diffusion radiation reflectivity of cover(P.E film)	13	0.13	
$E_p$	Thermal radiation emissivity of plant	13	0.98	
$E_{c1}$	Thermal radiation emissivity of cover	13	0.96	
$S_{ht}$	Convective heat transfer resistance factor of plant	13	1.0	
$S_{mt}$	Mass transfer resistance factor of plant	13	0.8	
$C_p$	Specific heat of air	4	0.24	cal/g °C
$D_j$	Diffusion coefficient of water vapor	12	0.256	cm/sec
$D_{st}$	Depth of stomatal pore	Measured	86	$\mu m$
$R_{st}$	Radius of stomatal pore	Measured	4.3	$\mu m$
$n$	Number of stomates per unit leaf area	Measured	4500	upper
			29300	lower
$a$	coefficient of leaf shape	Estimated	1.2	

### 3.2 컴퓨터 모형의 검증

앞에서 개발된 컴퓨터 모형을 검증하기 위하여 실제로 시설원에 재배농가에서 많이 사용하고 있는 폴리에틸렌 필름 피복의 플라스틱온실(수원 소재 서울대학교 농과대학 부속 실험농장의 온실)내에 액순환식 수경재배 장치를 설치하고, 임의 선정된 공시작물에 대하여 관계되는 요인을 실측한 후, 이를 근거로하여 모형검증을 실시하였다.

실험조건은 Table.2와 같고, 측정항목 및 측정방법은 다음과 같다.

#### 3.2.1 증산속도

증산속도는 Fig.3과 같이 재배베드의 양액깊이가 일정하게 유지되도록 밸브를 설치하고, 베드에 공급되는 급액량과 베드로부터 배제되는 배수량을 측정하여 그 손실유량을 계산한 후 베드상면의 증발속도를 차감하여 구하였다. 여기서 베드상면의 증발속도는 정식직전에 배배시와 같은 조건의 베드로부터 실측한 값을

사용하였다.

Table 2. Experimental condition

Item	Description
Crop	Lettuce
Plant density	16 plant/m <sup>2</sup>
Nutrient solution composition	K: 2.89me/l Ca: 3.99 Mg: 3.91 NO <sub>3</sub> : 19.22 PO <sub>4</sub> : 19.22 Fe: 0.01 SO <sub>4</sub> : 3.91 NH <sub>4</sub> : 0.75
Nutrient solution circulation	1min-ON 9min-OFF
Nutrient solution temperature	15.0~25.0°C
Air temperature	Daytime 25~35°C. Nighttime 5~15°C
EC	1.5~2.0ms/cm
pH	5.5~6.0
Experimental period	Mar.11~May.6. 1989

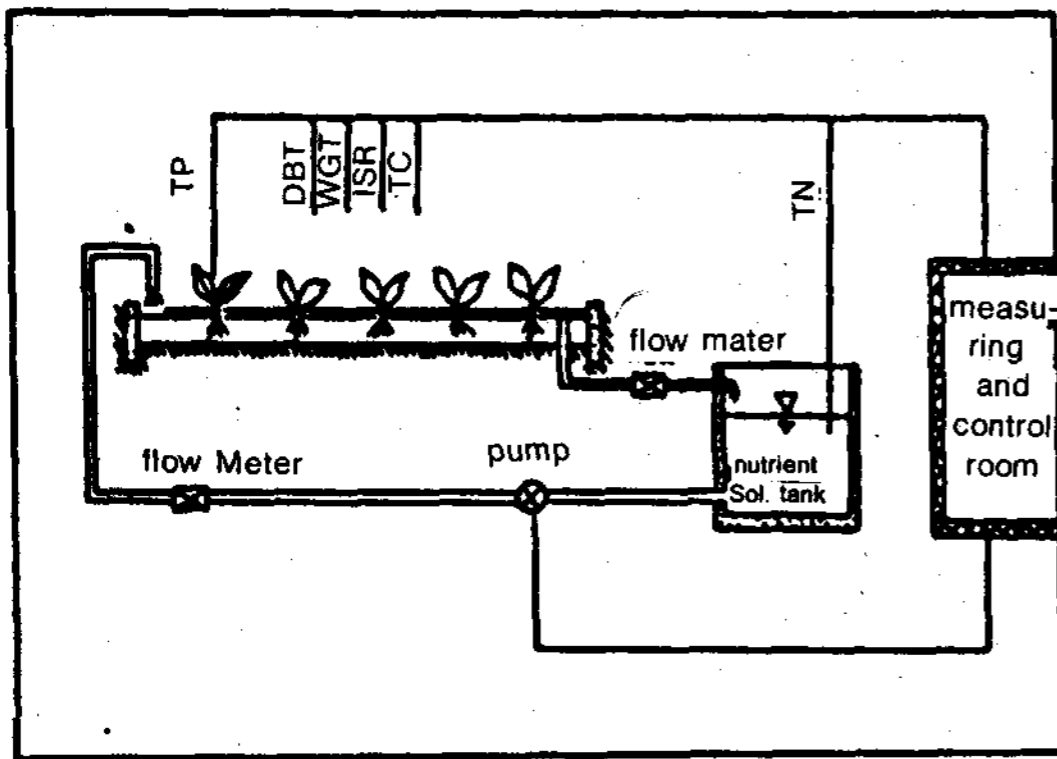


Fig.3 Layout of transpiration rate measuring system in hydroponic culture.

### 3.2.2 온실내부 환경요인

일사량은 전천일사계를 온실 중앙에 설치하여 측정하였고, 기온은 백금측온저항체를, 엽온 및 온실피복재 온도는 T-type thermocouple를 이용하여 측정하였다. 상대습도는 건구온도와 습구온도를 측정하여 계산으로 구했고, 위의 측정항목들은 16bit IBM PC 및 Multiplex data logger를 이용하여 10분 간격으로 기록하였다.

### 3.2.3 작물의 특성

현미경을 이용하여 기공의 수 및 크기를 측정하였고, 정식에서 수확까지 잎의 특성길이, 생체중, 엽면적을 일정간격으로 측정하였다.

본 연구에서 개발된 컴퓨터 모형의 타당성을 검증하기 위하여 1989년 5월 2일의 실측치를

컴퓨터 모형에 의한 추정치와 비교하였다. Fig.4는 5월 2일의 플라스틱 온실 내부의 기온, 상대습도, 일사량 및 피복재온도를 표시한 것이다. Fig.5,6은 온실내부의 환경조건에 따른 엽온 및 증산속도의 변화에 대하여 실측치와 컴퓨터 모형에 의한 추정치를 비교한 것이다. 여기서 환기에 의한 온실 내부의 풍속은 측정이 용이하지 않고, 또한 작물의 엽면 주변에서의 풍속은 미소하므로 이를 무시하여 작물과 주변공기 사이의 대류열전달 현상은 자연대류로 간주하였다.

그림에서 살펴보면 엽온은 주간인 경우 실측치가 추정치보다 약간 낮게, 야간의 경우 실측치가 추정치보다 약간 높게 나타나고 있는데 이는 엽온의 실측에 있어서 근근역이 접하고 있는 양액 온도의 영향을 받았기 때문으로 판단되며, 증산속도에 있어서는 실측치와 추정치가 상당히 잘 일치하고 있다.

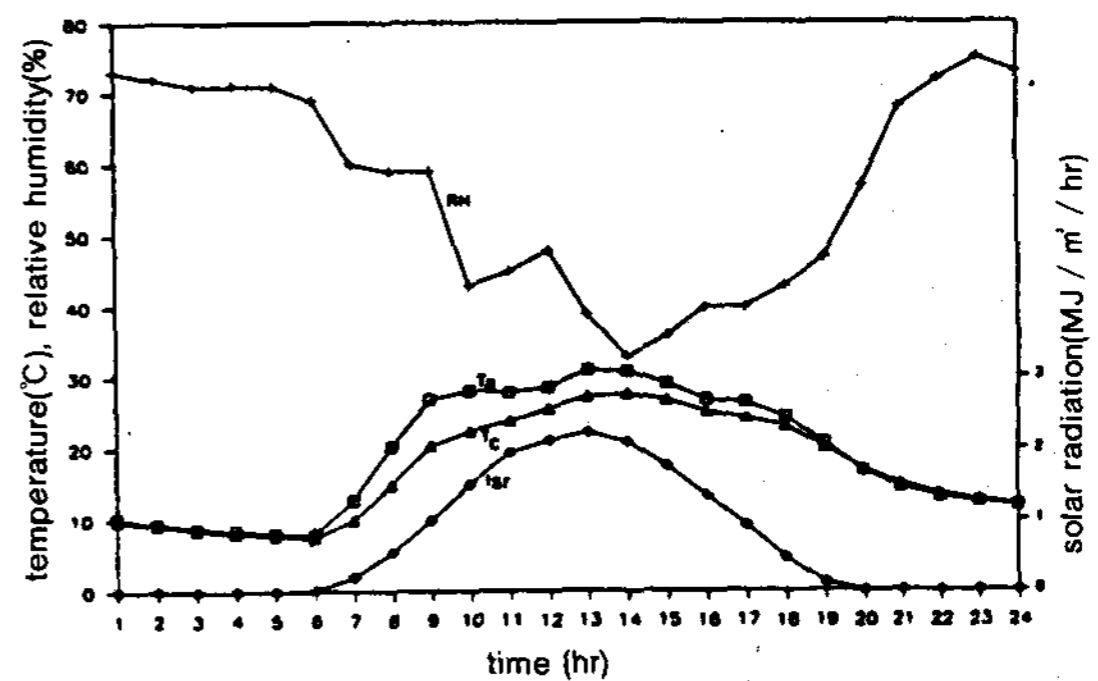


Fig.4 Change of weather in the plastic greenhouse(May 2, 1989)

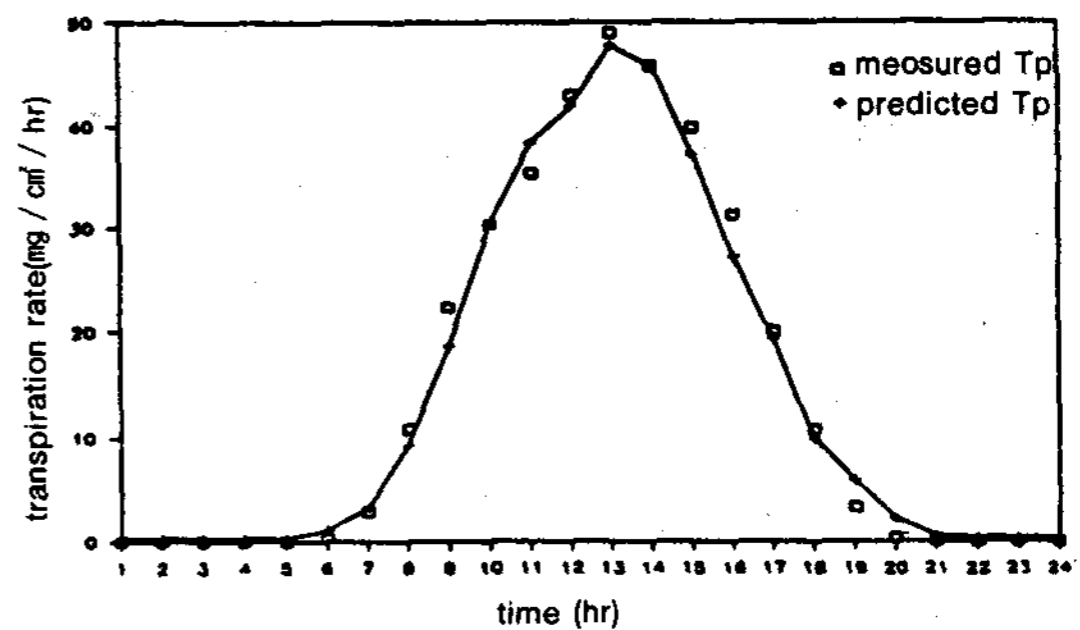


Fig.5 Predicted and measured transpiration rate in the plastic greenhouse(May 2, 1989)

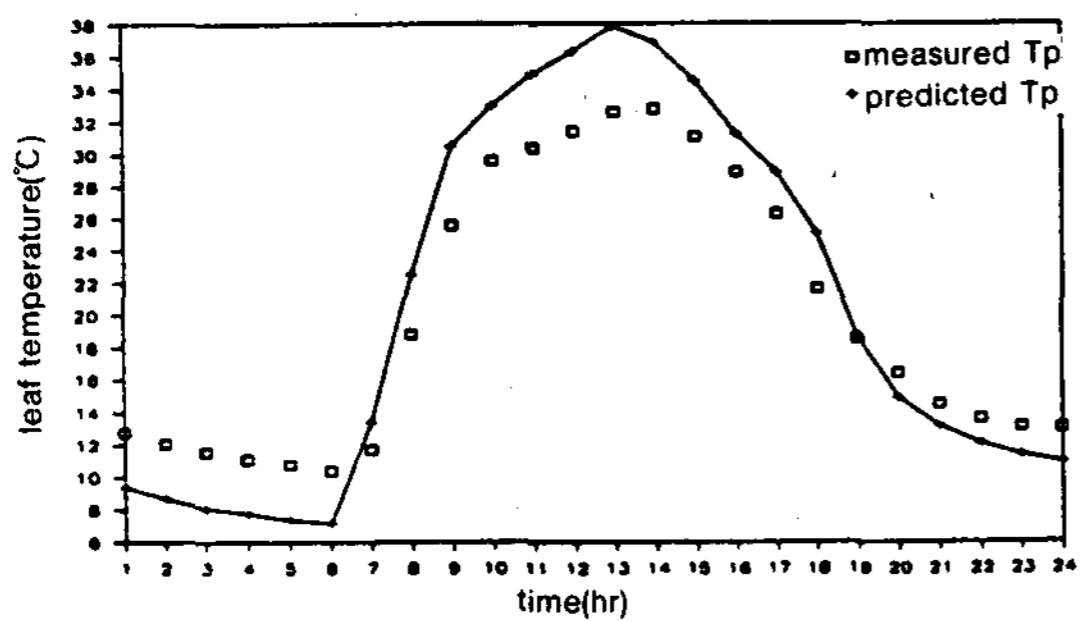


Fig.6 Predicted and measured leaf temperature in the plastic greenhouse(May 2, 1989)

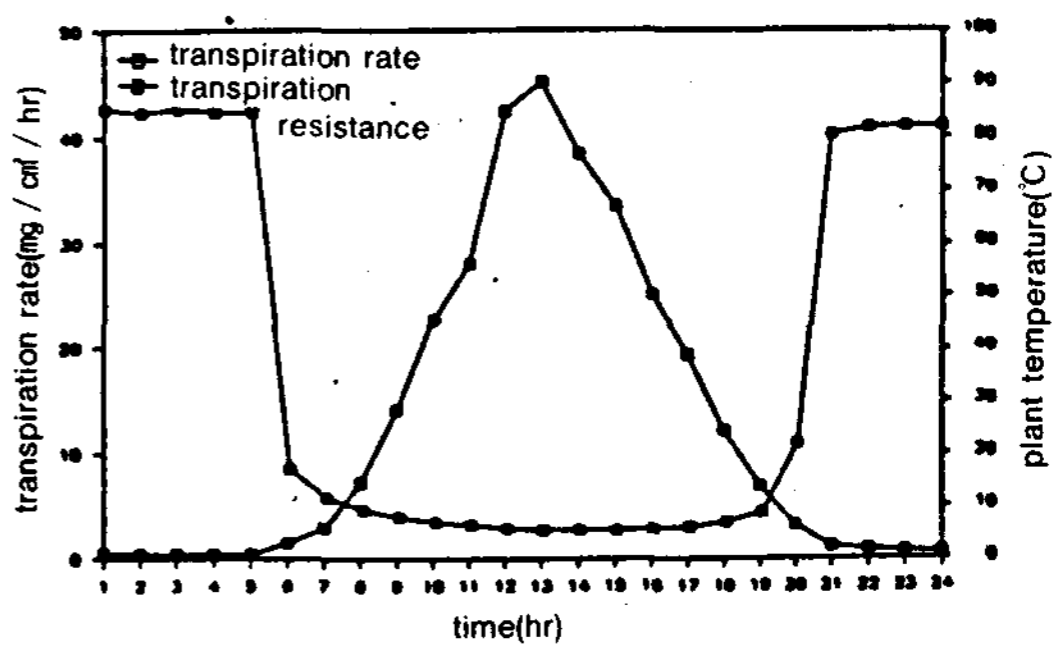


Fig.7 Estimated transpiration rate and transpiration resistance of lettuce in hydroponic culture(May 4, 1989)

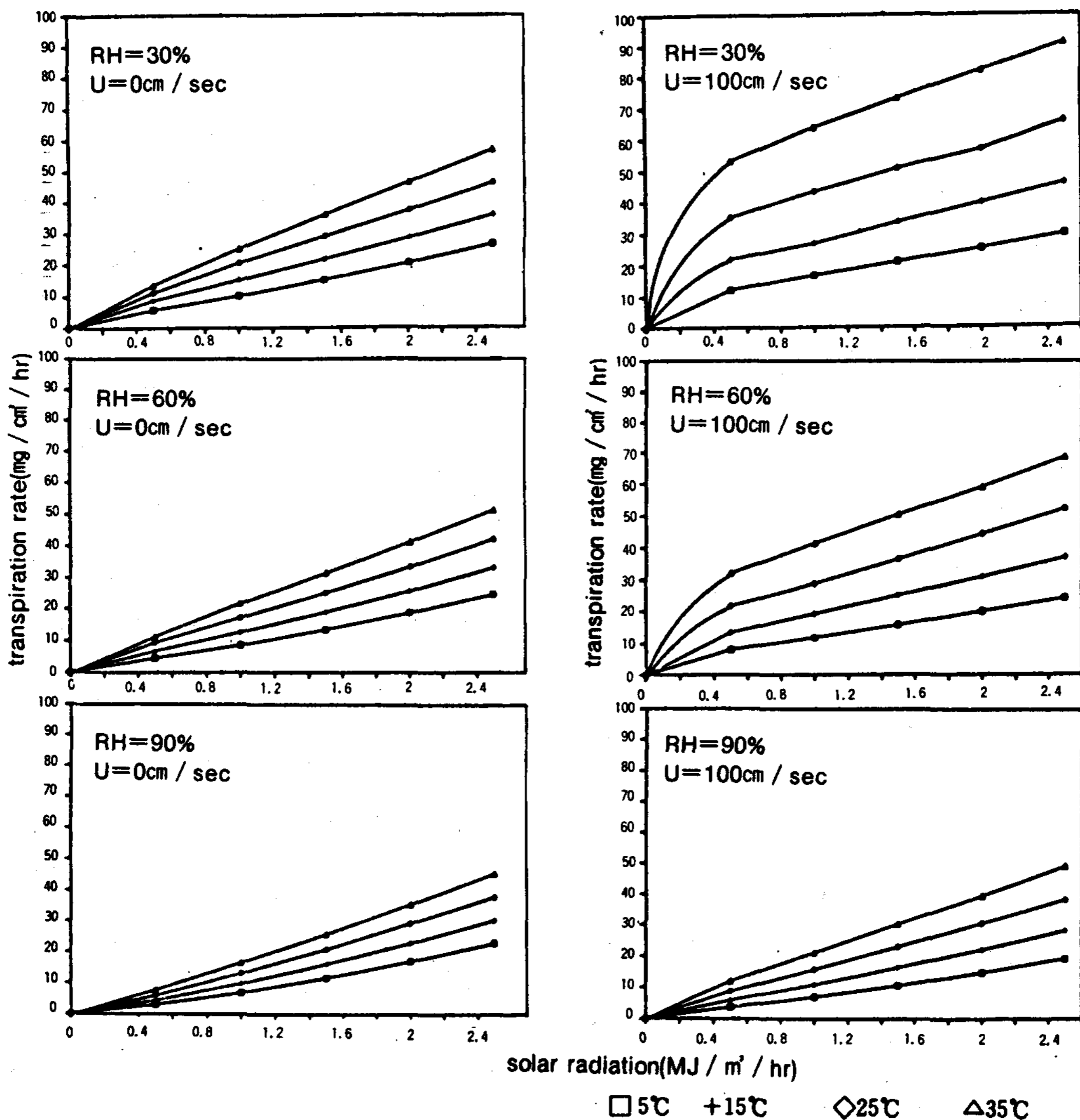


Fig.8 Relations between transpiration rate and environmental factors



#### 4. 증산속도와 환경요인과의 관계

온실내부 환경요인에 따른 수경재배 상추의 증산저항 및 증산속도의 변화를 알아보기 위하여 본 연구의 컴퓨터 모형에 앞의 특성길이 10cm, 엽면적지수 1.2, 기공의 직경  $8.6\mu\text{m}$ , 단위면적당 기공의 수는 앞의 전면 4,500, 후면 29,300으로 하고, 89년 5월 4일의 기상자료를 이용하여 추정해본 결과 Fig.7과 같은 결과를 얻었다.

증산저항의 변화는 주간에 5~20 sec/cm, 야간에는 80~100 sec/cm의 범위를 보였고, 증산속도는 일사량이  $2.0\text{ MJ/m}^2/\text{hr}$  이상인 한낮에는  $40\sim 50\text{ mg/cm}^2/\text{hr}$ , 해 뜬무렵과 해 질무렵에는  $2\sim 5\text{ mg/cm}^2/\text{hr}$  정도를 보였다.

Fig.8은 환경요인에 따른 증산속도의 변화를 알아보기 위하여 위와 같은 조건하에서, 각 환경요인들을 변화시키면서 증산속도를 추정해본 것이다.

증산속도는 환경요인에 따라 큰 차이를 보이고 있지만 일사량에 따라 증가하고 상관관계가 정으로 높게 나타나고 있으며, 기온이 높고 습도가 낮을수록 또 풍속이 클수록 급격히 증가함을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

플라스틱 온실내 수경재배 작물의 증산속도와 환경요인과의 관계를 규명할 목적으로 수행한, 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 온실 수경재배 작물에 대하여 작물과 온실 피복재 사이의 복사열교환을 고려한 엽면 열수지식을 해석적으로 구성하였으며, 온실 내부의 환경요인(기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 피복재온도)의 변화에 따른 엽온 및 증산속도를 추정할 수 있는 컴퓨터 모형을 개발하였다.
- 2) 여기서 개발된 컴퓨터 모형은 실제 플라스틱 온실에서 실시한 수경재배 상추의 실측 결과를 이용하여 검증하였으며, 상추의 엽

온과 증산속도에 있어서 실측치와 추정치는 비교적 잘 일치하였다.

- 3) 모형을 이용하여 맑은날 성숙기 상추의 증산저항 및 증산속도를 추정해본 결과, 증산저항은 주간에 5~20 sec/cm, 야간에는 80~100 sec/cm로 나타났고, 증산속도는 일사량이  $2\text{ MJ/m}^2/\text{hr}$  이상인 한낮에는  $40\sim 50\text{ mg/cm}^2/\text{hr}$ , 해 뜬무렵과 해 질무렵에는  $2\sim 5\text{ mg/cm}^2/\text{hr}$  정도를 보였다.
- 4) 본 연구에서 개발한 컴퓨터 모형이 플라스틱 온실내 상추의 증산속도 추정에 잘 적용이 되었으나, 앞으로 다른 작물에 대한 연구가 보완 된다면, 이 모형을 이용하여 시설재배 작물의 물관리 연구 및 플라스틱 온실내 열적환경의 시뮬레이션에 있어서 작물의 수분확산을 고려한 물질전달 분석에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. Campbell, G.S., 1978, An Introduction to Environmental Biophysics, Springer-Verlay, New York, pp.155.
2. Gates, D.M., 1968, Transpiration and Leaf Temperature, Ann. Rev. Plant. Physiol., 19 : 211-238.
3. Haseba, T. and D. Ito, 1980, Dimension Dependence of Boundary Layer Transfer Coefficient of Water-Vapor for Flat Plant Leaf, J. Agr. Met., 36(2) : 89-94.
4. Holman, J.P., 1986, Heat Transfer, McGraw-Hill. New York.
5. Kindelan, M., 1980, Dynamic Modeling of Greenhouse Environment, Trans. of the ASAE., 23(5) : 1232-1239.
6. Linacre, E.T., 1964, Calculations of the Transpiration Rate and Temperature of a Leaf, Agr. Met. 1 : 66-72.
7. Murphy, C.E. and K.R. Knoerr, 1977, Simultaneous Determination of the Sensible and Latent Heat Transfer Coefficient for Tree Leaves, Boundary Layer Met. 11

- : 223-241.
8. Nobel, P.K., 1973, Introduction to Biophysical Plant Physiology, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
  9. 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(5) : 964-971.
  10. Wilhelm, L.R., 1976, Numerical Calculation of Psychrometric Properties in SI Units, Trans. of the ASAE., 19(2) : 318-325.
  11. Willits, D.H., P. Chandra and M.M. Peet, 1985, Modeling Solar Energy Storage Systems for Greenhouse, J. Agr. Engng. Res., 32 : 73-93.
  12. 고재균, 김문기, 이석건, 서원명, 최홍림, 1988, 농업시설공학, 서울대학교 출판부.
  13. 박재복, 고태균, 1987, 플라스틱 온실의 일사량 분석과 열적환경의 시뮬레이션에 관한 연구, 한국농업기계학회지 12(2) : 16-27.
  14. 武智修, 1968, 植物の葉温と熱收支, 農業氣象 24(2) : 43-50.
  15. 長谷場徹也, 1976, 蒸散現象に関する 解釋的研究, 農業氣象 32(1) : 27-31.
  16. 長野敏英 外 11人, 1986, 農業氣象環境學, 朝倉書店.
  17. 船田周, 橋本康, 津村光男, 1978, 植物生體計測による水耕の研究, 農業施設 8(1) : 21-26.
  18. 矢吹萬壽 外 8人, 1985, 農業環境調節工學, 朝倉書店.



## ABSTRACT

When nonuniform thermal boundary conditions are imposed on the surface of a circular cylinder in crossflow, the heat transfer characteristics can be quite different compared to what is found for isothermal or constant heat flux boundary conditions. In the present analysis, two kinds of nonuniform boundary conditions along the circumference of the cylinder are considered in a uniform stream of air: step changes and linear profiles. Step changes in temperature can arise on the surface of an external, cylindrical, solar central receiver. As the working fluid(water) flows through the vertical tubes that ring the circumference of Solar One(a solar central receiver in Barstow, California), the solar flux on the receiver heats the water from a liquid to a superheated state. In this process, portions of the receiver panels, and thus portions of the circumference of the cylinder, function as a preheater, boiler, or superheater. Hence the surface temperature can vary significantly around the cylinder. Common engineering practice has been to use an average wall temperature with an isothermal cylinder heat transfer coefficient when estimating the convective loss in these kinds of situations.

### **Thermal Performance Analysis for the Low-Cost Solar System with Trickle-Collector**

**Bu-Ho Kim · Dong-Won Lee**

Korea Institute of Energy & Resources

## ABSTRACT

Theoretical analysis for the thermal performance on the low-cost trickle collector, which is easy to manufacture and construct, has been performed. The results were in reasonably good agreement with those of the experiments. They have been applicable to predict long-term thermal performance on the low-cost solar collecting system. The dialogue type of computer program has been written based on the f-chart method and it can be used for designing a these collecting system, and investigating its economic feasibility.

### **The Estimation of Transpiration Rate of Crops in Hydroponic Culture in the Plastic Greenhouse**

**Sang-Woon Nam · Moon-Ki Kim**

Seoul National Univ.

Seoul National Univ. College of Agriculture Dept. of Agriculture Engineering.

## ABSTRACT

The main objective of this study was to find the relationship between transpiration rate and en-

vironmental factors for crops in hydroponic culture within plastic greenhouse by using the computer model developed from the heat balance around leaves of a crop.

A computer model was developed and verified through comparison with the experimental results for lettuce in hydroponic culture in a polyethylene film house.

The model may be extensively used for the water management and thermal environment study of crops in protected culture, if the supplemented studies for some crops would be accomplished.

## Thermodynamic Optimization of a Organic Rankine Power Cycle

W.Y.Lee · S.H.Woon · H.S.Chung

Korea Institute of Energy & Resources

### ABSTRACT

An analytical equation to estimate the Rankine power cycle efficiency at maximum power for the given mass flow rates of heating and cooling fluids is derived. The accuracy of the result is shown by comparing the analytical values with those calculated one using detailed thermodynamic data. The results indicate that the thermal efficiency at maximum power depends primarily on the initial temperatures of the heating and cooling fluids, and it also depends on the pinch-temperature differences between the working fluid and the heating and cooling fluids. The efficiency at maximum power provides a measure of the power available in a practical Rankine heat engine.

## Characterization of Delta-Doped P-Type SiC Films

Tae-Seong Kim · Woo-Seong Jeong · Hae-Kon Nam

Chonnam National University

### ABSTRACT

Novel a-Si solar cells with delta-doped ( $\delta$ -doped) P-layer have been fabricated to enhance the hole concentration of the P-layers.

The  $\delta$ -doped P-layer consists of very thin B sheets of 0.1–0.5 atomic layers and undoped a-SiC multi-layers. B-layers were prepared by photo-CVD and pyrolysis technique.

The structural, optical and electrical characteristics of the delta-doped P-layer films were evaluated by means of FTIR, AES and SIMS.

As the results of this study, it was found that the  $\delta$ -doped P-layer showed much superior optical and electrical characteristics than those of conventional uniformly B-doped a-Si layers. 12.5% energy conversion efficiency was achieved for the Cell with  $\delta$ -doped P-layer.