

## 植物生産시스템의 多目的 環境豫測 모델의 開發 —基本 시스템 構築 및 應用—

孫禎翼 · 李東根 · 金文基  
서울대학교 農業生命科學大學 農工學科

## Development of a Multipurpose—Oriented Environmental Prediction Model for Plant Production System —Construction of the Basic System and its Application—

Son, Jung—Eek · Lee, Dong—Geun · Kim, Moon—Ki  
Dept. of Agr. Eng., Coll. of Agr. & Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Suwon 441—744

### Summary

Recently, the characteristic of plant production systems in Korea has been changed with the strong trends of integration and large scale, using environmental control techniques. To satisfy this change successfully, first of all, the environmental prediction inside the system must be preceded. While many environmental prediction models for plant production system were developed by many persons, each model cannot be applied to the every situation without the perfect understanding of source codes and the technical modification.

The purpose of this study is building the environmental prediction model to predict and evaluate the environment inside the system numerically, and also developing the multipurpose program available for practical design. The model consisted of the basic system model, the cultivation related model and the environmental control related model. The contents of each model are as follows: the basic system model is dealing with thermal and light environments, soil environment and ventilation; the cultivation related model with soil and hydroponic cultures; and the environmental control related model with thermal curtain and heat exchanging system.

The environmental prediction model was developed using a common simulation program, PCSMP, so that it could be easily understood and modified by anyone. Finally, the model was executed and verified through comparison between simulated and measured results for soil culture, and both results showed good agreements.

---

키 워 드: 식물생산시설, 환경예측모델, 다목적예측, 기본모델

Key words: plant production system, environmental prediction model, multipurpose prediction, basic model

## 서론

국내에서 식물생산시설의 시작으로는, 시설원예를 중심으로 발전하여 1970년대 이후 급속한 성장을 보이고 있는 溫室의 예를 들 수 있다. 이러한 변화는 자연에 의존하는 기존의 농업생산방식에서 탈피한 새로운 시스템적 접근으로서 농업생산방식에 새로운 개념을 준 바 있다<sup>1)</sup>. 최근, 국내에도 식물생산시설의 집중화, 첨단화, 대규모화의 추세속에서 최적생산을 위한 환경제어가 필요하게 되었고, 이를 위하여 시설내의 환경예측이 필수불가결하게 되었다. 현재까지 식물생산시설의 환경예측에 관련된 수많은 모델들이 개발되어 왔고, 대부분의 경우, 각각의 모델들은 특정한 목적에 대해서 거의 완벽하게 목적을 만족시키고 있다.

식물생산시설내의 환경은 각각의 환경요인과 밀접한 상호작용을 하는데, 이러한 상호 작용은 매우 복잡하고 다양하다. 먼저, 기본환경모델 중 광환경에 대한 주요 연구는 일사에 관한 것이며<sup>7,10,13,14)</sup>, 이 중에서 Bot<sup>7)</sup>는 벤로형 온실내의 광환경을 예측하였다.

온실의 연구중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것이 열환경에 대한 연구로서, 피복재 종류별 온실내부의 열적 특성, 여러가지 열전달계수에 따른 열전달 특성의 차이등을 관찰하였다<sup>5,6,8,9,11,12,18,19)</sup>. 이 중에서 高倉은 토양모델을 1차원적으로, 즉 수평방향의 열전달은 무시하고 수직방향의 열전달만을 고려하여 해석을 하였고, Kindelan<sup>12)</sup>은 작물의 대류열전달계수가 작물의 잎의 특성치와 내부풍속에 영향을 받는다고 하였으며, 시스템을 피복재, 내부공기, 작물, 토양 등의 네가지 요소로 구분하여 1차원 정상 모델로 해석한 바 있다.

수경재배 환경에 관한 연구로서, 양액온도변화를 고려한 양액제어<sup>16)</sup>, 작물과 내부공기, 작물과 양액, 베드와 토양 등의 상호간의 열전달 특성의 규명<sup>2)</sup> 등이 이루어졌고, 환경제어 관련모델에 대한 연구로서, 보온커튼의 사용에 대한 온실내의 효과를 규명하였으며<sup>16)</sup>, 난방제어방법 도입<sup>20)</sup> 등이 시도되어있다.

이상과 같은 모델들은 대부분 특정한 목적을 가진 경우가 많기 때문에, 각종 조건이 상이한 환경에 사용하기 위해서는, 그 목적에 맞게 구축하거

나 또는 기존의 프로그램 코드내용을 완벽히 이해한 후, 수정 및 보완을 하지 않으면 적용이 불가능하다. 따라서, 각종 조건의 설정에 대하여 누구나 손쉽게 사용할 수 있는 일반적인 다목적 환경예측모델의 구축이 가능하다면, 기본적인 모델의 구축에 투자되는 시간을 절약하여 새로운 모델 개발에 투자할 수 있고<sup>4)</sup>, 점진적으로 보다 포괄적이고 정밀한 다목적 모델의 구축이 가능해 짐으로써 식물생산시설의 효율적인 환경설계가 가능하리라고 사료된다.

본 연구에서는 이러한 목적의 달성을 위한 첫번째 단계로서, 식물생산시설의 다목적 환경예측의 골격이 되는 기본 시스템의 구축을 시도하였고, 단순 조건에 대하여 그 적용성을 검토하였다.

## 모델의 구성

### 1. 모델의 개요

시설내의 환경예측을 위한 다목적 프로그램을 개발하기 위하여 구성된 모델의 전체적인 내용은 기본모델, 재배관련모델, 환경제어관련모델 등으로 구성되어 있다. 기본모델은 열 및 광환경모델, 토양환경모델, 환기모델 등으로 구성된다. 재배관련모델은 토경재배모델, 수경재배모델로 구성이 되며, 환경제어관련모델은 보온커튼 및 냉·난방모델로 구성이 된다. 광환경은 독립적으로 모든 열의 공급원이 되고 환기를 제외한 나머지 관련 모델은 서로 상호 종속적인 관계를 유지한다. 재배환경과는 상호 종속적이고 환경제어관련모델의 직접적인 영향을 받는다. 재배환경은 광환경 및 토양환경과 상호 종속적인 관계이고, 특히 광환경 및 열환경의 지배를 받는다. 환경제어관련모델은 기본적으로 독립적이다.

환경예측모델은 목적에 맞게 계속적으로 수정 및 보완이 필요하기 때문에 독립적으로 처리할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 각각의 부분모델간의 독립성을 유지하도록 하고 부분모델에서 사용되는 모든 환경인자에 대하여서는 공유할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 작성한 모델의 전체적인 개념도는 Fig. 1과 같으며, 기본환경모델을 구성하는

각종 시설 및 환경제어기기는 Fig. 2와 같다. 또한 전체적인 모델의 구축을 위하여 범용 시뮬레이션 프로그램인 PCSMP를 이용하였다.

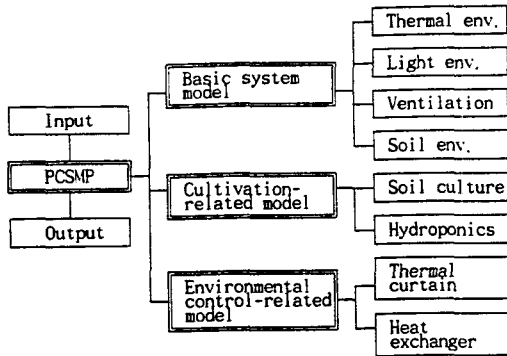


Fig. 1. Conceptual diagram of the model

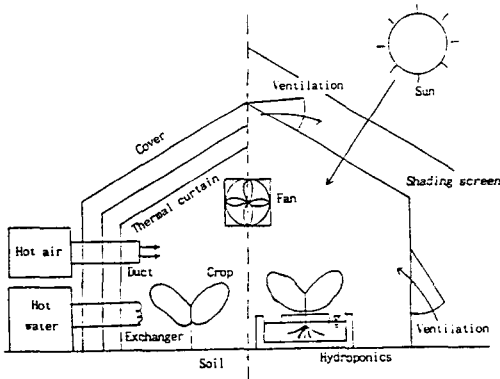


Fig. 2. General view of plant production system.

## 2. PCSMP

PCSMP는 IBM에서 개발한 CSMP(Continuous System Modelling Program)의 PC version으로서 네덜란드의 Wagenigen 대학에서 개발되었다. 이 프로그램은 IBM-AT compatible 이상에서 시행가능한 범용시뮬레이션 프로그램이다. 기본적으로 CSMP의 함수나 명령어를 거의 사용할 수 있으며, 다른 범용프로그램과 마찬가지로 System Dynamics를 추구할 수 있고, Fortran 언어의 서브루

틴을 사용하기 때문에 기존의 프로그램과 연결이 가능하다.

본 연구에서 이 프로그램을 사용한 이유중의 하나는 현재 개발중인 다목적환경예측모델은 점진적으로 수정 및 보완해나가기 때문에 보다 일반적인 프로그램 작성방법이 필요하다. 사용자에게 의한 개인적인 프로그램 작성방법은 타인이 이해하기 어렵기 때문에 범용프로그램의 사용이 보다 효율적이다.

## 3. 기본모델

### 가. 열환경모델

#### 1) 열수지의 기본적 개념

본 모델에서는 직달 및 산란 일사의 흡수·반사에 의한 열교환, 각 요소들(피복재·작물·보온커튼·지표면 등)간의 복사 열교환, 증발·증산·수분이동 등에 의한 대류열 교환, 냉·난방 장치 등에 의한 열발생량 등을 고려하였다.

#### 가) 被服材

피복재외면: 일사흡수(직달,산란) + 천공복사열교환 + 대류열교환(현열,잠열)

피복재내면: 반사흡수 + 커튼복사열교환 + 대류열교환(현열,잠열)

#### 나) 커튼

##### - 1층커튼의 경우

커튼외면: 피복재투과일사흡수(직달,산란) + 피복재복사열교환 + 대류열교환(현열,잠열) + 반사흡수

커튼내면: 내부반사흡수 + 내부복사열교환 + 대류열교환(현열,잠열)

##### - n층커튼의 경우

커튼외면: 커튼(n-1)투과 일사흡수(직달,산란) + 반사흡수 + 커튼(n-1)복사열교환 + 대류열교환(n)(현열,잠열)

커튼내면: 내부반사흡수 + 커튼(n+1)복사열교환 + 대류열교환(n+1)(현열,잠열)

(단, 제1층 커튼외면 및 마지막 커튼내면은 1층 커튼의 경우와 동일)

#### 다) 地表面

지표면: 도달일사흡수(직달,산란) + 커튼(피복재)복사열교환 + 내부복사열교환 + 대류열(현열,잠

열(증발))+반사흡수

지중면: 지중열전도

라) 内部土壤間

상향 전도열+하향 전도열+좌우 전도열

마) 作物體面

도달일사흡수(직달,산란)+커텐(피복재)복사열  
교환+대류열(현열,잠열(증산))+내부복사열교환

바) 기타 物體面

도달일사흡수(직달,산란)+커텐(피복재)복사열  
교환+대류열(현열,잠열(증발))+내부복사열교환

사) 内部空氣

작물체면 대류열교환(현열,잠열(증산))+지표면  
대류열교환(현열,잠열(증발))+기타내부물체면 대  
류열교환(현열,잠열)+커텐(피복재)내면 대류열  
(현열,잠열)+환기(현열,잠열)+난방(냉방)

아) 커텐間(N)의 공기

- 커텐n~커텐n+1

$$\frac{1}{2}[\text{커텐}(n)\text{면 온도} + \text{커텐}(n+1)\text{면 온도}]$$

자) 内部空氣의 수분수지(moisture balance)

작물체증산량+내부물체면증발량+지표면증발량  
+커텐내면증발량(응축량)+환기(수분이동)

2) 각 요소의 열교환에 사용된 기본식

가) 복사열교환

요소(1~2)사이의 복사열교환량  $L$ 은 식(1)으로  
구할 수 있다. 단, 천공복사량은 외기온에 수증기  
압 및 구름량을 고려한 근사식을 사용하였다<sup>21)</sup>(2  
식). 형태계수는 기하학적 방법으로 구할 수 있다.  
아치형의 경우는 지붕과 처마사이의 타원을 4개  
의 직선으로 근사하였다.

$$L_{12} = L_1 - L_2 = \epsilon_1 \epsilon_2 f_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_1 \quad (1)$$

$$T_{sky}^4 = f_w T_o^4 \quad (2)$$

$$\text{단, } f_{pw} = (0.51 + 0.076\sqrt{e})(1 - C \cdot N) + C \cdot N$$

여기서,  $T$ : 절대온도,  $\epsilon$ : 복사율,  $f$ : 형태계수,  
 $A$ : 면적,  $\sigma$ : 스테판-볼츠만 상수,  $e$ : 실외공기의  
수증기압(mmHg),  $C$ : 경험數로 0.8,  $N$ : 雲量(0~  
1)

나) 현열 및 잠열 전달량( $H, EL$ )

(1) 실내 및 실외의 대류열전달계수

실내 및 실외의 각면에 따른 대류열전달계수는  
다양하게 경험적으로 사용되고 있기 때문에 단일  
치는 될 수 없고, 일반적으로 피복재 외면은 외부

풍속의 함수, 내면은 피복재와 시설내의 온도차  
및 내부 풍속의 함수를 사용하였다. 각 부분의 거  
이수는 남 등<sup>22)</sup>를 참조할 것. 고체1~유체2(공기)  
사이의 현열전달량은 식(3)과 같고, 고체는 포화  
상태이고 유체는 공기일때의 잠열전달량은 식(4)  
와 같다. 또한 표면 수증기전달계수는 열전달계수  
와의 analogy관계를 이용하여 구한다.

$$H = h(\theta_1 - \theta_2) A \quad (3)$$

$$EL = K \rho_a J (m_s(\theta_1) - m_2) A \approx K \rho_a J (G_1 - G_2) A \quad (4)$$

단,  $h/K = \rho_a C_p (Le) Le^{2/3}$ ,  $Le = \alpha/D$  (Lewis  
수)

여기서,  $m$ : 비습(kg/kg),  $h$ : 대류열전달계수,  
 $\alpha$ : 열확산계수(공기),  $A$ : 표면적,  $D$ : 물질확산계수  
(공기중의수증기),  $K$ : 수증기전달계수,  $G$ : 절대습  
도(kg/kg')

(2) 피복재 표면의 현열 및 잠열교환량  
( $H_c, EL_c$ )

피복재의 평균온도를 사용하였고, 표면의 증발  
잠열  $EL_c$ 는 실내외 온도에 따라 어느 한면만 발생  
한다.

$$H_c = [h_o(\theta_o - \theta_c) + h_i(\theta_i - \theta_c)] A_c \quad (5)$$

$$EL_c = K \rho_a J (G_{i(o)} - G_c) A_c \quad (6)$$

여기서,  $h_o, h_i$ : 피복재 외·내면의 대류열전달계  
수,  $\theta_o, \theta_i$ : 피복재, 실외, 실내온도,  $K$ : 피복  
재 수증기전달계수, 첨자  $i(o)$ :  $i$  또는  $o$ 를 의미

(3) 환기에 의한 현열 및 잠열 교환량( $H_v,$   
 $EL_v$ )

$$H_v = \rho_a C_p Q (\theta_i - \theta_o) \quad (7)$$

$$EL_v = \rho_a Q J (G_i - G_o) \quad (8)$$

여기서,  $C_p$ : 공기의 비열,  $Q$ : 환기량

(4) 작물사이와 내부공기의 현열 및 잠  
열 교환량( $H_b, EL_b$ )

$$H_b = 2h_p L A I (\theta_i - \theta_p) A_p \quad (9)$$

$$EL_b = 2K_p L A I \rho_a (G_i - G_{sp}) A_p \quad (10)$$

여기서,  $h_p$ : 엽면 대류열전달계수,  $\theta_p$ : 작물체온  
도,  $K_p$ : 엽면 수증기전달계수(주위환경변화에 따  
른 기공저항 고려)

(5) 지표면과 내부공기 사이의 현열 및 잠열교환량( $H_i, EL_i$ )

$$H_i = h_i(\theta_i - \theta_a) A_i \quad (11)$$

$$EL_i = K_i \rho_a (G_i - w G_a) A_i \quad (12)$$

여기서,  $h_i$ : 지표면 대류열전달계수,  $\theta_i$ : 지표면온도,  $K_i$ : 지표면 수증기 전달계수,  $w$ : 지표면 포화정도(0~1)

3) 내부공기의 에너지 및 수분수지식

$$C_v V_i \frac{d\theta_i}{dt} = \Sigma[H_k + EL_k] + H_v + EL_v + H_{h/c} \quad (13)$$

$$\rho_a V_i \frac{dG_i}{dt} = \Sigma \rho EL_k / l + \rho_a Q (G_o - G_i) \quad (14)$$

여기서,  $H_{h/c}$ : 냉난방열량, 첨자  $k$ : 내부공기에 대한 각각의 대상부분

나. 일사환경모델

입의의 위치에 도달하는 일사량은 측정위치의 위도, 경도, 시간, 경사각 $\beta$ , 태양고도  $h$  및 방위각  $A$ 에 의해서 표시될 수 있다<sup>21)</sup>. 일사계에 의해서 측정되는 수평면 전천일사량  $I_t$ 는 세부적으로 수평면 적달일사량  $I_d$ 과 산란일사량  $I_s$ 로 구분되고, 입의 경사각 및 방위각을 가진 위치에서의 적달일사량  $J_d$ , 산란일사량  $J_s$ 는 식(15), (16)으로 표현된다. 따라서 시설내 지표면에 도달하는 일사량  $I_r$ 은 각 피복재의 투과율  $\tau$  및 각도요인  $F$ 에 의하여 식(18)과 같이 표현할 수 있다.

$$J_d = I_d \frac{\sinh k}{\sin h} \quad (15)$$

$$J_s = \frac{I_s}{2} (1 + \cos \beta) \quad (16)$$

$$F_k = \frac{T_{r,k}}{T_k} \quad (17)$$

$$I_r = \frac{1}{A_i} \Sigma [A_k (J_{d,k} \tau_{d,k} F_{d,k} + J_{s,k} \tau_{s,k} F_{s,k})] \quad (18)$$

단,  $I_r = I_d + I_s = I_s / K_s$ ,

$$\sinh = \sinh \sin \beta + \cosh \cos \beta \cos (A - \alpha)$$

여기서,  $\alpha$ : 경사면의 최대 경사방위각,  $K_s$ : 수평면일사량에 대한 산란일사량의 비율,  $T_k T_{r,k}$ : 일사량에 대한  $k$ 면의 무한평면 및 시설내의 투영면적,  $A_i$ : 지표면적, 첨자  $k, d, s$ : 대상부분, 적달, 산란을 의미함

다. 환기모델

환기량을 예측하는 데 있어서, 밀폐상태가 아닌 경우는 대부분 환기량을 입력자료로 사용한다. 강제환기는 사용하는 환기팬의 용량 등으로 쉽게 구할 수 있으나, 자연환기의 경우는 온실 내부의 온도차, 환기창의 크기 및 위치, 풍속 등에 변화하기 때문에 정확한 예측이 불가능하고, 경험적으로 각 시설에 대하여 실험적으로 구하거나 정수를 사용하는 것이 일반적이다. 본 모델에서는 밀폐시에 한정하고, 외부풍속과 내외온도차의 함수를 사용하였다. 밀폐상태가 아닌 경우는 중력환기와 풍력환기를 경험적으로 합성하여 사용할 수 있다<sup>1)</sup>. 유리온실의 경우, Okada<sup>15)</sup>의 식을 사용하였다.

$$H_v = \rho_a C_a Q (\theta_i - \theta_o) = \rho_a C_a S (\theta_i - \theta_o) A \quad (19)$$

$$S = 0.44v + 6.14\sqrt{\theta_i - \theta_o} \quad (20)$$

여기서,  $S$ : 환기율( $Q/A$ ),  $v$ : 외부풍속

라. 토양환경모델

토양은 일반적으로 50cm 전후를 일중 항온층이라고 하지만 계절에 따라서 온도는 변화한다. 본 모델에서는 일중 항온층의 깊이를 60cm로 한다. 또한 토양에서의 온도분포를 보다 적절히 파악하기 위해 수평 및 수직 방향의 열전달을 고려하는 2차원 모델로 작성하였다. 토양환경모델의 기본적인 개념도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 좌측 지점과 우측 지점의 경계면은 각각 단열, 즉 온도변화가 없는 것으로 간주하며, 또한 하측 경계면의 온도는 일정하다고 가정하여 입력자료로 처리한다. 수평 방향의 mesh는 온실의 절반을 기준으로 대칭으로 구분하였으며, 수직 방향의 mesh는 토양층 상부의 열전달이 하부의 열전달에 비해 온실내 온·습도에 영향을 많이 미치므로 상부를 자세히 구분하였다. 실내토양표면의 열수지 및 토양층내의 열수지는 다음과 같다.

$$C_{pN} \frac{d\theta_i}{dt} = \Sigma [f_{i,e} \rho_a \sigma (T_i^4 - T_j^4)] + \Sigma [A_j + h_i (\theta_i - \theta_j)] + \rho K_{pN} (G_i - w G_N) + 2k_w (y_N + y_{pN}) (\theta_{N,z} - \theta) \quad (21)$$

$$\frac{C_L}{k_f} x_N y_N \frac{d\theta_{N,k}}{dt} = \frac{2(\theta_{N,k+1} - \theta_{N,k}) x_N}{y_{N-1} + y_N} + \frac{2(\theta_{N,k+1} - \theta_{N,k}) y_N}{y_{N-1} + y_N} + \frac{2(\theta_{N-1,k} - \theta_{N,k}) y_N}{x_{N-1} + x_N} + \frac{2(\theta_{N-1,k} - \theta_{N,k}) x_N}{x_{N-1} + x_N} \quad (22)$$

여기서,  $i, k$ : 토양의 수평방향과 수직방향의 격자번호,  $C_i$ : 토양의 비열,  $y_i$ :  $i$ 번째의 토양층,  $\theta_i$ : 토양의 온도,  $f_n$ : 토양이 벽면등의 면을 보는 형태계수,  $\epsilon_i$ : 토양에서의 장파반사율,  $I_i$ : 토양의 일사흡수량,  $A_i$ : 상면적,  $h_i$ : 토양의 대류열전달계수,  $w$ : 토양의 습한 정도를 나타내는 상수,  $K_i$ : 토양의 수증기전달계수,  $G_i$ : 실내의 절대습도,  $G_{i0}$ : 토양온도에서의 포화절대습도,  $k_i$ : 토양의 열전도율

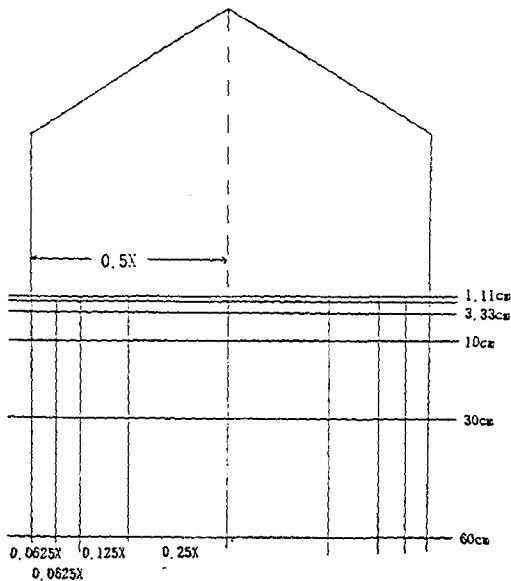


Fig. 3. Schematic diagram of soil environment model.

#### 4. 재배환경관련모델

일반적으로, 온실내의 열수지는 작물의 재배방식에 따라서 달라지기 때문에 본 모델에서는 토경재배와 수경재배로 구분하여 열수지 해석을 하였다. 수경재배시 담액방식으로서, 작물의 체온은 근권부가 접촉하고 있는 양액의 영향을 받으므로, 작물의 증기를 통한 증산류의 흐름에 의한 현열교환량을 고려하였다. 상면적에 대한 베드 면적이

증가하기 때문에 베드면적에 관련된 지면일사흡수, 복사열교환, 지중열전도 부분이 추가되었다<sup>2,4)</sup>. 수경재배시의 작물의 열평형은 Fig. 4와 같다. 토경재배 및 수경재배시의 작물의 열수지식은 다음과 같다.

$$C_p V_p \frac{d\theta_p}{dt} = I_p + H_p + L_{p,c} + L_{p,b} - E_p \quad (23)$$

$$C_p V_p \frac{d\theta_p}{dt} = I_p + H_p + L_{p,c} + L_{p,g} + L_{p,b} - E_p + E_p C_a (\theta_a - \theta_p) \quad (24)$$

여기서,  $L_{p,c}$ ,  $L_{p,b}$ ,  $L_{p,g}$ : 작물과 피복재, 지표면, 베드 사이의 복사열교환량,  $I_p$ : 작물의 일사흡수량,  $V_p$ : 작물체적,  $C_p$ ,  $C_a$ : 작물, 양액의 비열,  $\theta_i$ ,  $\theta_a$ : 지면, 양액의 온도,  $E_p$ : 증산량

SR : Solar radiation  
TR : Thermal radiation  
Cond. : Conduction  
Conv. : Convection  
Trans. : Transpiration

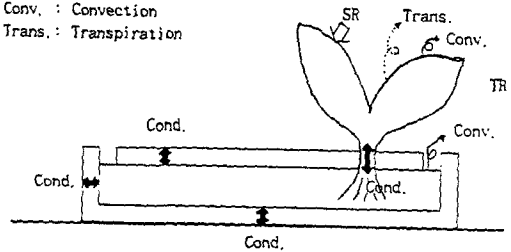


Fig. 4. Heat and mass transfer in hydroponic system.

#### 5. 환경제어관련모델

##### 가. 냉·난방모델

온수난방에는 70~100℃의 온수를 순환시키는 저온수난방과 100℃ 이상의 가압온수를 사용하는 중·고온수난방이 있지만, 대부분의 경우 저온수난방을 가르킨다. 온풍난방에는 연료의 연소에 따라 발생된 열을 공기에 전달하여 가온시키는 난방 방법으로서, 설비 비용이 저렴하고, 보수관리가 용이하며, 온수난방에 비해 예열시간이 짧고, 염가이기 때문에 온수난방보다는 더 많이 사용되고 있

다. 기본 냉난방 제어모델<sup>3)</sup>은 다음과 같다.

$$V_i C_{p,0} \frac{d\theta_i}{dt} = Q(t) + S(t) \quad (25)$$

$$Q = K(e + T_d \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} \int e dt) \quad (26)$$

단,  $e = \theta_s - \theta$

(지체시간 L이 필요할 경우:  $Q(t) \rightarrow Q(t-L)$   
단,  $t < L$   $Q=0$ )

여기서,  $S(t)$ : 실내온도  $\theta$ 에 관련된 열수지식,  
 $Q(t)$ : 제어열량,  $\theta_s$ : 설정온도  $K$ : 비례상수,  $T_d$ : 미분상수,  $T_i$ : 적분상수

나. 보온커튼

보온커튼(thermal curtain)은 겨울철 및 야간에 온실 내부의 작물의 생육환경을 최적으로 조절해 주고, 온실내로 유입된 열 에너지의 보존과 전체 열수지의 절감을 위하여 온실 피복재와 온실내부 공기 사이에 설치되어 사용된다. 본 연구에서는 無커튼, 1重, 2重 상태로 구분하여 모델을 작성하였다. 피복재와 마찬가지로 보온커튼 표면의 온도도 전면적에 걸쳐서 균일하다고 가정하였다. 커튼 n층 및 커튼n~n+1間(N)공기의 열수지는 각각 다음과 같다.

$$C_a V_n \frac{d\theta_n}{dt} = [h_{n,0}(\theta_n - \theta_{n-1}) + h_{n+1,i}(\theta_n - \theta_{n+1})] A_n + L_{n+1,n} + L_{n-1,n} + I_{n-1,n} + I_{n+1,n} + R_{n+1,n} \quad (27)$$

$$Q_N = \frac{1}{2}(Q_n + Q_{n+1}) \quad (28)$$

여기서, I: 일사흡수량, R: 반사흡수량, 첨자: n, n+1: n→n+1방향(L의 경우는 상호방향), n, i: n에서 하향(내면), N, Q: N공간의 환기량 관련

## 모델의 실행 및 적용성

### 1. 프로그램의 실행

전체 프로그램은 PCSMP로 작성되어 있는 주 프로그램과 fortran으로 작성되어 있는 두 개의 서브루틴(FACE, RTCALC)으로 구성하였다(Fig. 5). 서브루틴 FACE에서는, 먼저 사용자가 재배방식을 선택하면 토경재배일 때는 SOIL. DAT, 수경재배일 때는 HYDROPON.DAT라는 파일을 통해

입력 자료를 읽어들이며, 다음으로 보온커튼수 선택, 날짜의 입력, 냉·난방기 열량의 입력, 온실의 피복재 면적, 진태양시의 계산 등이 수행된다. 이렇게 입력 및 계산된 자료는 각각 COMMON문과 PCSMP CALL문을 통해 서브루틴 RTCALC와 주 프로그램으로 전달된다.

그리고, 주 프로그램은 FACE 서브루틴으로 부터 전달받은 자료를 이용하여 노점온도(MACRO TDD), 포화습도비(MACRO FWS), 직달·산란일사량 그리고 피복재의 투과율 및 흡수율(MACRO FRSNL)등을 계산하게 되며, 이 계산된 결과와 초기치로 초기 적분을 하고, 이 데이터는 다시 서브루틴 RTCALC로 전달된다.

또한, 서브루틴 RTCALC에서는 주 프로그램과 서브루틴 FACE로 부터 받아들인 데이터를 이용하여 대류열전달계수, 형태계수, 절대온도, 각 태양 mesh의 길이, 작물의 증산저항, 토양의 수증기 전달계수, 적분함수의 변화율 등의 계산을 하며, 이 데이터를 이용하여 그 시간 간격에서의 적분공식의 변화율을 계산하며, 이 변화율을 주 프로그램으로 보낸다. 주 프로그램에서는 RTCALC로 부터 전달받은 변화율로 적분을 하고, 다시 그 데이터를 RTCALC로 보낸다. 이러한 과정이 매 시간 간격마다 반복하게 되며, 지정된 시간까지 시뮬레이션이 하게 된다. 이렇게 계산된 결과는 prep1.dat와 prep2.dat라는 파일로 출력되게 되며, 이 파일을 이용하여 PCSMP의 PLOT 기능으로 그림으로 표시하게 된다.

본 프로그램의 개념도는, 서브루틴과 주 프로그램과의 기능적 상관도 및 프로그램의 수행절차는 각각 Fig.5 및 Fig. 6와 같다.

### 2. 모델의 적용성

#### 가. 모델의 출력예

본 프로그램의 실행기능을 검토하기 위하여 1일(24시간)에 대하여 약3초 전후의 시간 간격으로 실행한 결과, 486 DX/66MHz에서는 약 10분이 소요되었다. Fig. 7은 보온커튼이 없고, 냉방이나 난방을 하지 않는 토경재배 방식으로 재배되고 있는 온실에 대한 실행예로서, PCSMP의 PLOT 기능을 이용하여 출력한 결과이다.

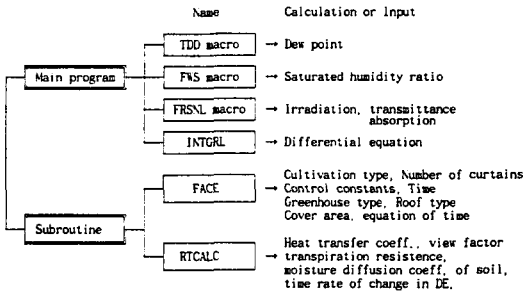


Fig. 5. Conceptual diagram of the multipurpose program.

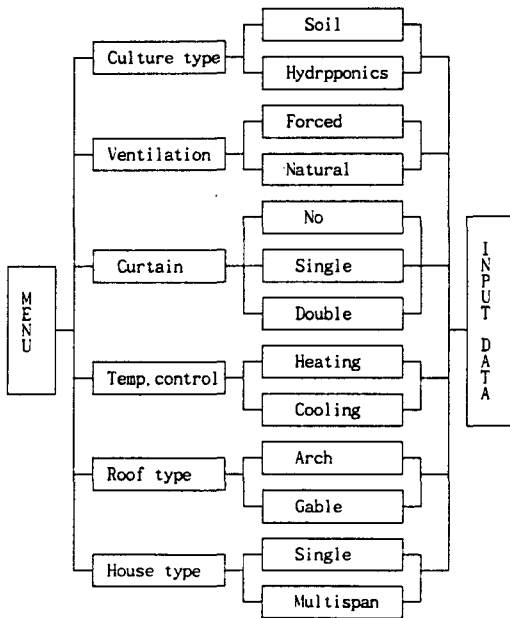


Fig. 6. System operation procedure in the program.

나. 모델의 적용예

다음으로 프로그램의 적용성 여부를 판단하기 위하여 프로그램에 의한 예측치와 실험에 의한 실측치를 비교하였다. 실험은 1993년 6월8~10일 사이에, 폭 5.4m, 길이 10m, 지붕높이 2.4m, 처마높이 1.6m인 아치형 온실에서 수행되었다. 사용된

피복재는 PE필름이고, 온실내부는 작물이 재배되고 있지 않은 상태였다.

측정항목은 내기온, 피복재온도, 지온, 습도, 일사, 복사, 풍속 등이며, 외부 기상 자료는 인근(수원)기상대의 측정 자료를 사용하였다. 그리고, 일사량은 일사계(PCM-01)를 지표면에, 복사계는 지상 1m에 설치하여 측정하였다. 기록장치로는 Hybrid 2100을 사용하였다. 습도는 온습도계, 자기온습도계를 사용하여 측정하였다.

각 기록 장치의 종류 및 제원은 Table 1과 같으며, Fig.8은 실제 측정된 온실내 기온과 모델에 의한 예측치를 표시한 것이다. 또한, Fig. 9는 온실내 지표면 온도의 실측치와 예측치의 비교를 나타내고 있으며, Fig.10은 25°C이하를 목표로 하여 적응제어 개념을 도입해서 PID제어를 실시한 예를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이, 내기온, 지표면온도 각각의 경우에 대해 프로그램에 의한 예측치와 실측치를 비교하여 본 결과 및 온도제어를 실시한 결과, 대체적으로 본 시스템은 잘 운용되고 있다고 판단된다.

Temperature in the greenhouse  
 TC : DOTS , TI : SQUARE  
 TG : CIRCLE

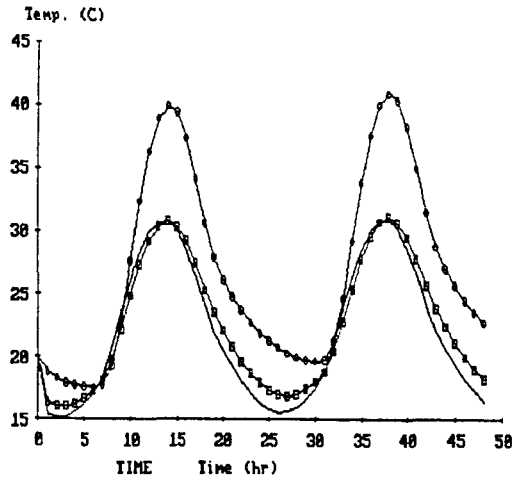


Fig. 7. An example of the program output



Table 1. Specifications of instruments used for experiment.

Instrument	Specification
Lux meter	Dx-100, 0~2000 LUX, INS
Solarimeter	RL-1, -1.5~1.5kW/m <sup>2</sup> , ISHIKAWA
Phyreheliometer	PCM-01, 0~1.5kW/m <sup>2</sup> , KADEC
Heat flux plate	MF-81, 0~3.5 kW/m <sup>2</sup> , EKO
Thermohy-grometer	HM 34, -20~60°C, 0~100%, VAISALA
Anemometer	V-01-AND, 0~40m/s, IET
Recorder	HYBRID 2100, 30points, YOKOKAWA
Thermocouple	T-type 0.3mm

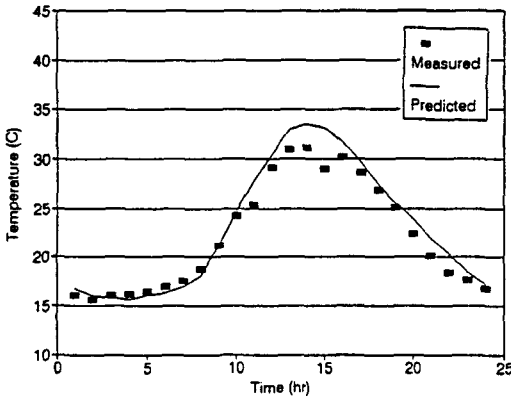


Fig. 8. Predicted and measured air temperatures

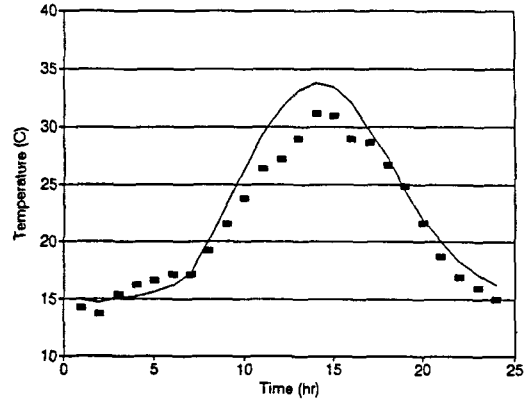


Fig. 9. Predicted and measured soil temperatures

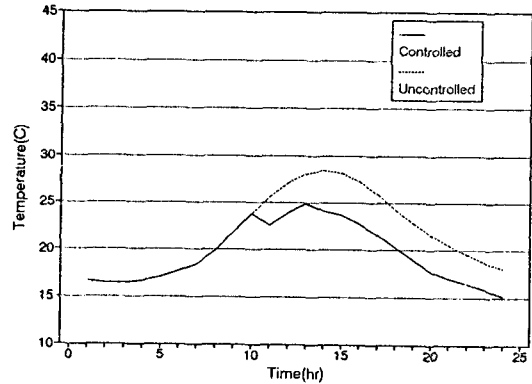


Fig. 10. Controlled air temperature.

## 요약 및 결론

본 연구에서는, 임의의 조건에 대해 시설내 환경을 예측하고 평가할 수 있는 식물생산시설내의 다목적 환경예측을 위한 기본 시스템을 구축하고, 그 적용 가능성을 검토하였다. 특히, PC용 범용시뮬레이션 프로그램인 PCSMP를 사용하여 누구나 손쉽게 수정 및 보완이 가능할 수 있도록 하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 계절, 시각, 피복재, 일사, 환기 등을 고려한 기본환경모델을 구축하였다.

2) 시설내 작물재배형태와 환경의 상호 작용을

고려한 재배환경관련모델을 구축하였다.

3) 환경제어시설 도입의 영향을 고려한 환경제어관련모델을 구축하였다.

4) 각 부분모델을 통합한 전체적 모델을 구축하였다.

5) 범용 시뮬레이션 프로그램인 PCSMP를 이용하여 실제 설계에 이용할 수 있는 다목적 프로그램을 개발하였다.

6) 온실에서 측정된 실측치를 이용하여 프로그램의 적용성 여부를 확인한 결과, 비교적 잘 적용됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 金文基, 孫禎翼. 1992. 作物生產施設의 基本設計方法. 韓國農業科學協會 심포지움 論文集: 61-73.
2. 南相運, 金文基, 孫禎翼. 1993. 水耕溫室의 養液冷却負荷 豫測모델 開發. 生物生產施設環境 2(2). 99-109.
3. 孫禎翼. 1992. 園藝施設의 自動化를 위한 컴퓨터의 利用. 農業과 情報技術 1(2):6-12.
4. 李東根. 1994. 植物生產施設內 環境豫測 모델의 實用化를 위한 多目的 프로그램의 開發. 서울大學校 大學院 碩士學位論文.
5. Arinze, E.A., G.J. Schoenau and R.W. Besant. 1982. A dynamic solar-assisted greenhouse and thermal storage performance prediction model. Trans. of the ASAE paper No. 82-4564.
6. Avissar, R. and Y. Mahrer. 1982. Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. Trans. of the ASAE 25:1711-1720.
7. Bot, G.P.A. 1980. A validated dynamical model of greenhouse climate. Acta Hort. 106: 149-158.
8. Chandra, P. and L.D. Albright. 1980. Analytical determination of the effect on greenhouse heating requirements of using night curtains. Trans. of the ASAE 23:994-1000.
9. Chandra, P., L.D. Albright and N.R. Scott. 1981. A time dependent analysis of greenhouse thermal environment. Trans. of the ASAE 24:442-449.
10. Critten, D.L. 1983. The evaluation of a computer model to calculate the daily light integral and transmissivity of a greenhouse. J. Agric. Engng. Res. 28:545-563.
11. Kimball, B.A.. 1981. A versatile model for simulating many types of solar greenhouse. ASAE paper No. 81-4038.
12. Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. Trans. of the ASAE 23:1232-1239.
13. Kozai, T., H. Takeuchi, S. Okazaki, I. Watanabe, M. Hayashi and K. Shida. 1983. Thermal properties of a solar greenhouse with inhouse heat storage and heat exchange water tanks for nighttime heating. J. Agr. Met. 38: 361-369.
14. Kozai, T., K. Shida and I. Watanabe. 1986. Thermal performance of a solar greenhouse with water tanks for heat storage and heat exchange. J. Agr. Eng. Res. 33:141-153.
15. Okada, M. 1980. The heating load of greenhouse (1) Convective heat transfer coefficients at the inside cover surface of a greenhouse as influenced by heating pipe positions. J. Agr. Met. 35:235-242.
16. Seginer, I. and L.D. Albright. 1980. Rational operation of greenhouse thermal curtains. Trans. of the ASAE 23:1240-1245.
17. Son, J.E. and T. Takakura. 1987. A study on automatic control of nutrient solution in hydroponics. J. Agr. Met. 42(2):147-151.
18. Takakura, K. 1993. Climate under cover-Digital dynamic simulation in plant bio-engineering. Kluwer Academic Publishers.
19. 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.
20. Udink ten Cate, A.J. 1980. General remarks on greenhouse climate control. Acta Hort. 106: 43-48.
21. 〇藏田憲次, 岡田益己. 1984. 環境工學入門-光・熱環境計算法の基礎. サイエンスハウス. pp 156.