

온실의 동적 열환경 시뮬레이션을 위한 프로그램 개발

Development of greenhouse thermal environments dynamic simulation program

박우식 · 임형택 · 김문기

서울대학교 농공학과

Park, Woo-Sik · Lim, Hyoung-Taek · Kim, Moon-Ki

Dept. Agricultural Engineering, Seoul Nat'l Univ.

1. 연구목적

온실을 포함한 환경조절시설은 시설이 규모화되고 설비투자가 증가할수록 설계의 정확도가 시설운영전반에 걸쳐 영향을 미친다. 이에 따라 온실의 시공전에 각 환경요소에 대한 시뮬레이션을 미리 수행해보는 것은 온실 설계를 적절히 수행하기 위해 필수적으로 선행되어야 하는 작업이다.

그동안 온실의 열환경해석을 위한 모델들이 다수 발표되었고 비교적 적합한 것으로 검증되었다. 또한 국내에서도 일부 동적열환경해석을 위한 시뮬레이션에 대한 연구가 수행되어 프로그램이 제시되었지만 이들은 시뮬레이션 언어의 하나인 PCSMP를 통한 작업이 대부분이었다.

이에 본 연구에서는 모델에 대한 이론적인 전개보다는 일반적인 프로그래밍언어를 사용하여 연구자들 이외에도 직접 시뮬레이션을 수행해 볼 수 있도록 일반화된 프로그램을 개발하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

(1) 동적 열환경모델의 개요

온실의 동적열환경모델은 피복재온도, 내부온도, 내부습도, 작물군락온도, 토양면온도, 베드온도 등 온실내부 주요 열환경요소들의 시간에 따른 변화를 나타내는 수식모델로 에너지평형이 이루어진 후의 모델인 정상상태 모델과 대별된다. 시간에 따른 환경요소값을 예측하는 것은 소요 에너지를 추정하거나 온실설계의 적합성여부를 미리 판단하는 데 기여할 수 있다. 본 프로그램의 개발에 사용된 모델은 남¹⁾, 이²⁾ 등의 연구에 의해 검증된 바 있고 비교적 잘 맞는 것으로 알려져있다.

(2) 모델을 구성하는 열평형식

본 프로그램에 사용된 모델은 알고자 하는 시뮬레이션 결과 즉, 피복재 표면온도, 내부온도, 내부습도, 지면온도, 베드온도, 작물군락온도 등에 대한 시간의 미

분항을 포함한 열평형식으로 구성된다. 여기에 각 열평형식을 기술하면 아래와 같다.

1) 피복재 표면온도의 열평형

$$C_c V_c \frac{dT_c}{dt} = QS_c + h_{co} A_c (T_o - T_c) + h_{ca} A_c (T_i - T_c) - QR_{cs} + QR_{pc} + QR_{fc} + QR_{gc}$$

2) 내부공기온도의 열평형

$$C_a V_i \frac{dT_i}{dt} = 2h_{\pi} A_i LAI (T_p - T_i) + h_{ci} A_c (T_c - T_i) + h_{fi} A_f (T_f - T_i) + h_{gi} A_g (T_g - T_i) - QV$$

3) 내부수분량의 열평형

$$\rho_a V_i d \frac{W_i}{dt} = \rho_a Ven (W_o - W_i) + ET_p + ET_g$$

4) 작물군락온도의 열평형

$$C_p V_p \frac{dT_p}{dt} = QS_p + 2h_{\pi} A_p LAI (T_i - T_p) - QR_{pc} - QR_{pf} - \lambda ET_p$$

5) 베드온도의 열평형

$$C_f V_f \frac{dT_f}{dt} = QS_f + h_{fi} A_f (T_i - T_f) - QR_{fc} - QR_{fp}$$

6) 지면온도의 열평형

$$C_g V_g \frac{dT_g}{dt} = QS_g - QR_{gc} + h_{gi} A_g (T_i - T_g) - \lambda ET_g - k_g \frac{2A_g}{(d_o + d_1)} (T_g - T_{g1})$$

$$C_g V_{g1} \frac{dT_{g1}}{dt} = k_g \frac{2A_g}{(d_o + d_1)} (T_g - T_{g1}) + k_{g2} \frac{(A_g + A_b)}{(d_1 + d_2)} (T_{g2} - T_{g1})$$

$$C_g V_{g2} \frac{dT_{g2}}{dt} = k_{g2} (A_g + A_b) \left(\frac{(T_{g1} - T_{g2})}{(d_1 + d_2)} + \frac{(T_{g3} - T_{g2})}{(d_2 + d_3)} \right)$$

$$C_g V_{g3} \frac{dT_{g3}}{dt} = k_{g2} (A_g + A_b) \left(\frac{(T_{g2} - T_{g3})}{(d_2 + d_3)} + \frac{(T_{g4} - T_{g3})}{(d_3 + d_4)} \right)$$

$$C_g V_{g4} \frac{dT_{g4}}{dt} = k_{g2} (A_g + A_b) \left(\frac{(T_{g3} - T_{g4})}{(d_3 + d_4)} + \frac{(T_{gb} - T_{g4})}{d_4} \right)$$

(3) 태양위치에 따른 변화요소

본 프로그램에 사용된 모델은 동적모델로 시간의 변화에 따른 결과값의 변화에 중점을 둔 모델이다. 온실외부환경의 결정요인으로 중요한 요소인 태양은 시간에 따라 위치가 변동함은 물론 그에 따른 온실의 제 특성치들 즉, 피복재의 투과율 및 흡수율, 온실에 도달하는 직달일사량 및 산란일사량 등의 값 역시 변화하게 된다. 태양위치에 따른 주요 특성치들의 변화는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$J_h = J_o P^{\operatorname{cosec}(h)} \sin(h)$$

$$J_o = J_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360X}{370} \right) \right)$$

$$J_d = \frac{1}{2} J_o \sin(h) \frac{1 - P^{\operatorname{cosec}(h)}}{1 - 1.4 \ln P}$$

J_h : 수평면 직달일사량

J_o : 대기권 밖의 법선면 일사량

J_d : 산란일사량

P : 대기투과율 h : 태양의 고도

(4) 상미분방정식의 수치해

구성된 열평형식들은 시간에 대한 1계상미분방정식들로 각 열환경요소의 시간에 따른 변화를 알기 위해서는 이들 미분방정식을 풀어야 한다. 이때 시간 $t=0$ 일때의 각 초기치를 가정한다. 참고로 위와 같은 문제를 상미분방정식의 초기치 문제라 한다. 본 프로그램에서는 1계상미분방정식의 풀이에 비교적 많이 사용되고 있는 수치해법인 4차 Runge-Kutta법을 이용하였다. 4차 Runge-Kutta법의 구현 알고리즘은 아래와 같다.

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

$$u_0 = y_0$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)$$

이때 u_i 는 y_i 에 대략 근사하며 각각의 계수 K 값은 아래와 같다.

$$y_i \cong u_i$$

$$K_1 = hf(x_i, u_i) = hf_i$$

$$K_2 = hf \left(x_i + \frac{1}{2} h, u_i + \frac{1}{2} K_1 \right)$$

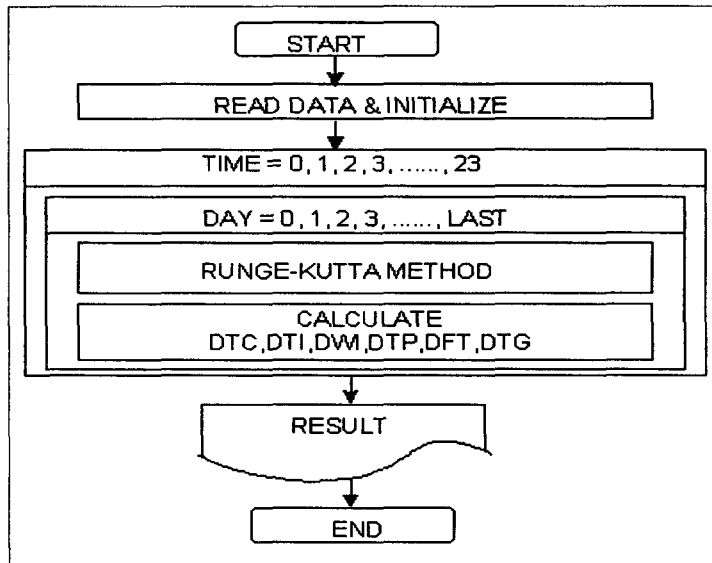
$$K_3 = hf \left(x_i + \frac{1}{2} h, u_i + \frac{1}{2} K_2 \right)$$

$$K_4 = hf(x_i + h, u_i + K_3)$$

(5) 프로그램의 구성

- 1) 시작
- 2) 입력화일 읽기 및 초기화
- 3) 원하는 시뮬레이션 일수 동안 (예 : 3일) Δt 시간 간격으로 runge-kutta 법에 의한 상미분방정식의 풀이를 반복한다.
- 4) 결과를 화일로 출력한다.

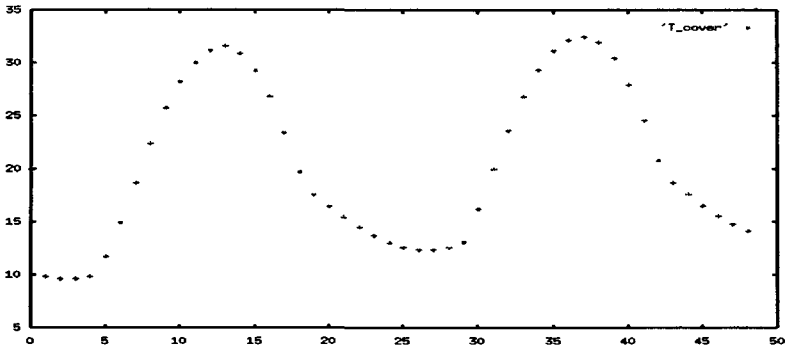
<그림 1. 프로그램 순서도>



3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 시간에 대한 일차미분항을 포함한 열평형식을 기본으로 하여 구성된 연립상미분방정식의 환경모델로부터 시간의 경과에 따른 온실의 열환경 변화를 예측할 수 있는 프로그램을 C 언어를 이용하여 개발하였다. 시뮬레이션의 대상이 되는 열환경요소는 피복재온도, 내부온도, 내부수분량, 작물군락온도, 배드온도, 토양면온도 등이다. 프로그램은 이용자가 온실의 여러 물성치 즉, 각 재료의 열전달계수, 복사투과율, 부피, 열용량 등의 수치를 간단한 입력화일로 작성하여 실행시키면 시간별 결과값들이 출력화일에 기록되도록 하였으며 비교적 손쉽게 이용할 수 있도록 하였다.

<그림 2. 출력결과의 도시에 - 시간 vs. 피복재 표면온도>



<그림 3. 입력화일의 예>

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Input File for Greenhouse Thermal Environment Simulation          %%%
%%                               sample file                          %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% ALC, ALS, ALG, ALP, ALF (A)
AAA
0.12 0.12 0.85 0.85 0.50
%% RFC, RFS, RFG, RFP, RFF (R)
RRR
0.12 0.12 0.15 0.15 0.50
%% RMC, RMS, RMSC, RMSS (M)
MMM
0.1 0.1 0.05 0.05
%% EPSC, EPSS, EPSG, EPSP, EPSF (E)
EEE
0.15 0.15 0.95 0.95 0.85
%% KS, KP, KF, KW, KB, KT (K)
KKK
5.5 2.054 0.181 1.6034 0.181 1.65
%% LGTD, LATD, DEC (G)
GGG
126.98 37.26 0.0
%% AC, AP, AG, AH, LP, AL, LPS (S)
SSS
170.0 24.0 26 4.0 2.5 0.05 0.03
%% LAI, AT, HV, HCO, HS (T)
TTT
1.0 0.7 3.6 10.0 3.0
%% FL, FN, FK
FFF
1.0 1.526 0.0441
%% CS, CA, CC, CF, CP, CN (C)
CCC
2000 1.164 50.0 24.2 4180.0 4180.0
%% ITC, ITI, IWI, ITP, ITG, ITF (I)
III
20.67 20.67 0.01 20.67 20.67 20.67
%% t0, tu, rh
WWW
25 5 35
    
```

본 프로그램의 개발환경 및 수행성능의 비교는 아래와 같다.

기 종	Axil-240 (75MHz)	Pentium (100MHz)
RAM	32 M	56 M
O S	Solaris2.5	Linux 2.0.27
C Compiler	Spark C 4.0	GCC-2.7.0
Δt	0.001 시간 (총2일)	0.001 시간(총2일)
총계산수행시간	1 분 32 초	40.94 초

앞으로 GUI를 도입한 선행처리기(pre-processor)를 보충하여 입력화일의 작성을 손쉽게 하고, 또한 후처리기(post-processor)에 의해 계산된 결과를 다양한 형태로 그래픽화 할 수 있도록 기능을 보강한다면 보다 이용하기 쉬운 시뮬레이션 프로그램이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 남상운, 1994, 수경온실의 양액냉각에 관한 연구, 서울대 박사학위논문
- (2) 이동근, 1994, 식물생산시설내 환경 예측모델의 실용화를 위한 다목적 프로그램의 개발, 서울대 석사학위논문
- (3) Takakura, 1993, Climate Under Cover, Kluwer Academic Publishers
- (4) Avissar 외, 1982, Verification Study of a Numerical Greenhouse Microclimate Model, Transactions of the ASAE, 25: 1711-1720
- (5) Kindelan, 1980, Dynamic Modeling of Greenhouse Environment, Transactions of the ASAE, 23: 1232-1239