플라스틱 溫室의 日射量 分析과 熱的 環境의 시뮬레이션에 關한 硏究[+]
— 플라스틱 溫室의 熱的環境의 시뮬레이션 —

Analysis of solar radiation and simulation of thermal environment in plastic greenhouse
—Simulation of thermal environment in plastic greenhouse —

朴 在 福[*] 高 學 均[**]

J. B. Park, H. K. Koh

Summary

Greenhouse farming was introduced to the Korean farmers in the middle of 1950's and its area has been increased annually. The plastic greenhouse, which is covered with polyethylene or polyvinyl chloride film, has been rapidly spread in greenhouse farming since 1970. The greenhouse farming greatly contributed to the increase of farm household income and the improvement of crop productivity per unit area.

Since the greenhouse farming is generally practiced during winter, from November to March, the thermal environment in the plastic grenhouse should be controlled in order to maintain favorable condition for plant growing. Main factors that influence the thermal environment in the plastic greenhouse are solar radiation, convective and radiative heat transfer among the thermal components of the greenhouse, and the use of heat source.

The objective of this study was to develop a simulation model for thermal environment of the plastic greenhouse in order to determine the characteristics of heat flow and effects of various ambient environmental conditions upon thermal environments within the plastic greenhouse.

The results obtained are summarized as follows:

1. Simulation model for thermal environment of the plastic greenhouse was developed, resulting in a good agreement between the experimental and predicted data.
2. Solar radiation being absorbed in the plant and soil during the daytime was 75 percent of the total solar radiation and the remainder was absorbed in the plastic cover.
3. About 83 percent of the total heat loss was due to convective and radiative heat transfer through the plastic cover. Air ventilation heat loss was 5 to 6 percent of total heat loss during the daytime and 16 to 17 percent during the night.

---

*한국과학기술원 식량시스템

**서울대 농대 농공학과

[+]본 연구는 1984년도 아산사회복지사업재단연구비로 수행되었음.

4. The effectiveness of thermal curtain for the plastic greenhouse at night was significantly increased by the increase of the inside air temperature of the greenhouse due to the supplementary heat.
5. When the temperature difference between the inside and outside of the greenhouse was small, the variation of ambient wind velocity did not greatly affect on the inside air temperature.
6. The more solar radiation in the plastic greenhouse was, the higher the inside air temperature. Because of low heat storage capacity of the plant and soil inside the greenhouse and a relatively high convective heat loss through the plastic cover, the increase of solar radiation during the daytime could not reduce the supplymentary heat requirement for the greenhouse during the night.

1. 緖 論

施設園藝栽培에서는 温室周圍의 外的環境의 變化에 關係없이 温室內의 栽培環境을 作物의 生育에 적합하도록 인위적으로 조절해 주어야 한다. 温室은 크게 유리温室과 플라스틱 温室로 나뉘어 진다. 유리 温室은 保温性이 좋고 管理가 特殊한 作物栽培나 硏究施設 以外의 一般 農家에서는 거의 使用되지 않고 있다. 現在 國內 대부분의 農家에서는 염화비닐이나 폴리에틸렌 같은 被覆材를 사용한 플라스틱 온실을 利用하고 있다.

플라스틱 온실을 이용한 시설원예는 대부분 外氣温度가 낮은 11月에서 3月사이의 겨울철에 栽培되기 때문에 온실의 內部温度, 濕度, 日射量 等 內部의 熱的環境을 作物의 生育條件에 적합하도록 조절해 주어야 한다. 온실내의 온도를 유지해 주는 熱源은 晝間에는 거의 外部에서 透過되는 太陽熱이며 夜間에는 大部分 化石燃料를 利用한 煖房시스 템에 의존한다. 온실내의 에너지 利用의 效率性을 높이려면 온실의 熱的環境에 관한 理論的인 分析이 뒷받침되어야 한다. 온실의 內部空氣, 作物, 토양의 온도 및 相對濕度와 같은 온실의 內的環境要因은 外部温度 및 相對濕度, 日射量, 온실의 換氣率과 같은 外的環境要因에 따라 항상 變하게 되므로 단순한 실험적인 方法으로 이들을 分析하는데 많은 制約이 있다. 따라서 이러한 温室內의 熱的環境을 理論的으로 模型化하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 外的環境要因의 變化에 따른 温室의 內的環境要因의 變化를 分析하는 硏究가 近來에 많이 시도되고 있다.

本 硏究의 目的은 플라스틱 温室의 熱的環境에 관한 理論的 模型을 開發하고 이를 檢證하며 컴퓨터 시뮬레이션을 通하여 플라스틱 温室의 熱傳達 特性을 究明하고 外部温度, 風速, 日射量等의 外的環境要因의 變化에 따른 플라스틱 温室의 內部空氣温度, 相對濕度等의 內的環境要因의 變化를 考察하는데 있다.

(Nomenclature)

C : Specific heat ($KJ/m^3 °K$)
V : Volume (m^3)
M : Mass transfer (Kg/sec)
T : Temperature (°C)
QC : Convective heat transfer (W)
QF : Conductive heat transfer (W)
QH : Internal heat source (W)
QR : Radiative heat transfer (W)
QU : Solor radiation (W)
QV : Ventilation heat loss (W)
λ : Latent heat (J/Kg)
ρ : Air density (Kg/m^3)

(Subscript)

a : Inside air
c : Plastic house cover
f : Soil layer
o : Outside air
p : Plant
t : Thermal curtain

2. 플라스틱 温室의 熱的環境의 시뮬레이션 模型

플라스틱 온실의 熱的環境을 이론적으로 분석할 수 있는 模型을 개발하기 위하여 온실내의 열적환경을 温室의 被覆材層, 內部空氣層, 作物層, 温室地表面 및 土壤層으로 나누었으며 온실의 피복재가 2重이거나 夜間에 保温커텐을 사용할 때는 이들을 포함시켰다. 그림 2-1은 플라스틱 温室의 熱傳達 過程을 表示한 것으로 各 層 사이의 열흐름은 對流, 輻射 및 傳導의 복합적인 現象으로 이루어지며 温室內의 熱源은 太陽에너지와 內部供給熱源으로 區分한다. 또한 온실내의 水分移動은 作物의 蒸散, 토양수분의 蒸發, 外氣와의 換氣, 피복재의 凝縮等으로 일어난다. 따라서 温室의 熱的環境을 構成하고 있는 各層의 熱 및 物質平衡을 基礎로 하여 온실내의 열흐름을 理論的으로 模型化하고자 한다.

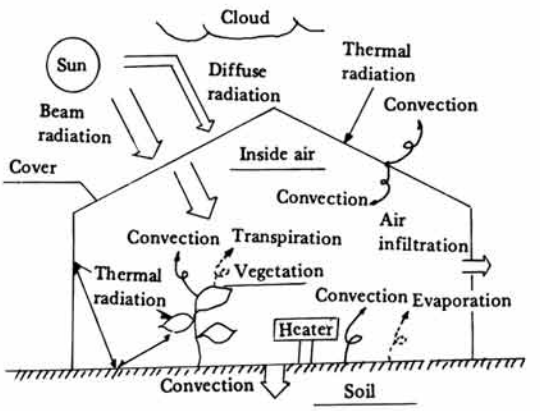


Fig. 2-1. Schematic diagram for plastic greenhouse thermal environment.

가. 温室被復材의 熱平衡

플라스틱 温室의 피복재는 두께가 얇고 空氣와 접촉하는 表面積이 매우 크므로 피복재의 温度는 全表面에 걸쳐 均一하다고 가정한다. 温室 被覆材의 晝間 熱平衡은 被覆材의 日射量吸收, 內部 및 外部空氣의 對流現象, 內部土壤 및 作物과의 輻射量 交換, 高空 및 주위의 地表面과의 輻射熱交換, 温室內外部의 온도차에 의한 피복재의 凝縮現象으로 이루어진다. 또한 夜間에 보온커텐을 設置할 경우 피복재와 보온커텐 사이의 對流 및 輻射熱 傳達을 考慮해야 한다. 그림 2-2는 주간의 경우 피복재에서의 열평형을 나타낸 것이며 이들의 熱平衡方程式은 다음과 같이 표시된다.

$$C_v V_c \frac{dTc}{dt} = QU_{ac} + QC_{ac} - QC_{co} + QR_c + \lambda M_c \quad —(2-1)$$

QU_{ca} QC_{co} QR_c QC_{ac} λM_v Cover λM_c

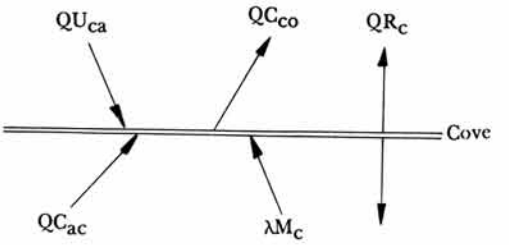


Fig. 2-2. Thermal balance for the cover at day time.

夜間의 경우 그림 2-3과 같이 피복재와 온실 內部空氣層 사이에 保温커텐이 設置되며 熱平衡方程式은 피복재와 보온커텐을 각각 분리하여 적용하며 다음과 같이 표시된다.

$$C_c V_c \frac{dTc}{dt} = QC_{tc} - QC_{co} + QR_c \quad ——— (2-2)$$

$$C_t V_t \frac{dTc}{dt} = QC_{at} - QC_{tc} + QR_t + \lambda M_t \quad ——— (2-3)$$

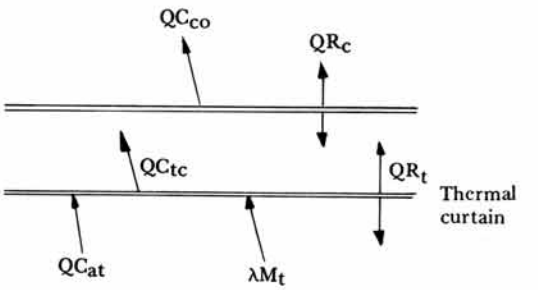


Fig. 2-3. Thermal balance for the thermal curtain at night.

이상의 晝間과 夜間의 경우 温室被覆材와 保温커텐의 熱平衡方程式에서 온실피복재나 보온커텐은 온실의 내부환경을 외부와 分離하는 경계면으로서 材質의 두께가 매우 얇으며 比較的 熱傳導가 낮고 또한 온실內外部 空氣와의 접촉면이 매우 넓기 때문에 이들의 熱흐름을 正常狀態(steady state)로 가정할 수 있으며 이 때 各 式의 左側項인 熱量變化率은 0이 된다.

나. 温室内部空氣의 熱平衡

温室内部空氣의 熱平衡에서 内部空氣의 温度는 温室内에서 均一하다고 가정한다. 温室内에 強制送風 및 순환장치가 있으면 이러한 가정은 더욱 확실해진다. 또한 温室内部空氣는 短波나 長波의 輻射熱을 吸收하지 않는다고 가정한다. 温室内部空氣는 被覆材, 보온커텐, 作物, 토양표면과 對流熱交換을 하며 煖房으로부터의 供給熱源과 温室의 換氣熱損失等을 통하여 熱的平衡에 도달한다. 주간과 야간의 温室内部空氣의 熱平衡方程式은 다음과 같다.

주간 : $$C_aV_a\frac{dTa}{dt} = QH + QC_{pa} - QC_{ac} - QC_{af} - QV \text{---(2-4)}$$

야간 : $$C_aV_a\frac{dTa}{dt} = QH + QC_{pa} - QC_{at} - QC_{af} - QV \text{---(2-5)}$$

温室内部空氣의 水分平衡

温室内部空氣의 水分量은 作物의 蒸散作用, 温室地表面의 水分蒸發, 換氣, 温室被覆材 및 保温커텐의 水分凝縮等으로 因하여 變化된다. 이들을 物質平衡方程式으로 나타내면 다음식과 같다.

$$\rho_aV_a\frac{dWa}{dt} = M_p + M_f - M_o - M_c \text{ ---------- (2-6)}$$

라. 作物의 熱平衡

温室内의 作物의 栽培밀집상태, 作物의 種類 및 크기에 따라 作物의 部位의 各 温度는 약간의 차이가 있으나 作物을 個個로 보지 않고 作物群으로 보아 작물의 온도를 均一하다고 가정하였으며 温室地表面層과 접촉하고 있는 作物의 줄기와 温室地表面層間의 熱傳達은 無視하였다. 그림 2-4는 작물의 열평형을 나타낸 것이며, 낮동안 작물이 흡수하는 日射量, 内部空氣와의 對流熱傳達, 作物의 輻射熱傳達, 作物의 蒸散作用等으로 作物의 熱平衡方程式이 표시된다.

$$C_pV_p\frac{dTp}{dt} = QU_p - QU_{pa} - QR_p - \lambda M_p \text{ ---------- (2-7)}$$

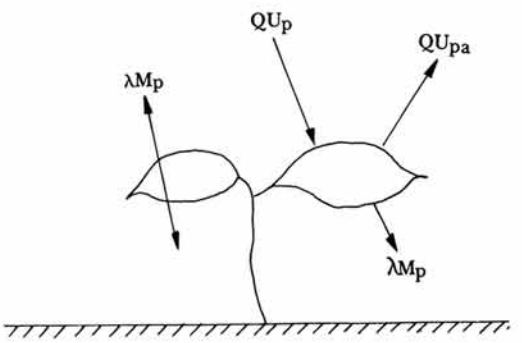


Fig. 2-4. Thermal balance for plant canopy.

마. 温室地表面層과 土壤層의 熱平衡

温室地表面層에서 熱흐름은 温室 全體 熱 에너지의 5~16% 정도가 된다고 報告된바 있다(Willts (1980), Chandra (1980)). 또한 温室地表面에서 垂直方向의 熱 흐름의 약 1% 정도가 토양側面으로 流動한다는 研究結果가 있다(Takakura (1971)). 따라서 温室地表面層에서 内部土壤層으로의 熱傳達은垂直方向의 熱傳達만을 고려하기로 한다. 그림 2-5는 온실地表面層과 土壤層内의 熱平衡을 表示한 것이며 온실토양층을 4個層으로 나누고 各 層사이의 熱平衡方程式을 유도하면 다음과 같다.

온실지표면층 : $$C_{f1}V_{f1}\frac{dTf1}{dt} = QU_f + QC_{af} - QR_f - QR_f - QF_1 - \lambda M_f \text{ ---------- (2-8)}$$

토양 1층 : $$C_{f3}V_{f2}\frac{dTf2}{dt} = QF_1 - QF_2 \text{ ---------- (2-9)}$$

토양 2층 : $$C_{f3}V_{f3}\frac{dTf3}{dt} = QF_2 - QF_3 \text{ ---------- (2-10)}$$

토양 3층 : $$C_{f4}V_{f4}\frac{dTf4}{dt} = QF_3 - QF_4 \text{ ---------- (2-11)}$$

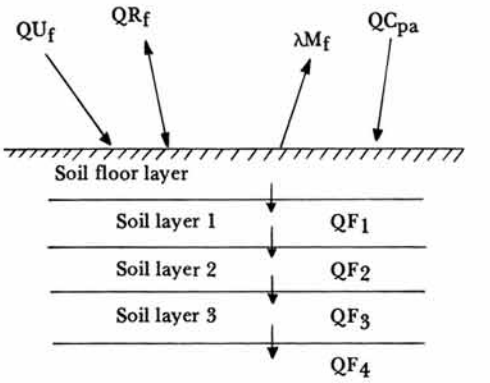


Fig. 2-5. Thermal balance for the soil floor layer and soil layers.

以上의 플라스틱 温室의 熱的環境에 관한 熱 및 物質平衡方程式의 各 項들은 温室의 日射量吸入量, 輻射, 傳導, 對流 및 潛熱等의 熱傳達現象으로 構成되어 있으며 이들에 관한 이론적 分析은 朴(1986)이 연구보고한 바 있다.

앞서 유도된 플라스틱 온실의 熱的環境에 관한 시

뮬레이션 모형은 2개의 대수방정식과 9개의 一次 미분방정식으로 구성되며 Runge-Kutta 方法과 Newton-Raphson 方法을 利用하여 이들을 解析하였다. 시뮬레이션 模型解析을 위한 컴퓨터 프로그램은 FORTRAN IV로 되어 있으며 全體 流通圖는 그림 2-6과 같다.

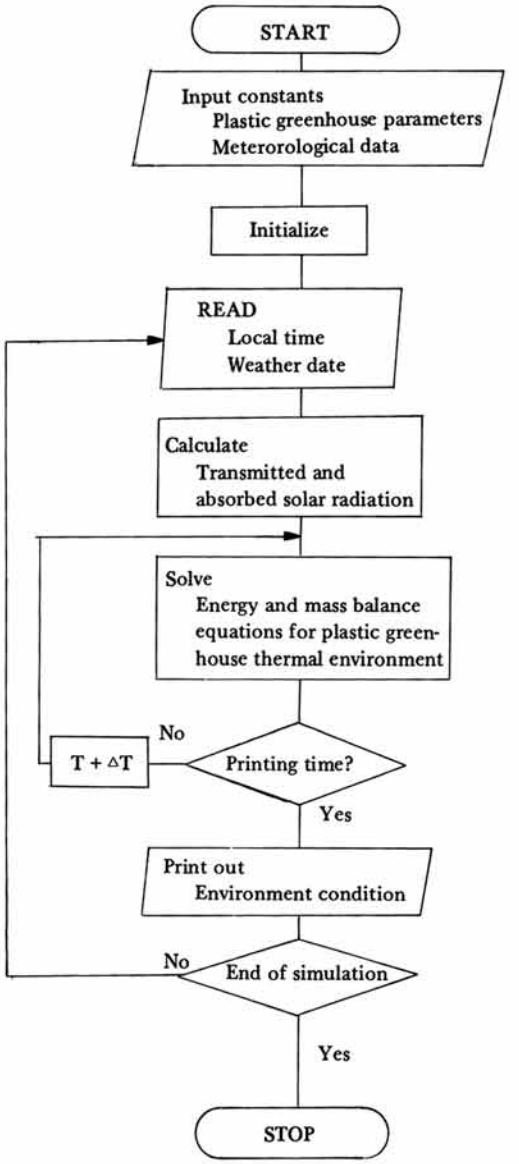


Fig. 2-6. Flow chart of the computer program for simulation of the plastic greenhouse thermal environment.

3. 시뮬레이션 模型의 檢證

플라스틱 温室의 熱的環境에 관한 시뮬레이션 模型을 檢證하기 위하여 실제로 施設園藝栽培 農家에서 많이 사용하는 폴리에틸렌필림피복의 플라스틱 温室의 熱的環境變化를 測定하여 시뮬레이션 模型의 理論的 分析結果와 比較하여 시뮬레이션 模型의 妥當性을 檢證하였다.

가. 實驗裝置 및 方法

본 실험에서 사용한 플라스틱 温室은 正南向의 폴리에틸렌필림피복의 플라스틱 温室이며 온실면적은 102m²(6×17m)이며 作物栽培面積은 30.9m²이었다. 재배작물은 완전히 성숙된 結球상치였다. 야간에는 온실피복재와 同一한 폴리에틸렌필림의 보온커텐을 설치하였으며 內部供給熱源으로 5.5kW의 電熱器를 사용하였다. 그림 3-1은 온실내의 熱的環境測定裝置들을 나타낸 것이다. 온실피복재, 내부공기, 작물 온실토양, 보온커텐등의 온도변화는 0.3㎜ C-C熱電對를 사용하여 측정하였다. 온도측정 場所는 온실피복재 6個所, 보온커텐 3個所, 作物 2個所, 內部空氣 6個所, 온실토양층 10個所(1, 5, 10, 20, 30cm로 나누어 층별로 각각 2個所)였다. 온실內部의 상대습도는 온실지표면에서 10, 90cm 位置의 2個所에

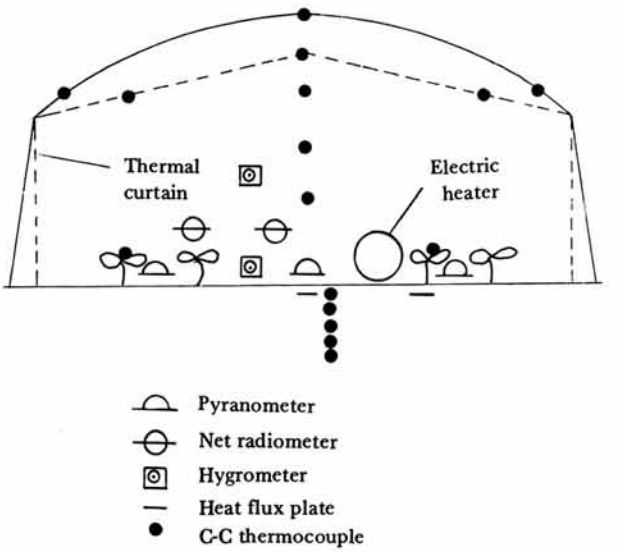


Fig. 3-1. Schematic diagram for the experimental set up in the plastic greenhouse.

Table 3-1. List of measurements taken and instruments used in the experiment.

Variable	Instrument	Remark
Solar radiation	Pyranometer (TS-SR)	2 mV/MJ/m^2
Net radiation	Net radiometer (N-11)	30 mV/kW/m^2
Soil heat flux	Heat flux plate (N-81)	37.7 mV/kW/m^2
Temperature	C-C thermocouple	
Humidity	Hygrometer (SH-21)	
	Multichannel digital thermo recorder (TR2711)	±0.5°K
	Agricultural Meteorogical recorder	

습도계를 설치하여 측정하였다. 표 3-1은 실험에 사용한 계측기의 사양을 표시한 것이다.

온실의 日射量은 3個의 일사량계와 2개의 순방사량계(net radiometer)로 측정하였으며 온실지표면에 2個의 熱流板(heat flux plate)을 設置하여 토양층으로의 열전도량을 측정하였다. 各부분의 온도와 열전도량은 디지탈 多點記錄計(multichannel digital thermo recorder : TR2711)로 30분 간격으로 기록하였으며 상대습도와 일사량은 記錄計(agricultural meteorogical recorder)로 기록하였다. 플라스틱 温室의 外部環境變化는 실험장소로부터 30 m 떨어진 氣象觀測所의 氣象資料를 이용하여 分析하였다. 실험은 1985年 2月 20日에서 3月 10日사이에 실시하였으며 실험장소는 水原市 이목동 所在의 농촌진흥청 원예시험장이었다. 플라스틱 温室의 熱的環境 變化는 주간(09 : 00~17 : 00時)과 야간(18 : 00~19 : 00時)으로 구분하였다.

나. 시뮬레이션 模型의 檢證

시뮬레이션 模型의 妥當性을 檢證하기 위하여 1985年 2月 24日의 플라스틱 온실의 열적환경의 實驗値를 시뮬레이션 模型에 의한 理論値와 比較하였다. 플라스틱 온실의 열적환경에 관한 主要因子들의 값은 참고문헌과 실측치를 利用하였다. 그림 3-2와 3-3은 2月 24日의 外部 氣象條件으로 外部 温度, 風速, 相對濕度, 日射量을 表示한 것이다. 水平面 日射量은 16.67MJ/m^2·day로 淸明한 날이었으며 外部平均温度는 −8.2℃, 平均風速은 1.0m/sec였다. 그림 3-4는 플라스틱 温室의 熱的環境의 構成要素인 温室被覆材, 保温커텐, 温室內部空氣, 作物, 温室地表面層의 温度變化와 温室內部空氣의 相對濕度

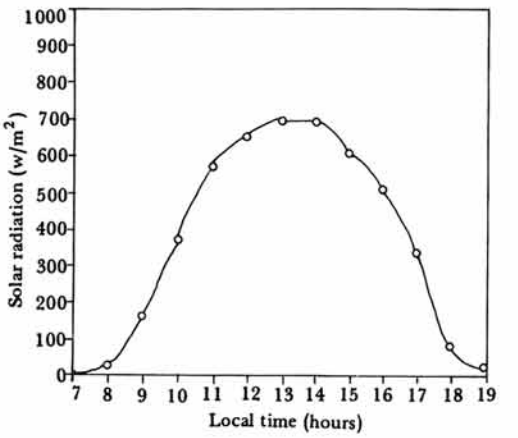


Fig. 3-2. Outside horizontal total solar radiation (Februaty 24, 1985).

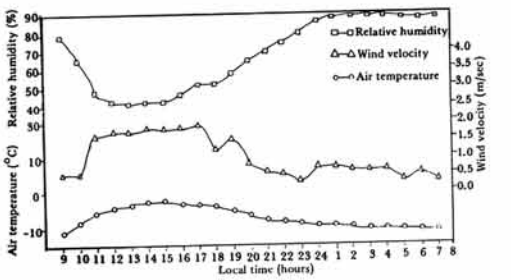
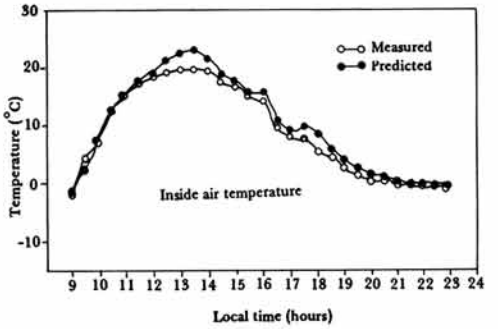
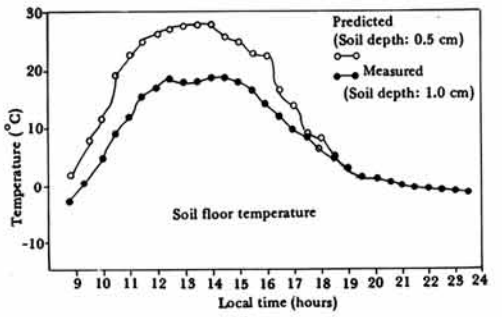


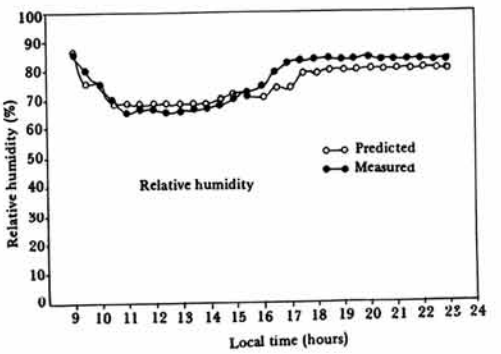
Fig. 3-3. Diurnal change of air temperature, wind velocity and relative humidity (February 24, 1985).

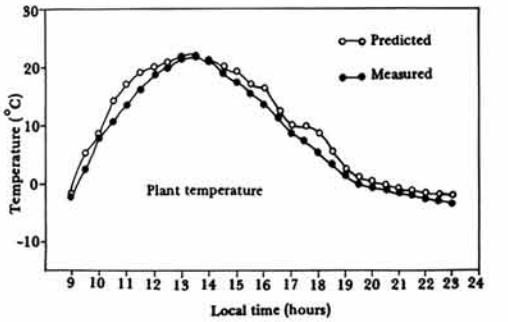
變化에 대하여 實驗値와 시뮬레이션 模型에 의한 理論値를 比較하여 나타낸 것이다. 플라스틱 온실의 內部空氣温度는 주간에 20~30℃를 유지하였으며 일사량이 많은 12 : 00時에서 14 : 00時 사이에 實驗値는 理論値보다 2~3℃ 높았으나 그밖의 경우는

실험치와 이론치는 잘 一致함을 보였다. 특히 外部溫度의 變化가 비교적 작은 야간의 경우(19 : 00時 이후) 保溫커텐을 設置하고 5.5kW의 전열기로서 內部熱源을 供給함으로써 온실내의 熱的平衡이 지속되어 實驗値와 理論値는 더욱 잘 一致하였다. 作物의 溫度는 전반적으로 理論値가 實驗値보다 2～3℃ 높게 나타났으며 이러한 差異는 日射量이 급속









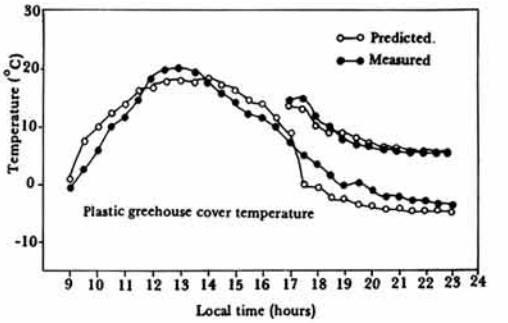


Fig. 3-4. Predicted and measured inside air, plant, soil floor, cover and thermal curtain temperature and relative humidity in the P.E. covered plastic greenhouse (February 24, 1985).

히 增加하는 10 : 00時와 12 : 00時 사이에 더 커지는 경향을 보였다. 溫室地表面層의 溫度變化는 理論値의 경우 시뮬레이션 模型의 地表面層의 깊이를 1㎝로 하였기 때문에 시뮬레이션 결과는 0.5㎝ 깊이의 지표면층 온도를 분석한 것이다. 그러나 實驗値의 경우 C-C 熱電對로 0.5㎝의 온실지표면층의 온도변화를 측정하기가 어려워 1㎝ 깊이의 온도를 측정하였다. 이러한 이유로 일사량이 높은 주간에 실험치와 이론치는 10～15℃의 큰 차이를 보였으나 야간의 경우 온도차는 1～2℃로 잘 일치하였다. 온실피복재의 온도변화는 주간에는 實驗値가 理論値보다 2～3℃ 낮았으나 야간에는 2～3℃ 높았다. 보온커텐의 온도변화는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 보였다. 온실내부의 相對濕度 變化는 일몰시간에 이론치가 실험치보다 5～6% 낮게 나타났으

나 전반적으로 잘 일치하였다. 이상의 結果를 종합해 보면 플라스틱 温室의 熱的環境을 분석하기 위한 本 시뮬레이션 模型은 그 妥當性이 立證되어 이를 이용하여 온실외부환경요인의 변화에 따른 플라스틱 온실의 熱的環境變化를 예측할 수 있으며 温室의 環境制御와 에너지利用效率의 提高에 관한 연구에 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 플라스틱 温室의 熱的環境의 시뮬레이션

가. 플라스틱 温室의 熱傳達特性

플라스틱 温室의 熱傳達特性을 고찰하고자 플라스틱 온실을 온실피복재와 温室地表面으로 둘러싸인 系로 가정하면 温室內에 供給되는 熱量은 日射量, 內部供給熱源, 온실토양층에서 지표면층으로 傳達되는 熱量이며 온실內部로부터의 損失熱量은 온실피복재의 輻射 및 對流熱傳達量, 換氣熱損失量, 温室地表面層에서 温室토양층으로 전달되는 熱量으로 나눌 수 있다. 앞서 검증된 시뮬레이션 模型을 利用하여 손실내의 供給熱量과 熱損失의 特性을 分析하였다.

表4－1은 1985年 2月 24日의 플라스틱 온실의 공급열량과 열손실을 분석한 것이다. 주간에는 플라스틱 온실에 투과된 일사량이 주된 공급열원이며 이중 약 75%는 작물과 온실지표면층에 흡수되며 나머지 25%는 온실피복재에 흡수되는 것으로 나타났다. 주간의 경우 온실의 熱損失은 약 70%가 온실피복재의 對流熱傳達損失인 것으로 이것은 온실피복재와 외부공기의 온도차가 30℃ 內外로 크기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 온실피복재와 天空 및 外部地表面사이의 輻射熱損失은 약 12% 內外였다. 換氣熱損失 및 온실토양층의 熱傳導損失은 전체열손실의 各各 5～6%, 10.5%로서 잘 밀폐된 플라스틱 温室의 경우 주간에 換氣에 의한 熱損失은 다른 열손실보다 相對的으로 작았다. 야간의 경우 플라스틱 온실내에 保温커텐이 設置되고 5.5kW의 난방열량이 공급되었다. 이 때의 플라스틱 温室의 熱損失은 온실피복재의 대류열전달 손실이 전체의 40～49%, 온실피복재의 복사열전달손실이 25～42%, 환기에 의한 열손실이 16～17%로 나타났다. 온실지표면층의 熱傳導損失量은 17時30分에서 19時30分 사이에 전체열손실의 3.1～9.7%였으며 19時30分 이후는 열전도흐름이 轉換되었다.

이상의 분석결과를 종합해 보면 플라스틱 温室의 熱損失은 全體熱損失의 83% 이상이 온실피복재의 對流 및 輻射熱傳達로 이루어진 것으로 分析되었다. 이중에서 주간의 경우 對流熱傳達損失量은 70% 이상, 輻射熱傳達損失量은 10～15%였으며 야간의 경우 복사열전달 손실량은 40～48%로 주간보다 증가하였다. 잘 밀폐된 플라스틱 温室의 換氣熱損失量은 주간의 경우 全體 熱損失量의 5～6%로 비교적 적었으나 야간의 경우 16～17%로 增加하는 경향을 보였다.

나. 플라스틱 温室의 保温커텐의 保温效果

保温커텐은 온실피복재와 온실내부공기 사이에 設置되어 對流 및 輻射熱傳達에 의한 熱損失을 抑制하여 温室內의 保温效果를 높이는 역할을 한다. 본 연구에서는 시뮬레이션 模型의 檢證에 利用한 폴리에틸렌필림의 플라스틱 온실을 기준으로 피복재와 동일한 기질의 保温커텐의 有無와 內部供給熱量의 變化에 따른 온실내부공기온도 및 상대습도의 변화를 시뮬레이션하였다. 外部氣象條件은 1985年 2月 24日의 기상자료 0kW 를 이용하였으며 온실의 內部供給熱量은 無加温(0kW), 5.5, 10kW의 세 水準으로 定하였다.

그림4－1은 폴리에틸렌필림의 保温커텐의 有無와 温室內部供給熱量의 變化에 따른 온실내부 공기온도와 相對濕度의 변화를 나타낸 것이다. 無加温의 경우 보온커텐을 설치했을 때 온실내부공기온도는 20：00時 이후 －1.5℃로 보온커텐이 없었을 때의 －6.5℃보다 약 6℃ 높았다. 이 때의 相對濕度는 보온커텐에 관계없이 모두 95% 이상으로 높게 나타났다. 이것은 야간의 플라스틱 温室의 內部 空氣温度가 낮아져 습도가 飽和狀態에 도달하였기 때문이며 실제로 겨울철 야간의 無加温 플라스틱 온실에 이러한 現象이 일어나고 있다. 내부공기열원이 5.5kW, 10kW의 경우 보온커텐의 유무에 따른 온도차는 각각 약 6.5℃, 7.5℃로서 나타났으며 내부공급열량이 증가할수록 보온커텐으로 인한 온실실부온도의 상승효과가 커지는 경향을 보였다.

Table 4-1. Characteristics of heat transfer in plastic greenhouse thermal environment (February 24, 1985).

Time (hours)	Temperature(°C)		Heat gain						Heat loss						E_{in}-E_{out}
	T_o	T_a	QH	QUPA	QUFA	QUCA	QGF	E_{in}	QCCO	QRCS	QRGF	QCV	QGF	E_{out}	ΔE
9:30	-11.1	14.3	0	6.1	14.3	7.2	0	27.7	12.9	3.7	0.6	1.3	1.6	20.2	7.4
	%		0	22.0	51.8	26.2	0	100	64.0	18.4	3.1	6.4	8.1		
10:30	-8.1	22.8	0	10.0	23.5	10.8	0	44.3	25.9	4.0	0.7	1.9	3.6	36.2	8.1
	%		0	22.5	53.1	24.4		100	71.6	11.1	2.0	5.4	10.0		
11:30	-5.5	27.5	0	10.7	25.1	11.3	0	47.5	30.4	4.3	0.9	2.4	4.5	42.4	4.8
	%		o	22.6	53.3	24.0		100	71.7	10.2	2.0	5.5	10.5		
12:30	-4.2	29.3	0	10.8	25.5	11.2	0	47.5	31.3	4.4	0.9	2.5	4.7	43.8	3.7
	%		0	22.8	53.6	23.6		100	71.6	10.1	2.0	5.6	10.7		
13:30	-3.3	29.6	0	10.8	25.4	10.9	0	47.0	31.9	4.4	0.9	2.4	4.6	44.3	2.8
	%		0	22.9	54.0	23.1		100	72.2	9.9	2.0	5.5	10.5		
14:30	-2.7	28.1	0	9.5	22.4	10.2	0	42.1	30.0	4.2	0.8	2.2	4.2	41.4	0.7
	%		0	22.6	53.2	24.3		100	72.4	10.2	2.0	5.4	10.0		
15:30	-2.7	25.9	0	8.6	20.3	9.2	0	38.2	27.5	4.0	0.7	2.0	3.6	37.8	0.4
	%		0	22.6	53.2	24.2		100	72.6	10.6	2.0	5.3	9.5		
16:30	-3.0	20.5	0	5.7	13.4	6.4	0	25.6	21.5	3.5	0.5	1.5	2.3	29.3	-3.7
	%		0	22.3	52.5	25.2		100	73.3	12.0	1.9	5.0	7.8		
17:30	-3.2	19.8	5.5	0	0	0	0	5.5	4.7	2.5	0.1	1.8	1.0	10.2	-4.7
	%		100	0	0	0		100	46.5	24.7	1.5	17.7	9.7		
18:30	-4.0	16.0	5.5	0	0	0	0	5.5	4.0	2.4	0.1	1.4	0.3	8.1	-2.6
	%		100	0	0	0		100	49.0	29.5	1.3	17.0	3.1		
19:30	-5.2	12.8	5.5	0	0	0	0.3	5.8	3.0	2.4	0.1	1.1	0	6.7	-0.9
	%		95.0	0	0	0	5	100	45.3	36.0	1.7	17.0	0		
20:30	-6.9	11.2	5.5	0	0	0	0.5	6.0	2.7	2.4	0.1	1.0	0	6.2	-0.2
	%		91.2	0	0	0	8.8	100	42.9	38.8	1.8	16.5	0		
21:30	-7.7	10.4	5.5	0	0	0	0.6	6.1	2.5	2.4	0.1	1.0	0	6.0	0.1
	%		89.8	0	0	0	10.2	100	41.7	40.2	1.9	16.3	0		
22:30	-8.4	10.0	5.5	0	0	0	0.7	6.2	2.3	2.4	0.1	1.0	0	5.8	0.3
	%		89.3	0	0	0	10.7	100	39.8	41.7	2.1	16.4	0		

Note:
- T_o : Outside air temperature
- T_a : inside air temperature in plastic greenhouse
- QH : internal heating source
- QUPA : solar radiation absorbed in plant
- QUFA : solar radiation absorbed in soil floor
- QUCA : solar radiation absorbed in plastic greenhouse cover
- E_{in} : total heat gain in plastic greenhouse
- QCCO : convective heat transfer from plastic greenhouse cover to outside air
- QRCS : radiative heat transfer from plastic greenhouse cover to sky
- QRCC : radiative heat transfer from plastic greenhouse cover to ground
- QCV : air infiltration heat loss in plastic greenhouse
- QGF : conductive heat transfer from soil floor to soil layers
- E_{out} : total heat loss in plastic greenhouse

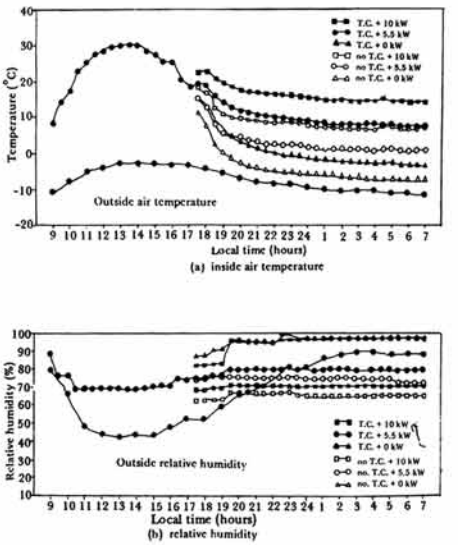


Fig. 4-1. Effect of thermal curtain (P.E. film) and internal heating source on the inside air temperature and relative humidity in plastic greenhouse(February 24, 1985).
Note: T.C. = thermal curtain

다. 外部風速 및 日射量의 變化에 따른 플라스틱 温室의 內部空氣温度의 變化

플라스틱 温室의 열적환경에 가장 큰 영향을 주는 外部環境要因은 外部温度, 風速, 日射量이라고 할 수 있다. 여기서는 外部温度의 變化를 임의로 고정하고 外部風速과 日射量의 變化에 따른 플라스틱 温室의 내부공기온도의 변화를 분석하였다.

外部風速의 變化에 따른 플라스틱 温室內의 空氣温度의 變化를 분석하기 위하여 기준되는 풍속은 1985년 2月 24日의 풍속상태를 利用하였으며 온실환경조건은 시뮬레이션 模型 檢證時와 同一하였다. 주간의 평균풍속은 1.5m/sec 였으며 야간의 경우 0.5 m/sec 로서 1日 風均風速은 1.0m/sec 였다. 이것을 기준외부풍속으로 하여 풍속을 1.5, 2.0, 2.5배 증가시켰을 때 플라스틱 温室의 內部空氣温度의 變化를 분석하면 그림 4－2와 같다. 주간의 경우 외부평균풍속이 1.5m/sec 일 때 온실내부 공기온도는 약 30℃였으나 풍속이 3.8m/sec 로 증가하였을 때는 23℃로서 7℃의 온도차이를 보였다. 야간의 경우 外部風速의 증가에 따른 온실내부공기온도의 변화는 매우 적었다. 이와같은 현상은 보온커텐이 없을 때도 동일하였다. 이것은 야간의 풍속변화는 0.5 m/sec에서 1.3m/sec 로 매우 작으며 온실내외부의 온도차가 주간보다 12~20℃ 낮아 온실피복재를 통한 對流熱傳達損失量이 감소된 것으로 판단된다. 따라서 플라스틱 温室의 內部空氣温度는 주간과 같이 온실내외부의 温度差가 클 때는 外部風速에 큰 영향을 받지만 온도차가 작은 야간에는 적게 받는다고 볼 수 있다.

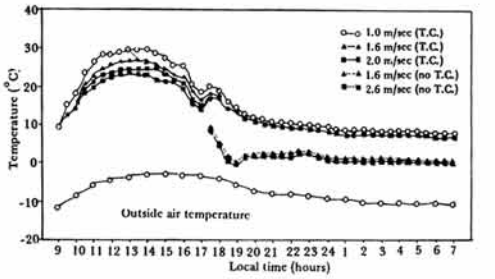


Fig. 4-2. Effect of outside wind velocity on the inside air temperature in plastic greenhouse (February 24, 1985).
Note: T.C. = thermal curtain

그림 4－3은 日射量의 變化에 따른 온실내부공기온도의 변화를 나타낸 것이다. 1985年 2月 24日 水平面 日射量, 16.57MJ/m²·day 을 기준으로 일사량이 10% 증가할때와 10, 20, 30% 감소할 때 즉 18.23, 14.91, 13.26, 11.60MJ/m²·day 로 구분하여 各各의 日射量의 變化에 따른 온실내부공기의 온도변화를 考察하였다. 플라스틱 온실내로 日射量의 增減에 따른 주간의 온실내부공기온도의 변화는 큰 차이를 보였다. 그러나 주간에 온실내의 작물이나 지표면층에 吸入된 太陽에너지는 18：00時 이후 야간의 온실내부공기온도의 변화에 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 이것은 주간에 플라스틱 温室內로 흡입된 일사량은 온실내부공기온도를 上昇시켜 온실의 對流熱傳達損失量을 크게 증가시키나 작물이나 温室土壤層의 熱貯藏效率이 비교적 낮아 야간의 온실내부 공급열원체로서의 효과적인 역할을 하지 못하기 때문이라 생각된다. 따라서 주간에 플라스틱 温室내로 투과되는 과다한 태양에너지를 效率的으로 利用하기 위한 太陽熱貯藏시스템의 開發이 要求된다. 現在 이러한 温室의 太陽熱 利用方法으로 地

中熱交換裝置, 水中熱交換裝置, 岩石熱交換裝置 等이 있으나 實用化 단계에 問題點이 많아 앞으로 이들에 관한 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

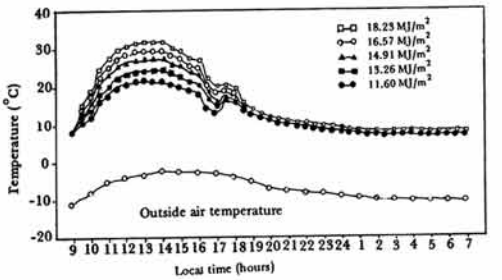


Fig. 4-3. Effect of solar radiation on the inside air temperature in plastic greenhouse (February 24, 1985).

5. 結 論

플라스틱 溫室의 熱的環境特性을 규명하고 溫室의 外的環境要因(外部溫度, 相對濕度, 風速, 外部日射量)의 變化에 따른 溫室의 內的環境要因(內部空氣, 作物, 土壤層, 溫室被覆材, 保溫커텐의 溫度 및 相對濕度)의 變化를 豫測할 수 있는 시뮬레이션 模型을 開發하였다. 시뮬레이션 模型은 實驗結果를 通하여 檢證하였으며 이 模型을 利用하여 플라스틱 溫室의 熱傳達特性, 保溫커텐의 保溫效果, 外部速度 및 日射量의 變化에 따른 플라스틱 溫室의 內部空氣溫度의 變化를 考察하였다. 硏究結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 플라스틱 溫室의 熱的環境을 分析하기 위한 시뮬레이션 模型을 開發하였으며 實驗을 통하여 溫室內 熱的環境變化를 檢證한 바 實驗値와 理論値는 잘 一致하였다. 따라서 본 시뮬레이션 模型을 利用하여 外的 環境要因의 變化에 따른 플라스틱 溫室內部의 熱的環境을 豫測하며 熱傳達 特性을 규명하고 나아가서 플라스틱 溫室의 환경제어 및 熱에너지 利用效率을 向上시키기 위한 硏究에 適用할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 주간에 플라스틱 溫室內로 供給되는 열량을 보면 作物과 溫室地表面層이 吸收하는 日射量은 全體 供給熱量의 約 75%이며 溫室被覆材가 吸收하는 日射量은 約 25%로 나타났다.

3. 플라스틱 溫室의 熱損失은 주간의 경우 溫室被覆材의 대류열 傳達 損失이 全體 熱損失量의 約 72%, 天空과 地表面과의 輻射熱 傳達損失이 12%, 換氣熱損失이 5～6%, 溫室土壤層의 熱傳導損失이 10.5%로 나타났다. 야간의 경우 溫室被覆材의 대류열전달손실이 全體 熱損失의 40～49%, 輻射熱 損失이 25～42%, 換氣熱 損失이 16～17%로서 대류열전달손실은 주간보다 全體熱 損失量이 20～30% 낮아지고 輻射熱傳達損失은 10～20% 增加하였다.

4. 야간에 플라스틱 溫室의 保溫커텐의 保溫效果는 內部供給熱量이 增加하여 溫室內部溫度가 上昇할수록 커졌으며 無加溫時 溫室內部의 相對濕度는 95% 이상으로 높게 나타났다.

5. 外部風速의 變化에 따른 플라스틱 溫室의 內部空氣溫度變化는 주간과 같이 溫室內部의 溫度差가 클 때는 外部風速變化에 큰 영향을 받지만 溫度差異가 적은 야간에는 外部風速의 영향은 거의 무시할 정도로 작았다.

6. 플라스틱 溫室內의 日射量 變化는 溫室內部空氣의 溫度上昇에 큰 영향을 주지만 作物과 溫室土壤層의 熱貯藏 效率이 낮고 溫室被覆材의 대류열전달손실이 增加되어 야간의 溫室保溫效果에는 큰 영향을 주지 않았다. 그러므로 주간의 플라스틱 溫室內의 過多한 太陽熱 에너지를 效率的으로 利用하려면 太陽熱貯藏 시스템이 開發되어야 할 것으로 判斷되었다.

參 考 文 獻

1. Ahmadi, G. and P.G. Glockner. 1982. Dynamic simulation of the performance of an inflatable greenhouse in the southern part of Alberta. Agr. Met. 27: 155-180.
2. 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.
3. Arinze, E.A., G.J. Schoenau, G.H. Green, R.W. Besant. 1979. Design and experi-

mental evaluation of a commercial size solar adapted energy conserving tomato growing greenhouse. Final report. Supply and Services Canada Contract. OSU79-00167.

4. Businger, J.A.1963. The greenhouse climate. Physics of plant environment (ed. W.R. Van Wijk). North Holland, Amsterdam. pp. 277-318.
5. 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.
6. Froehlich, D.P., L.D. Albright, N.R. Scott, and P. Chandra. 1979. Steady-periodic analysis analysis of glasshouse thermal environment. Trans. of the ASAE 22: 387-399.
7. Iqbal, M. and A.K. Khatry. 1977. Wind-induced heat transfer coefficients from glasshouses. Trans. of the ASAE 20: 157-160.
8. Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. Trans. of the ASAE 23: 1232-1239.
9. Kimball, B.A. 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. Agr. Met. 11: 243-260.
10. Kimball, B.A. 1981. A versatile model for simulating many types of solar greenhouses. ASAE Paper No. 81-4038.
11. McAdam, D.W., A.K. Khatry, and M. Iqbal. 1971. Configuration factors for greenhouses. Trans. of the ASAE 14: 1068-1072.
12. 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.
13. Takami, S. and Z. Uchijima. 1977. A model of the greenhouse with a storage-type heat exchanger and its verification. J. Agr. Met. 33: 155-166.
14. Takami, S. and Z. Uchijima. 1977. A model for the greenhouse environment as affected by the mass and energy exchange of a crop. J. Agr. Met. 33: 117-127.
15. Walker, J.N. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouses. Trans. of the ASAE 8: 445-448.
16. Willts, D.H., P. Chandra, and M.M. Peet. 1985. Modeling solar energy storage systems of greenhouses. J. Agr. Eng. Res. 32: 73-79.
17. 岩切敏, 内嶋善兵衛. 1971. 晝間におけるカガラス室の温度状態と熱伝達, 農業気象 26(3) : 197-207.
18. 三原義秋. 1980. 温室設計の基礎と實際. 養賢堂.
19. 高倉直, 山川健一. 1981. 地中熱交換ハウスの設計, 1. 定常一次元モデルによる解析. 農業気象 37(3) : 187-196.
20. 朴尚根, 李龍範. 1982. 施設園芸에서의太陽熱利用增大에 關한 硏究. 農試總設. 525-534.
21. 朴在福. 1986. 플라스틱 温室의 日射量 分析과 熱的環境의 시뮬레이션에 관한 硏究. 서울대학교 대학원 박사학위논문.

(原稿接受 1987年 4月 30日, 質問期限 1987年 7月 31日)