

## 夜間의 溫室內 保溫커텐의 保溫效果分析

### Analysis of Nocturnal Thermal Insulation Effect of Thermal Curtain in Plastic Greenhouse

趙 庸 伯\*    高 學 均\*\*    金 文 基\*\*\*    金 容 顯\*  
Yong-Baeg Cho    Hak-Kyun Koh    Moon-Ki Kim    Yong-Hyeon Kim

#### ABSTRACT

A simulation model of plastic greenhouse was developed to evaluate the insulation effect of thermal curtain. Change in thermal environment with and without thermal curtain was verified through experiments, which agreed with the predicted values satisfactorily. About 18 to 20% of energy was saved in the plastic greenhouse by employing the P.E. film thermal curtain.

Employing P.E. film thermal curtain also raised the temperature of the covering film and inner air by 1°C and 1.5 ~ 1.8°C, respectively.

#### 1. 緒 論

우리나라에서는 1970年代 以後 폴리에틸렌, 염화비닐과 같은 저렴한 材料의 보급으로 인해 플라스틱 溫室이 農家에 대량 보급되었다. 이에 따라 施設園藝栽培가 활기를 띠게 되었고, 시설 원예작물의 最適 환경조건과 경제성을 고려하여 保溫 效果를 높일 수 있는 여러가지 방법들이 제시된 바 있다. 그 중 國內外에서 보온 장치로서 가장 널리 이용되고 있는 것이 保溫커텐(thermal curtain)으로써 이에 관한 국내외의 여러가지 실험자료를 살펴보면, 이 방법은 設置가 간편하며 재료의 가격이 저렴한데 비해 다른

어느 방법보다 溫室內의 熱 損失을 비교적 적게 할 수 있다는 잇점이 있다. 國內에서는 이들에 대한 지식의 경험적 축적은 상당한 수준에 이르고 있으나 理論的이며 체계적인 分析은 희박한 편이다. 國外에서도 溫室內의 열적 환경에 관한 컴퓨터 시뮬레이션의 研究가 활발한 반면 보온 커텐의 保溫 效果에 관한 연구는 빈약한 실정이다. 本 研究는 夜間의 溫室內 保溫 커텐의 保溫 效果를 分析하기 위하여 수행되었는 바, 구체적인 目的은 다음과 같다.

(1) 保溫 커텐의 設置 有無에 따른 수분 응축 현상과 환기를 고려한 溫室환경의 對流 및 輻射熱 傳達 현상을 조사하고 本 研究의 시뮬레이션에 適用한다.

(2) 溫室內 保溫커텐의 보온 효과에 관한 에너지와 물질 평형 방정식을 유도하여 保溫 效果를 理

\* 正會員: 서울대학교 大學院

\*\* 正會員: 서울대학교 農工學科

\*\*\* 서울대학교 農工學科

論的으로 模型化하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 分析을 시도하며, 실험을 통하여 이를 檢證한다.

(3) 保温 커텐으로 인한 温室内의 熱 에너지 節減 效果를 예측한다.

## 2. 夜間의 温室内 保温 效果에 영향을 미치는 熱 및 物質 傳達 현상에 대한 理論 的 分析

夜間의 플라스틱 温室의 熱的 環境을 理論的으로 分析할 수 있는 模型을 개발하기 위하여 온실 내의 熱的 環境을 온실의 外被覆材層(보온커텐포함), 내부 공기層, 温室 地表面層으로 나누었다. Fig.1은 플라스틱 温室內의 熱傳達 현상을 도시하였다. Fig.1에서와 같이 각층 사이의 열흐름은 크게 對流, 輻射, 換氣에 의한 열전달로 나타낼 수 있으며 실제로 温室內에서는 이에 대한 복합적인 열전달 현상이 나타난다. 그리고 温室內의 熱源은 내부공급열원 (heater)과 晝間에 태양에너지로 인해 가열된 온실 지표면의 열 에너지로 구성된다. 또한 온실내의 수분이동은 토양 수분의 증산, 외기와의 換氣, 피복재의 응축 등으로 일어난다. 본 연구에서는 온실내에 작물

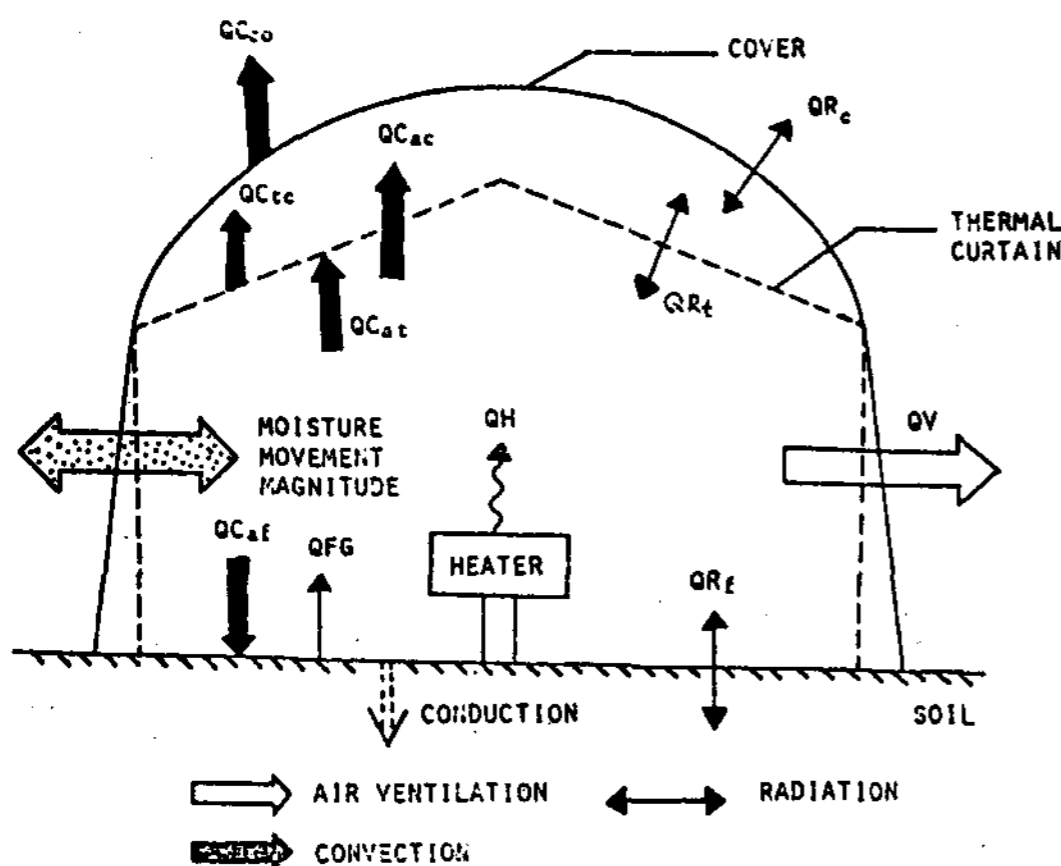


Fig.1 Schematic diagram of thermal environment in plastic greenhouse

이 없는 것으로 하여 작물에 의한 열과 수분의 이동은 고려하지 않았다. 위의 사항을 고려하여 온실내의 각 층별 열흐름을 다음 순서와 같이 이론적으로 模型化하였다.

2-1. 피복재와 保温커텐의 熱 및 物質 平衡  
 플라스틱 온실의 피복재는 두께가 얇고 공기와 접촉하는 표면적이 매우 크므로 피복재의 온도는 全表面에 걸쳐 균일하다고 가정하였다. 또한 열전도가 낮고 온실내외부 空氣와의 접촉면이 매우 넓기 때문에 이들의 열흐름을 定常狀態로 가정하면 열평형 방정식은 다음과 같다.

보온커텐이 설치되지 않고 외피복재만 있는 경우

$$QC_{ac} - QC_{co} + QR_c + \alpha M_c = 0$$

보온커텐이 설치되었을 때 외피복재의 경우

$$QC_{tc} - QC_{co} + QR_c + \alpha M_c = 0$$

보온커텐이 설치되었을 때 보온커텐의 경우

$$QC_{at} - QC_{tc} + QR_t + \alpha M_t = 0$$

### 2-2. 温室内部 空氣의 熱平衡

온실내부 공기의 입자는 輻射과장의 산란현상과 흡수현상이 없다고 가정하면 내부공기의 파장에 대한 복사열은 무시해도 된다. 온실내부공기는 피복재, 보온커텐 및 토양 지표면과 대류 열교환을 하며 난방기로 부터의 内部 공급 열원과 온실의 환기 열손실등을 통하여 열적 평형에 도달하게 된다.

보온커텐이 없을 경우

$$C_a V_a \frac{dT_a}{dt} = QH - QC_{ac} - QC_{af} - QV$$

보온커텐이 있을 경우

$$C_a V_a \frac{dT_a}{dt} = QH - QC_{at} - QC_{tc} - QC_{af} - QV$$

### 2-3. 온실 내부공기의 수분 평형

온실 내부 공기의 수분이동은 온실 地表面에

서 일어나는 수분 증발, 換氣에 의한 水分 移動, 피복재 및 保溫커텐의 응축등에 의해 平衡상태에 도달하게 된다.

보온커텐이 있는 경우

$$\rho_a V_a \frac{dW_a}{dt} = M_f - M_o - M_t - M_c$$

보온커텐이 없는 경우

$$\rho_a V_a \frac{dW_a}{dt} = M_f - M_o - M_c$$

#### 2-4. 온실 지표면에서의 열평형

온실내 토양의 수직방향의 열흐름만 고려하여 분석한 온실 지표면의 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$C_f V_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{Caf} - Q_{Rf} - Q_{FG} - \alpha M_f$$

#### 2-5. 열 및 물질 평형 방정식의 구성요소의 분석

앞에서 살펴본 바와 같이 온실의 열적 환경에 관한 이론적 분석에서는 온실의 복사, 대류, 전도 열전달과 물질이동에 관한 방정식이 복합적으로 구성되어 열적 평형에 도달한다. 온실의 각 층에 따른 열 및 물질 평형 방정식의 구성요소에 대한 관계식은 다음과 같다.

(1) 환기에 의한 열량 및 수분 이동

$$QV = \rho_o V_o C_a (T_a - T_o)$$

(2) 대류 열전달 분석

내부 공기와 피복재 및 보온 커텐 사이의 열흐름은 난방기의 송풍팬 (fan)에 의한 영향으로 강제 대류 현상으로 볼 수 있다. 이들의 열 흐름은 다음 식으로 유도된다.

$$Q_{Cac} = h_{ac} A_c (T_a - T_c)$$

$$Q_{Cat} = h_{at} A_t (T_a - T_t)$$

$$Q_{Caf} = h_{af} A_f (T_a - T_f)$$

$$Q_{Ctc} = h_{tc} A_c (T_t - T_c)$$

$$Q_{Cco} = h_{co} A_c (T_c - T_o)$$

대류 열전달 계수인  $h_{ac}, h_{at}, h_{af}, h_{tc}, h_{co}$  등에 관해서는 다음 식을(1, 6, 8, 9)사용하였다.

$$h_{ac} = 1.52 |T_a - T_c|^{\frac{1}{3}} + 5.2 \left(\frac{u_m}{L_c}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$h_{af} = 1.52 |T_a - T_f|^{\frac{1}{3}} + 8$$

$$h_{tc} = 0.82 |T_t - T_c|^{\frac{1}{3}}$$

$$h_{co} = 2.8 + 3.0 WI$$

#### (3) 物質 傳達에 관한 分析

앞에서의 換氣에 의한 熱量 分析에서 체적 환기를  $V_v$ 를 고려하면 각 층별 수분 이동량은 다음과 같다.

$$M_o = \rho_a V_v (W_a - W_o)$$

$$M_f = \rho_a A_f (W_f - W_a) / R_f$$

온실 被覆材나 保溫커텐의 溫度가 内部 空氣의 露點 溫度 以下로 내려가면 피복재나 보온커텐에 수분응축 현상이 발생하게 된다. 이때 内部 空氣에 대한 피복재 및 보온커텐의 수분 응축량은 다음과 같다.

$$M_c = h_{dc} A_c (W_a - W_c)$$

$$M_t = h_{dt} A_t (W_a - W_t)$$

#### (4) 온실 토양층에서의 열전달

온실 地表面層에서 토양 각 층의 내부로 전달되는 전도 열량은 다음식으로 유도된다.

$$Q_{FG} = \frac{K_f A_f}{D} (T_f - T_{f+1})$$

#### (5) 복사 열전달 분석

온실내에서의 복사 열전달은 온실의 피복재와 보온커텐, 온실 지표면, 외부 지표면, 天空등과의 사이에서 복사 열교환이 이루어진다. 복사 열전달 현상을 분석하기 위해서는 두 物體間의 복사 열교환 지수가 되는 관측 계수 (View factor)를 고려하지 않으면 안된다. 형상계수는 물체의 크기, 형상, 방향등에 따라 달라지며 이를 理論的으로 分析하는데 많은 제약이 따르게 된다.

또한 플라스틱 溫室의 被覆材는 長波의 복사열 투과율이 높기 때문에 피복재의 재질에 따른 파장별 투과율을 고려해 주어야 한다. 실제적으로 이러한 여건을 고려하여 이론적으로 분석하기는 거의 불가능하므로 분석을 보다 효율적이고 容易하게 하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- ① 복사열 교환에 관여하는 모든 媒體(피복재, 보온커텐, 온실 지표면)의 표면은 복사폐쇄 공간 (radiation enclosure)의 형태로 생각한다.
- ② 각각의 표면은 그 표면에서 等溫 (isothermal)이다.
- ③ 온실내 모든 輻射 熱傳達 媒體의 표면은 灰體 (gray body)이다.
- ④ 放射率(emissivity)은 입사각이나 반사각 또는 파장에 대해 독립적이다. 즉 어떤 매체 표면으로부터의 반사, 방사되는 輻射熱은 산란상태이다.
- ⑤ 空氣는 복사 열전달 변화에 관여하지 않는다.
- ⑥ 어떤 표면을 떠나는 복사열은 그 표면의 모든 영역에 걸쳐 均一하다.
- ⑦ 온실 피복재와 복사열교환을 하는 天空은 等價 天空 溫度를 갖는다.
- ⑧ 溫室 피복재나 보온커텐에 수분 응축 현상이 일어나면 피복재 및 보온커텐의 장파 복사열 투과는 무시한다.

이에따라 夜間の 溫室内의 輻射 열전달 현상은 각 層에 따라 크게 구분하면 아래와 같이 세 部分으로 나누어 진다.

가. 온실 피복재층의 복사 열 전달량 ( $QR_c$ )

$$QR_c = -QR_{cs} - QR_{cg} + QR_{tc}$$

나. 보온 커텐층에서의 복사 열 전달량 ( $QR_t$ )

$$QR_t = -QR_{tc} + QR_{ft}$$

다. 온실 지표층에서의 복사 열 전달량 ( $QR_f$ )

보온커텐이 있는 경우 :

$$QR_f = -QR_{ft} - QR_{fc}$$

보온커텐이 없는 경우 :

$$QR_f = -QR_{fc}$$

### 3. 시뮬레이션 모형의 컴퓨터 프로그래밍

앞서 유도된 溫室内의 열적 환경에 관한 열 및 물질 평형 방정식을 이용하여 시뮬레이션 모형을 수치 해석적인 방법으로 分析하였다. 플라스틱 온실의 피복재와 보온커텐에서의 열전달 현상은 정상상태로 간주하였고, 내부 공기와 지표면의 온도, 그리고 물질 전달에 이용되는 포화습도와 관련된 현상은 비정상상태로 解析하였다. 따라서

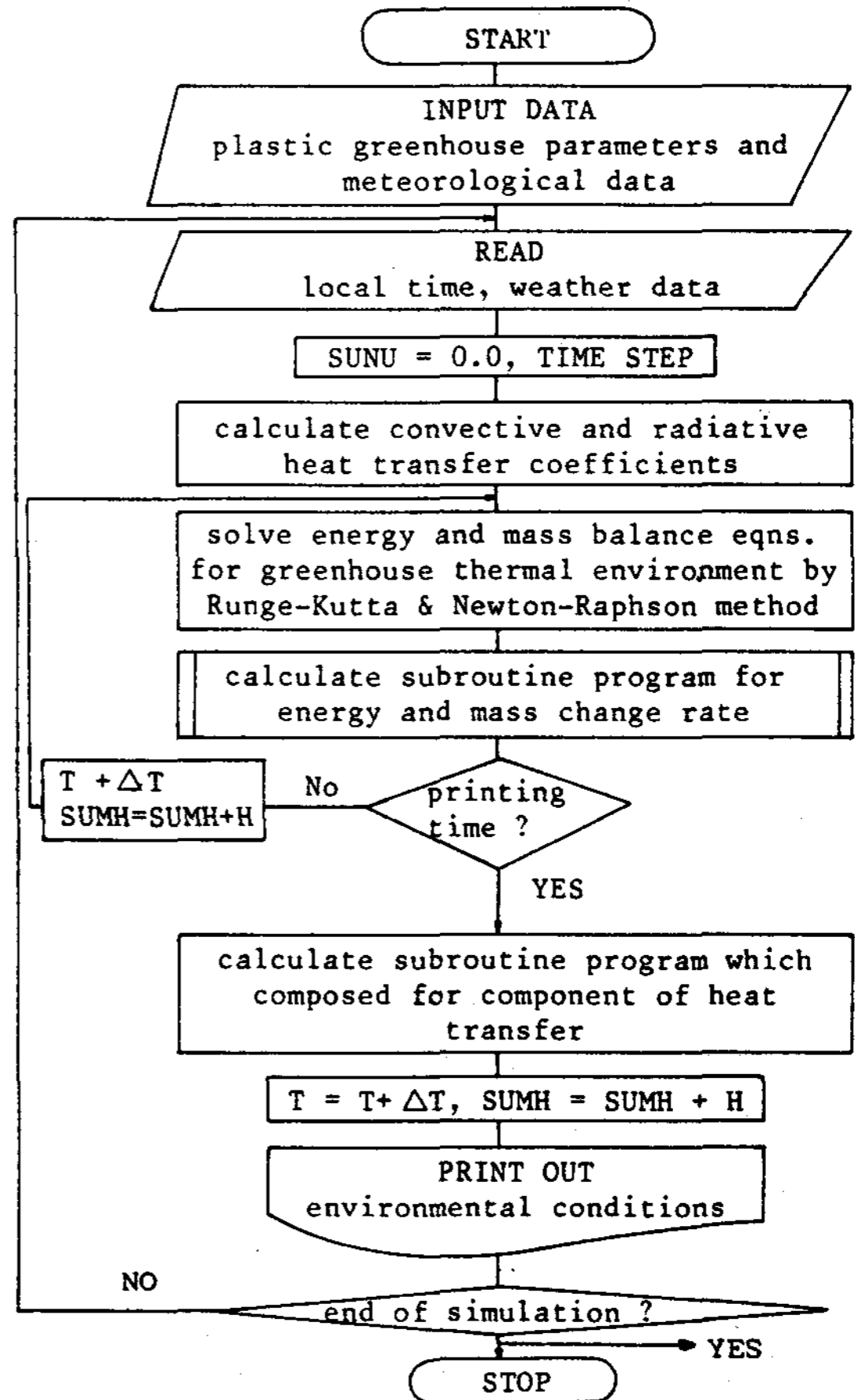


Fig.2 Flow chart of simulation program for analysis of thermal curtain insulation effect in a plastic greenhouse

시뮬레이션에 관련되는 방정식은 크게 2개의 대수 방정식과 3개의 미분 방정식으로 구성되며 이의 해법은 Runge-Kutta 方法과 Newton-Raphson 方法을 적용하였다. 시뮬레이션에 사용된 言語는 FORTRAN 77이며 전체 컴퓨터 프로그램의 系統圖는 Fig.2에 나타내었다.

#### 4. 實驗 및 檢證

플라스틱 온실은 水原 所在 서울大學校 農科大學 附屬農場에 設置하였고 實驗 目的에 따라 다음 세가지의 항목을 측정하였다.

##### (1) 溫 度

C-C 熱傳帶를 사용하여 溫室外部 1 個所, 溫室 被覆材 4 個所, 保溫커텐 4 個所, 溫室 地表面 2 개소, 溫室內部 空氣 4 個所, 토양층(지표면으로부터 5cm 길이) 2 個所를 설치하여 총 17 개소에서 온도 변화를 측정하였다. 이들 각부분의 온도는 data logger에서 10분 간격으로 취합되어 기록되었다.

##### (2) 상대 습도

온실내부의 상대습도는 온실 지표면에서 각각 10cm, 90cm 떨어진 부분에 磁氣濕度計(thermo-hygrograph)를 설치하여 측정하였다.

##### (3) 토양층의 열전도량

온실 지표면에서 5cm 길이가 되는 곳에 각각 2개의 熱流板(heat flux plate)을 설치

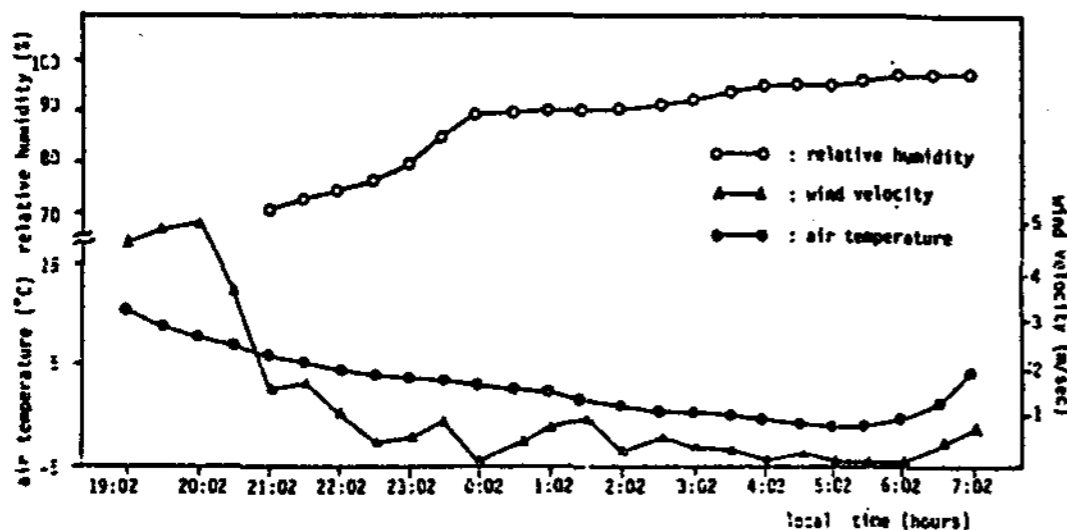


Fig.3 Change of air temperature, wind velocity, and relative humidity during night time (April 13, 1988)

하고 data logger 로 측정된 값을 入力시켜 기록하였다.

본 연구에서 개발된 시뮬레이션 模型의 타당성을 검증하기 위하여 1988년 4월 13일의 플라스틱 온실내 熱的 環境의 實驗值를 시뮬레이션 模型에 의한 理論值와 비교하였다. Fig.3은 4월 13일의 外部 기상 조건인 외부풍속, 상대습도 그리고 외부 공기의 온도를 표시한 것이다. Fig.4~Fig.7에서는 플라스틱 온실의 열적 환경 구성요소인 온실 피복재, 보온커텐, 온실내부 공기의 온도와 온실내부, 상대습도의 변화에 대하여 실험치와 시뮬레이션 模型에 의한 이론치를 비교하였다. 그림에서 살펴 보면, 온실내부공기의 상대습도는 실험치가 이론치보다 전체적으로 약간 높게 나타났으나 대체적으로 잘 일치하였다. 온실내부 공기의 온도와 피복재, 그리고 보온 커텐의 온도는 실험치와 이론치가 상당히 잘 일치하고 있다. 이상의 결과를 종합해 보면 플라스틱 온실의 夜間의 보온효과를 분석하기 위한 시뮬레이션은 그 타당성이 입증되어 이를 이용하여 보온커텐의 有無에 따른 온실내부의 보온 효과를 예측해 낼 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 5. 시뮬레이션에 의한 보온효과 분석

위의 시뮬레이션 模型을 이용하여 플라스틱 온실의 전체 열 손실을 분석한 결과 Fig.8~10과 같은 결과를 얻었다. Fig.8은 보온커텐이 있을 때와 없을 때의 온실내 열손실의 변화를 나타낸 것으로서 P.E 필름을 사용한 보온커텐을 설치했을때가 전체적으로 약 18~20%의 에너지 절감효과를 가져온 것으로 分析되었다. Fig.9와 10은 보온커텐의 有無에 따른 온실피복재의 온도차이와 내부공기의 온도차를 나타낸 것으로서 온실 피복재의 온도는 보온커텐이 있을 때와 없을 때 1°C 정도 차이가 있었으며 내부공기의 온도는 보온커텐의 有無에 따라 1.5~1.8°C 정도의 溫度差가 나타났다. 결과적으로 야간중 溫室內

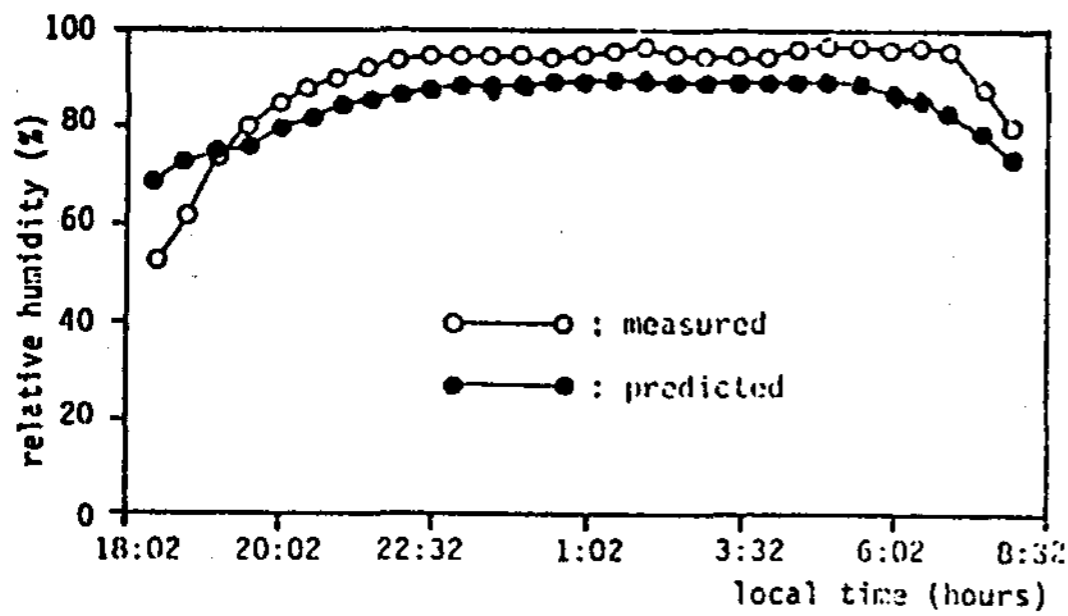


Fig.4 Predicted and measured relative humidity in the plastic greenhouse (April 13, 1988)

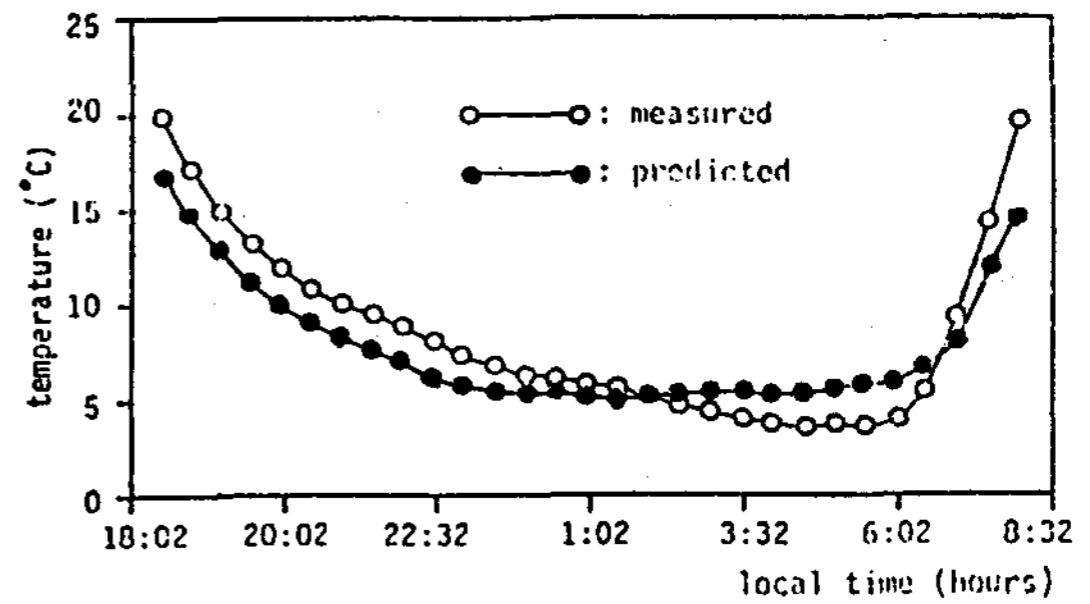


Fig.5 Predicted and measured inner air temperature in the plastic greenhouse (April 13, 1988)

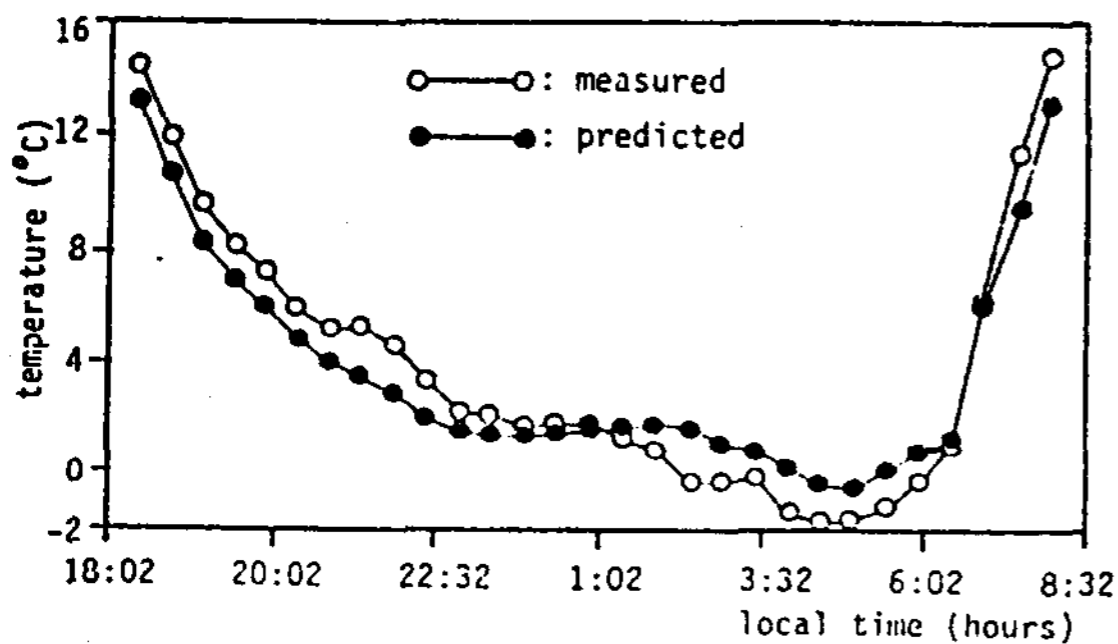


Fig.6 Predicted and measured greenhouse cover temperature (April 13, 1988)

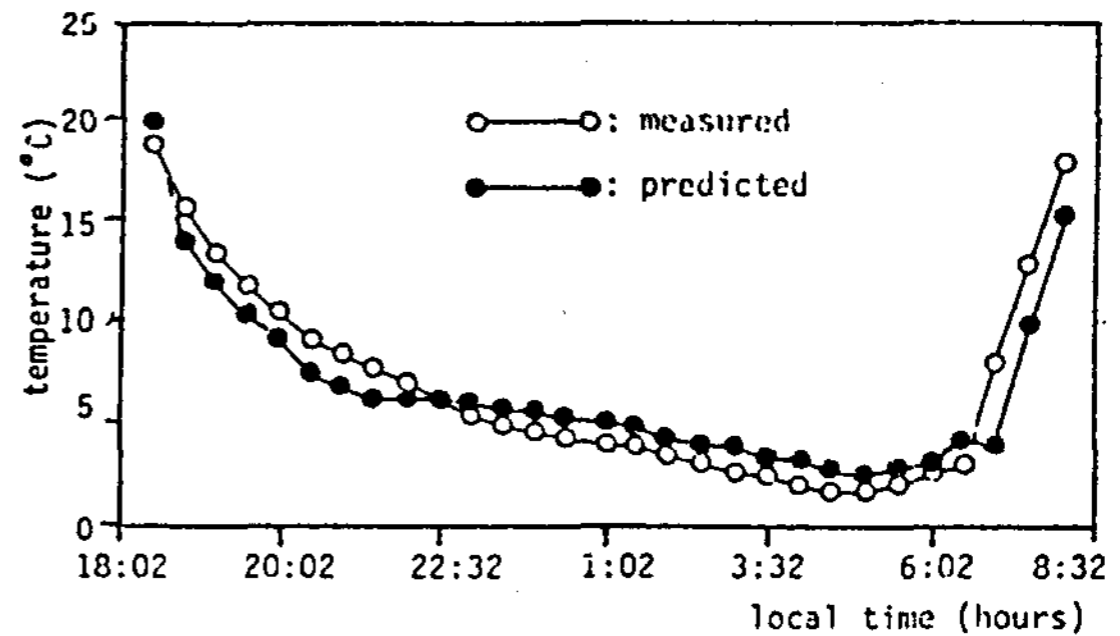


Fig.7 Predicted and measured thermal curtain temperature (April 13, 1988)

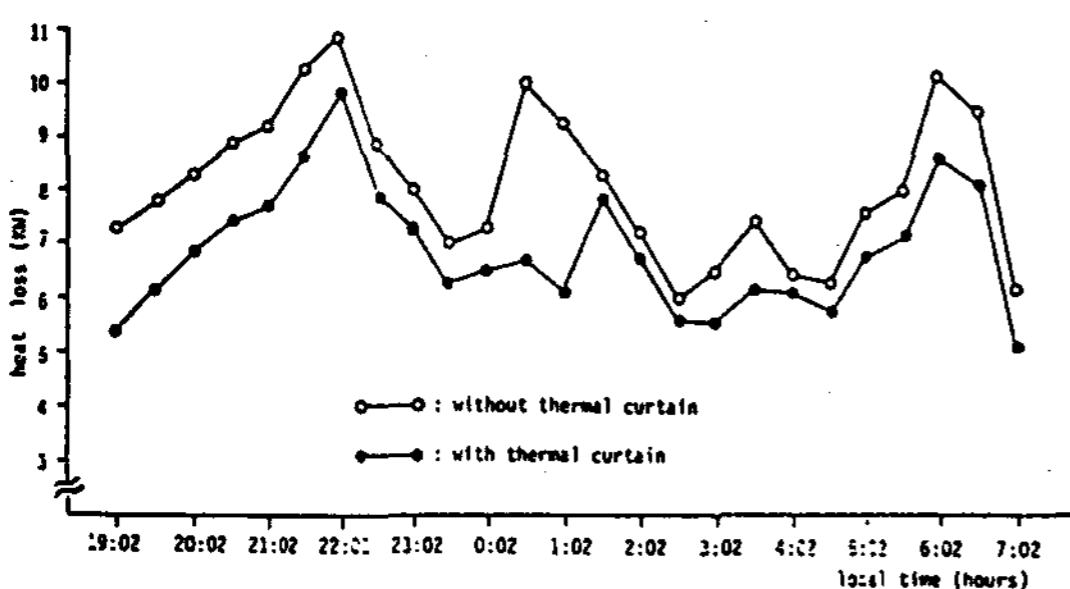


Fig.8 Comparison of heat loss in the plastic greenhouse with and without thermal curtain during night time (April 13, 1988)

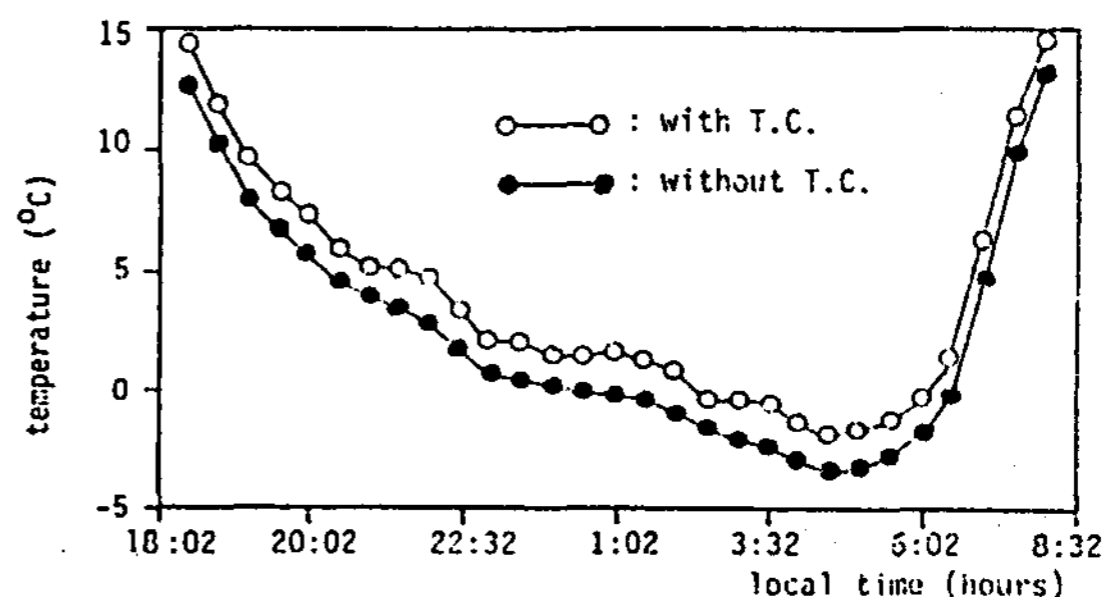


Fig.9 Comparison of greenhouse cover temperature with thermal curtain and without thermal curtain (April 13, 1988)

部の 에너지 損失率이 18~20% 정도이면 폴리에틸렌 필름의 보온커텐이 設置되었을때, 그에 따른 内部 空氣의 溫度 상승 효과는 1.5~1.8°C 정

도인 것으로 分析되었다.

## 6. 結論

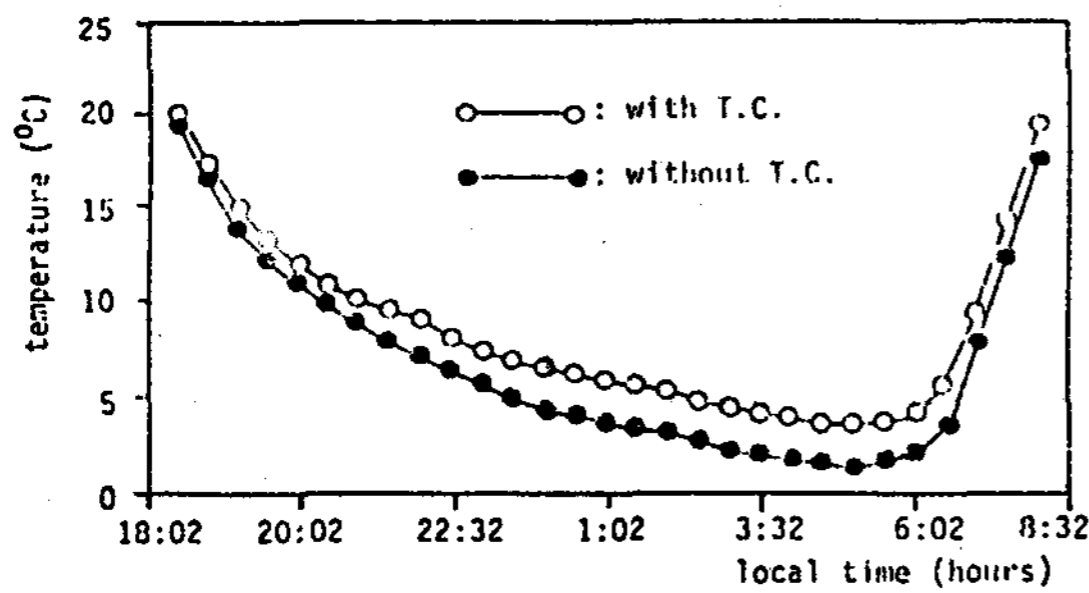


Fig. 10 Comparison of greenhouse inner air temperature with thermal curtain and without thermal curtain (April 13, 1988)

본 研究를 통해서 얻은 結論은 다음과 같다.

(1) 피복재와 보온커텐의 열 및 물질평형 방정식을 유도함에 있어 온실 피복재의 경우 피복재의 수분응축으로 인한 잠열을 고려하였기 때문에 피복재 온도의 예측에 實驗値와 더욱 근접한 값을 얻을 수 있었다.

(2) 溫室內部の 熱 平衡에 관한 관계식에서는 환기량에 의한 열손실을 고려하였기 때문에 内部空氣의 溫度를 數値解析的인 方法으로 추정함에 있어 實測値보다 근접한 값을 얻을 수 있었다.

(3) 溫室內部空氣의 水分 平衡에 대한 식에서는 온실 피복재와 보온커텐의 수분응축현상을 모두 고려하였고 이로 인해 내부 상대습도의 추정이 상당히 용이하게 되었다.

(4) 輻射 熱傳達에 관한 열평형 방정식 유도에서는 보온커텐이 있는 경우, 溫室 地表面層에서의 복사 열전달량을 보온커텐層과 피복재層을 나누어 分析함으로써 보온커텐의 有無에 따른 열손실 분석을 보다 정확하게 할 수 있었다.

(5) 플라스틱 온실의 보온커텐의 保溫效果를 分析하기 위한 시뮬레이션 模型을 개발하였으며, 實驗을 통하여 溫室內 保溫커텐의 有無에 따른 熱的 環境 변화를 검증한 바, 實驗値와 理論致는 잘 一致하였다.

(6) 폴리에틸렌 필름을 사용한 보온커텐이 설치되어 있을 경우, 온실内の 열에너지는 약 18~20

%의 節減效果를 가져왔다.

(7) 폴리에틸렌 필름을 사용한 보온커텐이 설치되었을 경우, 피복재의 온도는 1°C정도 상승하며, 온실내부 공기의 온도는 1.5~1.8°C 정도 상승하는 것으로 나타났다.

## NOMENCLATURE

QC	convective heat transfer (w)
QR	radiative heat transfer (w)
M	mass transfer (kg/sec)
C	specific heat (J/kg . °K)
V	volume (m <sup>3</sup> ) or volumetric ventilation rate (m <sup>3</sup> /sec)
QH	supplied heat source (w)
QV	ventilation heat loss (w)
QFG	conductive heat transfer (w)
t	time (hour)
T	temperature (°K)
w	humidity ratio (kg/kg - dry air)
h	convective heat transfer coefficient (w/m <sup>2</sup> . °K)
A	area (m <sup>2</sup> )
L	characteristic length (m)
R	resistance of moisture diffusivity (sec/m)
K	conductive heat transfer coefficient (w/m . °K)
D	distance between soil layer (m)
Um	average air velocity in plastic greenhouse (m/sec)
WI	wind velocity (m/sec)
α	latent heat (J/kg)
ρ	density (kg/m <sup>3</sup> )
Subscript	
a	inside air
c	plastic greenhouse cover
o	outside air
f	soil layer

t thermal curtain  
 v volumetric ventilation rate of plastic greenhouse  
 d mass transfer coefficient  
 s sky  
 g outside ground of plastic greenhouse.

REFERENCES

1. 朴在福, 高學均. 플라스틱溫室의 日射量 分析과 熱的 環境의 시뮬레이션. 韓國農業 機械學會誌 Vol 12, No. 2 : 16-27 (1987)

2. 趙庸伯. 夜間の 플라스틱 温室内 保温커텐 의 保温 效果 分析. 서울大學校 碩士學位 論文. (1989)

3. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. New York (1977)

4. Chandra, P. Thermal radiation exchange in a greenhouse with a transmitting cover. J. Agr. Eng. Res. 27 (4): 261-265 (1982)

5. Garzoli, K.V., and J. Blackwell. An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse.\* J. Agr. Eng. Res. 36 (2): 75-85 (1987)

6. Kreith, F., Principles of Heat Transfer. International Education Publishers. New York. pp.656-680. (1973)

7. Nijskens, J., D. de Halleux, J. Deltour, S. Contisse, and A. Nisen. Condensation effect on heat transfer through greenhouses claddings; glass and polyethylene. Acta Horticulure 174: 135-138 (1985)

8. Seginer, I., and A. Livne. Effect of ceiling height on the power requirement of forced ventilation in greenhouses: a computational study. IBM Israel scientific center, Heifa, Israel. (1978)

9. Watmuff, J.N., W.W.S. Charters, and D. Proctor. Solar and wind induced internal coefficients for solar collector. Compels 2. pp.23-49. (1977)