

## 온실재배 토마토의 증산모델 개발 및 검증<sup>1)</sup>

이 변 우

서울대학교 농업생명과학대학 농학과

### Transpiration Modelling and Verification in Greenhouse Tomato

Lee, Byun-Woo

Dept. of Agronomy, Seoul Nat'l University, Suwon 441-744

#### Abstract

An accurate transpiration model for greenhouse tomato crop, which is liable to transpiration depression and yield loss because of low solar radiation and high humidity, could be an efficient tool for the optimum control of greenhouse climate and for the optimization of irrigation scheduling. The purpose of this study was to develop transpiration model of greenhouse tomato and to carry out the experimental verification.

The formulas to calculate the canopy transpiration and temperature simultaneously were derived from the energy balance of canopy. Transpiration and microclimate variables such as net radiation, solar radiation, humidity, canopy and air temperature, etc. were simultaneously measured to estimate parameters of model equations and to verify the suggested model. Leaf boundary layer resistance was calculated as a function of Nusselt number and stomatal diffusive resistance was parameterized by solar radiation and leaf-air vapor pressure deficit. The equation for stomatal diffusive resistance could explain more than 80% of its variation and the calculated stomatal diffusive resistance showed good agreements with the measured values in situations independent of which the constants of the equation were estimated. The canopy net radiation calculated by Stanghellini's model<sup>5,16)</sup> with slight modification agreed well with the measured values. The present transpiration model, into which aforementioned component equations were assembled, was found to predict the canopy temperature, instantaneous and daily transpiration with considerable accuracy in greenhouse climates.

주 제 어 : 토마토, 증산, 기공확산저항, 순복사, 온실

Key words : tomato, transpiration, stomatal diffusive resistance, net radiation, greenhouse

<sup>1)</sup> 이 연구는 '94~'96 농림수산 특정연구사업 연구비 지원으로 수행되었음.

## 서 언

溫室은 露地에 비하여 日射量과 풍속이 낮고 濕度가 높아 蒸散이 감소되기 쉽다. 따라서 온실재배 토마토의 경우 칼슘 부족이 야기되거나 어린잎의 發育이 저해되어 收量이 감소하기 쉬우므로<sup>1,2)</sup> 蒸散을 촉진할 수 있도록 온실 微氣象 環境을 적절히 조절하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 온실의 微氣象 환경과 蒸散과의 관계를 정확하게 파악할 수 있는 증산 모델의 개발이 필요하며 또한 온실 재배 작물의 정확한 灌溉量을 결정하는데 있어서도 정확한 蒸散量 豫測 모델은 필수적이다.

이와 같은 이유에서 온실 재배 작물의 蒸散量 豫測 및 이를 이용한 온실 미기상 조절과 관계 제어에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 우리 나라에서는 이 분야의 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 蒸散 모델은 蒸散에 크게 영향을 주는 要因인 日射量, 대기의 飽差, 風速 등과 蒸散量과의 回歸式을 誘導한 經驗的 모델<sup>4,5,11)</sup>과 作物 群落의 熱 및 物質 收支에 근거한 理論的 모델<sup>1,3,7,8,12,15)</sup>로 대별할 수 있다. 經驗 모델은 氣象條件, 作物의 發育 段階, 作物의 栽植方法 등이 달라지면 이용할 수 없고 각 조건에 따라서 係數를 다시 추정하여야 하는 문제점이 있다<sup>7)</sup>. 熱收支式에 근거한 모델들은 기본적으로 Penman-Monteith식<sup>10)</sup>과 類似하며, 각 모델들은 純輻射量(Rn), 葉面境界層擴散抵抗( $r_a$ ), 氣孔擴散抵抗( $r_s$ )을 계산하는 방법이 다른데 이 중  $r_s$ 가 가장 민감한 變數이다.  $r_s$ 의 계산 방법과 모델의 계수 추정에 이용한 環境 範圍에 따라서 全體 모델의 適用 範圍가 달라진다. Stanghellini 모델<sup>15)</sup>을 Jolliet 과 Bailey<sup>7)</sup>가 영국의 Silsoe에서 檢證한 결과 蒸散量 推定의 정확도가 매우 높다고 하였으나, Papadakis 등<sup>12)</sup>과 Pieters<sup>14)</sup>는 Stanghellini 모델<sup>15)</sup>은 증산량 추정의 정확도가 매우 낮다고 하였는데 그 이유가  $r_s$  計算 모델의 係數 추정이 이들의 實驗條件보다 낮은 日射 條件에서 이루어졌기 때문이라고 하였다. 한편 위에서 언급한 6개의 이론 모델을

Lee<sup>9)</sup>가 우리 나라 여름의 온실 기후 조건에서 검증한 결과 우리 나라에서 그대로 적용하기에는 모든 모델이 문제점이 있다고 하였다. 예를 들어 Stanghellini의 모델<sup>15)</sup>은 흐린 날에는 증산량을 정확하게 추정하였으나 맑은 날의 경우는 실측치보다 58%나 증산이 낮게 추정된다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 온실재배 토마토 군락의 열수지 및 물질 수지에 근거한 증산모델을 구축하고 실험을 통하여 모델에 필요한 계수의 추정과 모델의 검증을 수행하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 증산모델의 설계

#### 1.1 모델의 개요

토마토의 단위 엽면적당 에너지 수지는 잎에 의한 貯熱(heat storage)을 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. Papadakis 등<sup>12)</sup>은 토마토 잎의 저열은 낮의 경우  $\pm 10W/m^2$  이내이고 야간에는 0에 가깝다고 하였으며 또한 Stanghellini<sup>15)</sup>도 토마토 군락에 의한 저열은 다른 에너지 수지항에 비하여 매우 적다고 하였다.

$$Rn = H + IE \quad (1)$$

여기서, Rn : 순복사( $W/m^2$ ), H : 현열교환( $W/m^2$ ), IE : 잠열교환( $W/m^2$ )을 의미한다. 온실 공기와 토마토 잎 사이의 현열교환(H)은 다음의 식으로 표현할 수 있다<sup>10)</sup>.

$$H = \frac{\rho_a C_p (T_i - T_{ah})}{r_{ah}} \quad (2)$$

여기서  $\rho_a$  : 공기의 밀도( $kg/m^3$ ),  $C_p$  : 공기의 정압비열( $J/kg/K$ ),  $T_i$  : 엽온(K),  $T_{ah}$  : 기온(K),  $r_{ah}$  : 열의 엽면경계층확산저항( $s/m$ )이다.

온실 공기와 토마토 잎 사이의 잠열교환(IE)은 수증기의 엽면경계층 및 기공 확산저항이 직열관계에 있는 것으로 가정하여 다음의 식으로 표현할 수 있다<sup>10)</sup>.

$$IE = \frac{\rho_a C_p}{\gamma} \cdot \frac{e_{is} - e_a}{r_{av} + r_s} \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$ : 건습계상수(Pa/K),  $e_{is}$ : 엽온에서의 포화증기압(Pa),  $e_a$ : 대기의 수증기압(Pa),  $r_{av}$ : 수증기의 엽면경계층확산저항(s/m),  $r_s$ : 기공확산저항(s/m)이다.

한편 엽-대기수증기압차(leaf-air vapor pressure deficit, LVPD)는 포화 수증기압 곡선으로부터 포차 및 엽온과 기온의 차로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{is} - e_a = (e_{as} - e_a) + \delta(T_1 - T_a) \quad (4)$$

여기서,  $e_{as}$ : 온실 공기의 포화수증기압(Pa),  $\delta$ : 포화수증기압곡선의 기울기(Pa/K)이다.

Monteith와 Unsworth<sup>10)</sup>에 의하면  $r_{av}/r_{ah} = (\kappa/D_v)^{0.67} = 0.93$ (여기서  $\kappa$ ,  $D_v$ 는 각각 대기중 열 및 수증기 확산계수)이고, 위의 (1)~(4) 식으로부터 증산잠열교환과 엽온 계산식을 유도하면 다음과 같다.

$$IE = \frac{\frac{\delta}{\gamma} Rn + \frac{\rho_a C_p}{\gamma r_{ah}} (e_{as} - e_a)}{0.93 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_s}{r_{ah}}} \quad (5)$$

$$T_1 - T_a = \frac{\frac{0.93r_{ah} + r_s}{\rho_a C_p} Rn + \frac{1}{\gamma} (e_{as} - e_a)}{0.93 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_s}{r_{ah}}} \quad (6)$$

증산을 계산할 때 식(3) 대신에 식(5)를 이용하면 엽온을 측정할 필요가 없기 때문에 유리하며 또한 식(6)으로부터 엽온을 동시에 추정할 수 있다.

토마토 군락내의 모든 잎의 확산 저항은 병렬 관계에 있으며 또한 잎 표면과 이면의 저항이 같고 병렬 관계가 있는 것으로 가정하여<sup>3,12,15)</sup> 엽면적지수(LAI), 엽면경계층확산저항( $r_{ah}$ ) 및 기공확산저항( $r_s$ )으로부터 군락의 엽면경계층확산저항( $r_{ah,c}$ )과 기공확산저항( $r_{s,c}$ )을 다음과 같이 계산하였다.

$$r_{ah,c} = \frac{r_{ah}}{2LAI} \quad (7)$$

$$r_{s,c} = \frac{r_s}{2LAI} \quad (8)$$

단위 엽면적당 에너지 수지식으로부터 유도한 식(5), (6)에서 엽면경계층확산저항( $r_{ah}$ )과 기공확산저항( $r_s$ )을 각각 식(7), (8)의 군락 엽면경계층확산저항( $r_{ah,c}$ )과 군락 기공확산저항( $r_{s,c}$ )으로 대치하면 군락의 증산과 온도는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$IE = \frac{\frac{\delta}{\gamma} Rn + \frac{2LAI\rho_a C_p}{\gamma r_{ah}} (e_{as} - e_a)}{0.93 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_s}{r_{ah}}} \quad (9)$$

$$T_1 - T_a = \frac{\frac{0.93r_{ah} + r_s}{2LAI\rho_a C_p} Rn + \frac{1}{\gamma} (e_{as} - e_a)}{0.93 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_s}{r_{ah}}} \quad (10)$$

위의 식(9), (10)에서 Rn은 식(5), (6)과는 달리 군락의 순복사(W/m<sup>2</sup>)이며,  $T_1$ 는 군락의 온도(K)이다. 모델에 의한 군락 증산 예측에는 군락 온도 실측치를 이용하지 않고 식(9), (10)을 반복 계산하여 증산과 엽온을 동시에 추정한다.

## 1.2 군락 순복사

군락의 증산량 예측에서 가장 중요한 것 중의 하나는 군락의 순복사량(Rn)을 정확하게 추정하는 것이다. 본 모델에서 군락의 순복사는 반투명 매질의 복사교환 이론식<sup>15,16)</sup>을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Rn = F \{ (1 + \tau_s \rho_g) [(1 - \tau_s) - (1 - \tau_1) \rho_c] R_s + (1 - \tau_1) \sigma (\epsilon_u T_u^4 + \epsilon_d T_d^4 - 2\epsilon_c T_c^4) \} \quad (11)$$

여기서  $R_s$ : 온실내의 일사량(W/m<sup>2</sup>),  $\rho_g$ ,  $\rho_c$ : 각각 멀칭한 프라스틱필름 및 토마토 폐쇄 군락의 반사율,  $\epsilon_u$ ,  $\epsilon_d$ ,  $\epsilon_c$ : 각각 군락 상부 및 하부 표면으로 장파복사를 사출하는 복사체의 복사능과 군락의 복사능,  $T_u$ ,  $T_d$ : 각각 군락 상부 및 하부 표면으로 장파를 사출하는 복사체의 온도,  $\tau_s$ ,  $\tau_1$ : 각각 단파복사와 장파복사의 투과율이다. 모델에서  $T_u$ 와  $T_d$ 는 각각 온실 피복재 내부 표면온도 및 지표면의 온도로 하

여야 하나 이들을 측정하거나 예측하는 어려움을 피하기 위하여 온실의 기온으로 대체하고 실험을 통하여  $\epsilon_u$ 와  $\epsilon_d$ 를 결정하여 이용하였다.  $\rho_u$ 와  $\rho_d$ 는 각각 0.09와 0.12를 이용하였다. 모델에서  $\epsilon_u$ 와  $\epsilon_d$ 는 각각 실험적으로 추정된 0.94와 0.93을 이용하였으며 군락 복사능  $\epsilon_c$ 는 0.95를 이용하였다. 단파복사와 장파복사의 군락 투과율은 엽면적지수(LAI), 단파복사의 흡광계수( $k_s$ ) 및 장파복사의 흡광계수( $k_l$ )로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_s = e^{-k_s LAI} \quad (12)$$

$$\tau_l = e^{-k_l LAI} \quad (13)$$

군락의 흡광계수  $k_s$ 와  $k_l$ 은 Stanghellini<sup>15,16)</sup>가 토마토 군락에 대하여 측정된 값인 0.48과 0.64를 각각 사용하였다. 한편 식(10)에서 F는 條植하는 작물에서 이랑의 형태에 따른 군락의 흡광 감소를 보정하기 위한 변수로서 다음과 같이 계산된다<sup>16,17)</sup>.

$$F = [1 - 0.07(1 - b)(4.7 - a)] \frac{1 - 0.64\tau_l^{1.18} - 0.36\tau_s^{2.75b}}{1 - 0.64\tau_l^{1.18} - 10.36\tau_s^{2.75}} \quad (14)$$

여기서, a와 b는 각각 군락의 높이와 이랑 폭의 인접이랑 중앙부간의 거리에 대한 비이다.

### 1.3 확산저항

위의 모델로 증산을 예측하기 위하여는 엽면경계층확산저항( $r_{ah}$ )과 기공확산저항( $r_s$ )를 평가하여야 한다. 엽면경계층확산저항은 Nusselt number(Nu)와 다음과 같은 관계가 있다<sup>10)</sup>.

$$r_{ah} = \frac{d}{\kappa Nu} \quad (15)$$

여기서,  $\kappa$ 는 공기의 열확산계수( $m^2/s$ ), d는 토마토 잎의 특성길이(m)이다.

강제 대류의 경우 Nu는 Reynold's number(Re) 및 Prandtl number(Pr)로 다음과 같이 나타내었다<sup>10)</sup>.

$$Nu = 0.66Re^{0.5}Pr^{0.33} \quad (16)$$

자유 대류의 경우 Nu는 Grashof number(Gr)에 의하여 다음과 같이 나타내었다<sup>10,13)</sup>.

$$Nu = 0.24Gr^{0.25}, \text{ for } T_1 < T_a \quad (17)$$

$$Nu = 0.37Gr^{0.25}, \text{ for } T_1 > T_a$$

온실 작물의 엽면경계층내에서는 혼합 대류가 주류를 이루므로 엽면경계층저항은 자유대류에서의 저항( $r_{a,fr}$ )과 강제대류에서의 저항( $r_{a,fd}$ )을 다음과 같이 병렬관계로 계산하였다.

$$r_{ah} = \frac{r_{a,fd} r_{a,fr}}{r_{a,fd} + r_{a,fr}} \quad (18)$$

기공확산저항은 일사량, LVPD, 엽온, CO<sub>2</sub> 농도, 엽수분포텐셜 등에 의하여 좌우되는 것으로 알려져 있다<sup>3,4,7,12,15)</sup>. 그러나 본 모델에서는 이들 중 가장 영향도가 큰 일사량과 LVPD만을 이용하여 다음과 같이 표현하였으며 실측한 기공확산저항, 일사량, LVPD 등의 자료를 이용하여 상수들을 추정하였다.

$$r_s = r_{sm} [1 + e^{-a_1(R_s - a_2)}] [1 + e^{-b_1(LVPD - b_2)}] \quad (19)$$

여기서,  $r_{sm}$ : 최소기공확산저항(s/m),  $R_s$ : 온실내의 일사량(W/m<sup>2</sup>), LVPD: 엽-대기 수증기압차(hPa),  $a_1, a_2, b_1, b_2$ : 상수이다.

## 2. 모델 변수 추정 및 검증 실험

이 실험은 서울대학교 부속 실험농장에 위치한 南北棟의 Venlo型 유리온실에서 1996년에 실시되었다. 토마토 品種 瑞光을 1월 17일 播種 育苗하여 3월 19일 플라스틱 箱子[27cm(W)×44.5cm(L)×30cm(D)]에 定式하여 栽植密度가 8株/m<sup>2</sup>가 되도록 配置하였고, 토양 증발을 막기 위하여 투명 플라스틱 필름을 멀칭하였다. 물관리는 点滴灌溉 시스템으로 土壤水分張力이 0.2bar 이하가 되도록 관개하였다. 온실의 환경 관리는 야간 온도를 15°C로 설정하였으며 晝間에는 25°C 이상이 되면 天窓을 열어 換氣가 되도록 하였다.

증산량은 群落의 중앙에 위치한 2個體에 대하여 測定하였으며, 줄기의 熱收支(stem heat balance)를 이용하는 sapflow meter(model

SGB10 & SGB13, Dynamax Inc, Houston, TX)를 줄기의基部 근처에 설치하여 측정하였다. 추가로 sensor의 heater 중앙부에 위치한 줄기의表皮 약 1mm 깊이에 thermocouple을 설치하여 줄기의 온도를 동시에 측정하였으며, 이를 줄기의 heat storage를 補正하여 증산량을 계산하는데 이용하였다<sup>6)</sup>. 10초마다 증산을 측정하여 30분간 평균치를 증산 모델의 검정에 이용하였다. 측정 전에 물을 충분히 관개하였으며, 측정 개체 및 인접 개체들의 葉長(LL, cm)과 葉幅(LW, cm)을 측정하여 葉面積(LA)을 다음 식(이변우, 미발표)에 의하여 계산하였다.

$$LA(\text{cm}^2) = 5.09 + 0.287LL * LW + 5.347 * (LL * LW / 1000) \quad (20)$$

(n=300, R<sup>2</sup>=0.9037)

2 개체에 대하여 측정한 증산량과 葉面積을 이용하여 床面 1m<sup>2</sup>당 群落 蒸散량을 계산하였다.

蒸散量 측정 이외에 온실 내부의 日射量(RSu), 群落 下部의 日射量(RSd), 群落의 반사율( $\rho_c$ ), 群落 上部의 純輻射量(Rnu), 下部의 純輻射量(Rnd), 온실 중앙의 均락 하부, 중앙부, 상부 세 곳에서의 乾濕球 溫度, 葉溫(infrared thermometer), 風速(hot wire anemometer) 등을 10초 간격으로 측정 10분간 평균을 이용하였다. 均락의 純輻射量(Rn)은 다음과 같이 계산하였다.

$$Rn = (Rnu - Rnd) + (\rho_c - \rho_s)RSu \quad (21)$$

여기서  $\rho_c$ ,  $\rho_s$ 는 각각 均락과 床面の 反射率이다.

한편 기공확산저항은 증산량, 엽온, 대기의 증기압 등 실측치를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$r = -0.93r_{ah} + \frac{\rho_a C_p (e_{is} - e_a)}{\gamma \cdot IE} \quad (22)$$

## 결과 및 고찰

### 1. 기공확산저항

그림 1은 1996년 7월 18일부터 20일까지 3일 동안 10분 간격으로 측정한 증산량, 엽온, 수증기압 등의 자료로부터 식 (22)를 이용하여 계산한 기공확산저항과 온실 내부 일사량의 관계를 나타낸 것이다. 기공확산저항은 기존의 보고들<sup>3, 12, 15)</sup>과 마찬가지로 일사량 증가에 따라서 급격하게 감소하였으며, 일사량 100W/m<sup>2</sup>이 되면 일사량에 따른 기공확산저항의 차이는 크지 않고 일사량 이외의 환경요인들에 의해서 지배되는 것으로 판단된다.

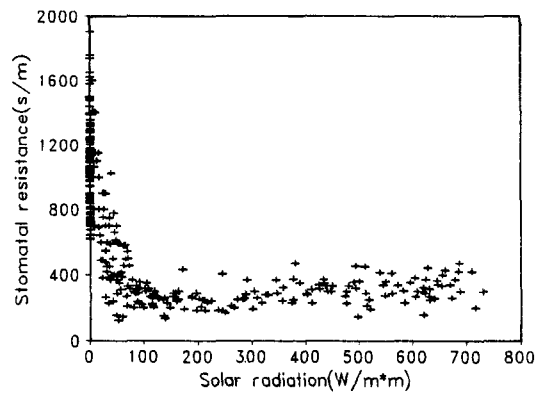


Fig. 1. Stomatal resistance of tomato plotted against solar radiation in greenhouse.

자연 상태에서는 일사량, 기온, 수증기압 등은 서로 상관을 가지고 변하므로 이들 요인을 구별하여 기공확산저항에 미치는 영향을 파악하기는 매우 어렵다. 따라서 그림 1에서 보는 바와 같이 일사의 영향이 적을 것으로 판단되는 일사량 200W/m<sup>2</sup>이상일 때의 자료만을 이용하여 LVPD와 기공확산저항과의 관계를 나타낸 것이 그림 2이다. 자료가 분산되어 있기는 하나 LVPD가 증가함에 따라서 기공확산저항이 증가하는 분명한 경향을 보여 기존의 보고들<sup>3, 12, 15)</sup>과 같은 결과였다.

모델에 의하여 증산을 정확하게 계산하기 위하여는 환경조건의 변화에 따른 기공확산저항의 변화를 예측할 수 있어야 한다. 지금까지 증산량 예측 모델이 다수 개발되었으나<sup>1, 3, 7, 8, 12, 15)</sup>

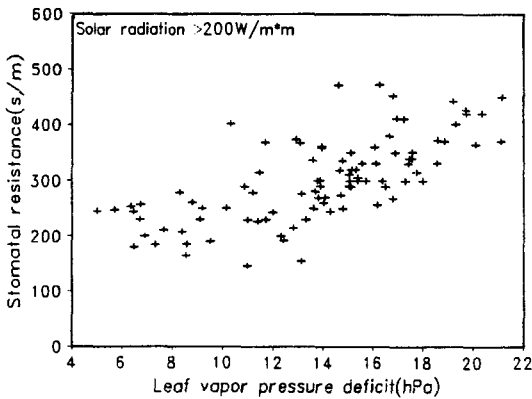


Fig. 2. Stomatal resistance of tomato plotted against leaf vapor pressure deficit.

이 모델들은 다른 지역에 적용되는 경우 증산 예측의 정확도가 낮아지는 경우가 대부분인데, 그 이유는 기공의 확산저항 모델의 계수 추정 기상조건이 적용지의 기상조건과 상이하기 때문이다<sup>9,12,14</sup>. 일사, 엽온, LVPD, CO<sub>2</sub> 농도 등이 기공확산저항에 영향을 미치나 본 모델에서는 일사와 LVPD만을 고려하여 식 (19)의 계수를 추정하였으며 그 결과는 표 1 과 같다. 자연상태에서는 LVPD와 엽온간의 colinearity가 매우 강하여 이들 효과를 분리하여 고려하기가 매우 어려우며 또한 LVPD를 통하여 기공확산저항에 대한 엽온의 영향이 반영되고 탄산가스를 시용하지 않는 경우 자연적인 CO<sub>2</sub> 농도 변화 범위에서는 기공확산저항에 대한 영향이 크지 않기 때문에 모델에서

엽온과 CO<sub>2</sub> 농도를 제외시켰다. Stanghellini<sup>15</sup>에 의하면 CO<sub>2</sub> 농도가 200ppm에서 500ppm으로 증가하는 경우 기공확산저항은 약5% 증대한다. 표 1에서 보는 바와 같이 모든 계수가 통계적으로 유의하며 또한 일사량과 LVPD를 이용한 본 모델은 기공저항 변화의 80% 이상을 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

기공확산저항의 실측치와 모델에 의하여 계산한 값의 경시적 변화를 10분 간격으로 나타낸 것이 그림 3이다. 낮 동안에는 실측치와 계산치간에 잘 일치하나 밤에는 계산치가 실측치보다 낮게 추정되는 경향이다.

그림 4, 5는 식(9), (10), 기공확산저항 모델[식 (19)]의 계수 추정치(표 1) 및 실측한 군락 순복사를 이용하여 계산한 증산속도 및 군락 온도의 경시적 변화를 실측치와 대비시켜 10분 간격으로 나타낸 것이다. 증산을 측정한 7월 18일은 매우 맑은 날이었으며 19일은 다소 구름이 낀 날이었고 20일은 매우 흐린 날이었다. 그림에서 보는 바와 같이 18일과 19일은 모델로 계산한 증산속도와 실측치간에 잘 일치하였으나 19일에는 한낮의 경우 실측치 보다 다소 높게 추정되는 경향을 보이고 있다. 한편 군락온도의 경우는 18일 야간에 다소 높게 추정되었으나 그 이외의 시간에는 실측치와 잘 일치하였다.

## 2. 기공확산저항 모델의 검증

기공확산저항 모델의 계수 추정에 이용하지 않았던 자료와 실측한 군락의 순복사량과 온

Table 1. Parameter estimates and statistics of stomatal resistance model(Eqn. 19).

Climatic variable	Parameter	Estimate	Standard error	t-value
Solar radiation(W/m <sup>2</sup> )	r <sub>sm</sub>	79.4	5.2	15.3**
	a <sub>1</sub>	2.34 × 10 <sup>-2</sup>	1.48 × 10 <sup>-3</sup>	15.8**
	a <sub>2</sub>	76.6	6.9	11.1**
Leaf vapor pressure deficit(hPa)	b <sub>1</sub>	7.90 × 10 <sup>-2</sup>	5.30 × 10 <sup>-3</sup>	14.9**
	b <sub>2</sub>	2.8	2.70 × 10 <sup>-1</sup>	10.4**
R-square=0.8020,		Standard error of estimated stomatal resistance=182s/m		

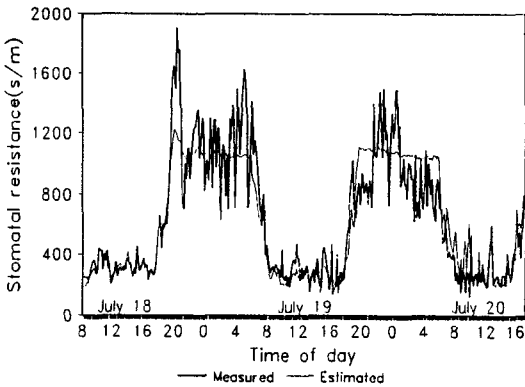


Fig. 3. Diurnal courses of measured and estimated stomatal resistance of tomato in glasshouse on three consecutive days in 1996.

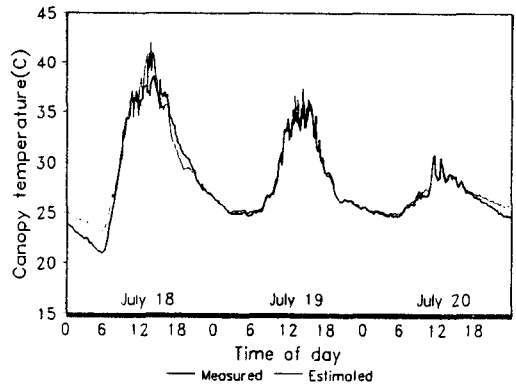


Fig. 5. Diurnal marches of measured and estimated canopy temperature of tomato in glasshouse on three consecutive days in 1996. Measured net radiation of canopy was used for the calculation.

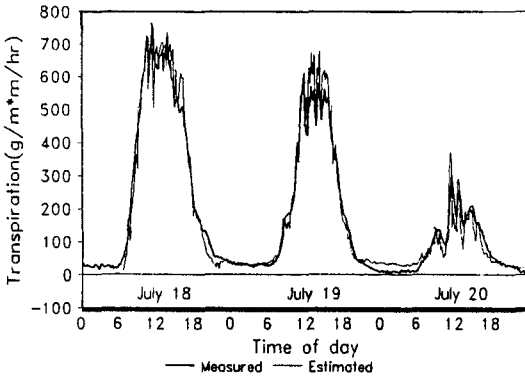


Fig. 4. Diurnal courses of transpiration fluxes of tomato measured and estimated by the present model in glasshouse on three consecutive days in 1996. Measured net radiation of canopy was used for the calculation.

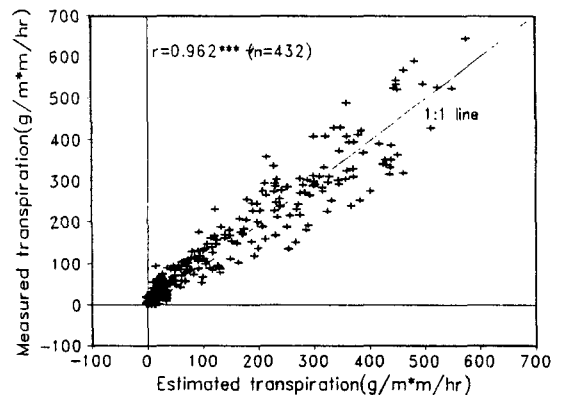


Fig. 6. Comparison of hourly transpiration fluxes measured and estimated on 10-minute intervals on three days. Data are independent of those used in the parameter estimation of stomatal resistance model, and the measured net radiation and canopy temperature were used for model calculation.

도를 이용하여 계산한 10분간격의 증산 속도 및 일 총증산량을 실측치와 대비한 것이 각각 그림 6과 그림 7이다. 증산속도의 실측치와 추정치간의 상관은  $r=0.962$ 로서 양자간에 잘 일치하였으며, 또한 일 총증산량의 경우도

추정 정확도가 매우 높았다. 따라서 본 연구에서 개발된 기공확산저항 모델은 실시간 및 일 총증산량을 예측하는 증산모델의 구성식으로 이용이 가능한 것으로 판단된다.

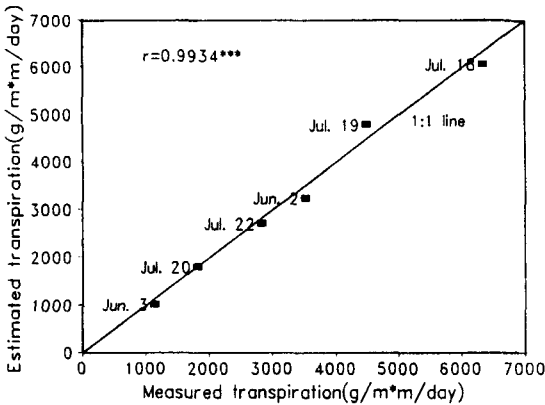


Fig. 7. Comparison of daily total transpiration measured and estimated by the model. Data are independent of those used in the parameter estimation of stomatal resistance model, and the measured net radiation and canopy temperature were used for model calculation.

### 3. 증산 모델의 검증

증산 모델을 실용적으로 이용할 수 있기 위하여는 모델에 필요한 입력 자료를 최소한으로 줄여야 하며 또한 모델의 변수 추정에 이용되지 않은 자료를 가지고 다양한 조건에서 검증되어야 한다. 증산량을 예측하는데 있어서 가장 중요한 것 중의 하나는 군락의 순복사량을 정확하게 평가하는 것이다. 그러나 군락의 순복사량을 관측하여 모델의 입력 변수로 이용하는 것은 관측의 어려움 등으로 인하여 현실성이 없다. 따라서 본 모델에서는 일반적으로 관측하고 있는 일사량 및 기온을 입력변수로 하여 식(11)에 의하여 순복사량을 계산하였으며 또한 군락 온도 역시 실측치 대

신에 식(10)에 의한 추정치를 이용하였다. 본 모델에서 순복사량[식(11)], 기공확산저항[식(19)] 및 엽면경계층확산저항[식(18)] 등은 군락 온도의 함수이고 또한 군락 온도[식(10)]은 이들의 함수이기 때문에 해석적으로 모델을 풀 수 없고 수치 해석을 하여야 한다. 본 연구에서는 반복 계산에 의하여 군락 온도를 먼저 계산하고 이를 이용하여 증산량을 계산하였다. 즉 군락 온도의 초기치를 가지고 식(11), (18), (19)에 의하여 각각 순복사량, 엽면경계층확산저항, 기공확산저항을 계산하고 이들을 식(10)에 대입하여 군락 온도를 계산하는 과정을 반복하여 전 단계와 현 단계에서 계산된 엽온의 차가 0.001K 이하가 되면 반복 계산을 멈추고 현 단계에서 계산된 군락 온도, 순복사량, 기공 및 엽면경계층확산저항을 식(9)에 대입하여 증산속도를 계산하였다. 이와 같이 하여 계산된 군락의 순복사량, 온도, 증산속도 및 일 총증산량을 실측치와 대비한 것이 각각 그림 8, 9, 10, 11이다. 한편 본 모델의 검증에는 기공확산저항 모델의 계수 추정에 이용한 날의 자료는 제외하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 군락 순복사의 실측치와 모델 추정치는 매우 잘 일치하였으며,

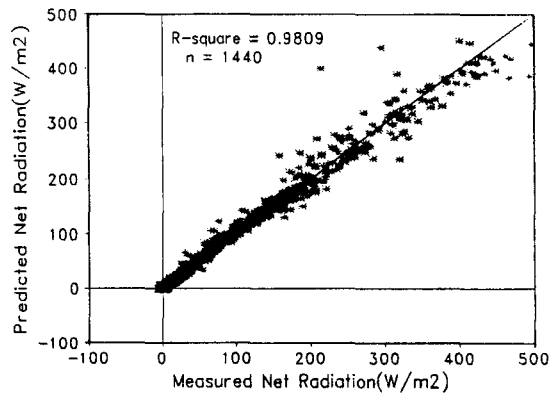


Fig. 8. Comparison of canopy net radiations measured and estimated at 10 minutes interval for 10 days during 10 days in June and July, 1996.



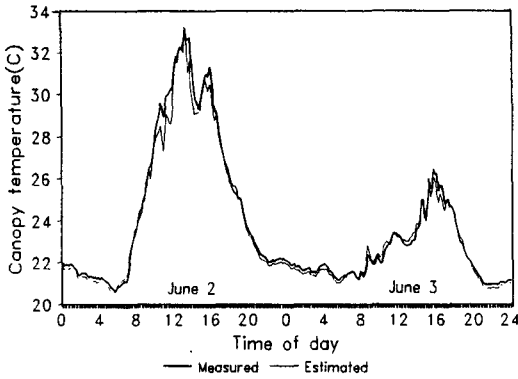


Fig. 9. Diurnal marches of canopy temperature measured and estimated by the present transpiration model in glass-house on two consecutive days in 1996.

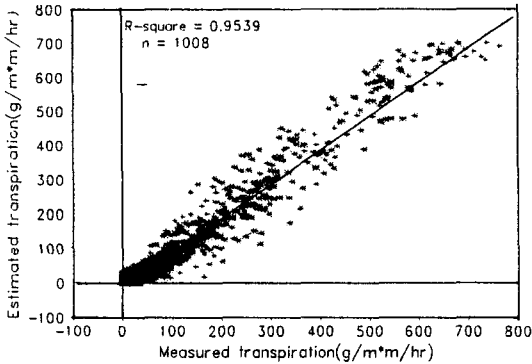


Fig. 10. Comparison of hourly transpiration fluxes measured and estimated by the present transpiration model at 10-minute intervals on seven days during June and July, 1996.

또한 그림 9, 10, 11에서 보는 바와 같이 균락 온도, 증산속도 및 일 총증산량 또한 실측치와 매우 잘 일치할 뿐만 아니라 실측한 균락의 순복사량 및 균락을 모델의 입력 변수로 하여 증산을 예측한 경우(그림 6, 7)와 비교하여도 추정치의 정확도가 떨어지지 않았다. 따

라서 본 연구에서 개발된 증산 예측모델은 온실 환경의 제어나 관계 제어를 위한 구성 모델로 충분히 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

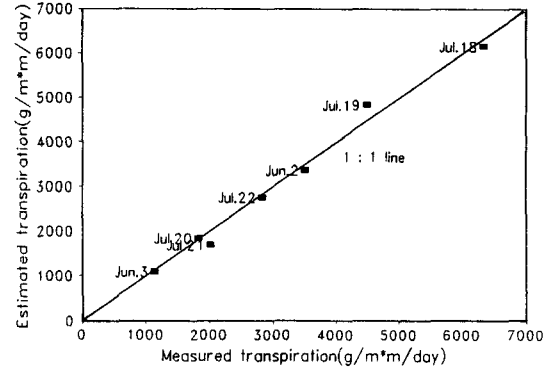


Fig. 11. Comparison of daily total transpiration measured and estimated by the present transpiration model for 7 days during June and July, 1996.

## 적 요

본 연구에서는 온실 재배 토마토 균락의 열수지에 근거한 증산모델을 구성하고 실험을 통하여 모델에 필요한 계수의 추정과 모델의 검증에 수행하였다. 온실의 일사량과 열-대기수증기압차(LVPD)를 매개변수로 하는 기공확산저항 추정식을 구성하여 기공확산저항 실측 자료를 이용하여 추정식의 계수를 추정하였다. 이 추정식으로 기공확산저항 변이의 80% 이상을 설명할 수 있었으며 추정식에 사용하지 않았던 독립 자료를 이용하여 검정한 결과 推定 精度가 높아 증산예측 모델의 구성식으로 이용될 수 있는 것으로 판단되었다. 반투과성 매질의 복사 흡수이론을 적용한 Stanghellini의 식<sup>15,16)</sup>을 다소 변형하여 모델의 균락 순복사 추정식으로 사용하였으며 이 추정식에 의하여 계산된 순복사량은 실측치와 잘 일치하였다. 계수 추정에 사용하지 않았던

독립 자료를 이용하여 순복사 및 기공확산저항 추정식으로 구성된 증산예측 모델의 균락 온도 및 蒸散豫測 精度를 검증하였다. 모델에 의하여 계산된 균락 온도, 순간 증산속도 및 일 총증산량은 실측치와 잘 일치하여 본 연구에서 작성된 증산 예측 모델은 온실 재배 토마토의 환경제어, 관개제어 등에 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

## 인 용 문 헌

1. Aikman, D. P. and G. Houter. 1990. Influence of radiation and humidity on transpiration: Implications for calcium levels in tomato leaves. *J. Hort. Sci.* 65(3) : 245-253.
2. Bakker, J. C. 1990. Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.* 65(3) : 323-331.
3. Boulard, T., A. Baille, M. Memoire and F. Vignette, 1991. Mesures et modelisation de la resistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. *Agronomie*(1991) 11 : 259-274.
4. De Graaf, R. and J. van den Ende, 1981. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crops. *Acta Hort.* 119 : 147-158.
5. FAO. 1977. Crop water requirements. FAO irrigation and Drainage Paper 24 : 15-44.
6. Grime, V. L., J. I. L. Morison and L. P. Simmonds. 1995. Including the heat storage term in sapflow measurements with the stem heat balance method. *Agric. and For. Meteor.* 74(1995) : 1-25.
7. Jolliet, O. and B. J. Bailey. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurements and models comparison. *Agric. and For. Meteor.* 58(1992) : 43-62.
8. Jolliet, O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* (1994) 57 : 23-37.
9. Lee, B. W. 1996. Transpiration measurement and models comparison in greenhouse tomato. 1996 세계한민족 과학기술자 종합학술대회 논문집(농학.식품과학그룹) : 2067-2073.
10. Monteith, J. L. and M. H. Unsworth. 1990. Principles of environmental physics. 2nd edn. Edward Arnold. pp. 291.
11. Okuya, A. and T. Okuya. 1988. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. *Acta Hort.* 230 : 307-31.
12. Papadakis, G., A. Frangoudakis and S. Kyritsis. 1994. Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and greenhouse environment. *J. Agric. Engng Res.* (1994) 57 : 217-227.
13. Parkhurst, D. F., P. R. Duncan, D. M. Gates and F. Kreith, 1968. Convection heat transfer from broad leaves of plants. *J. Heat Transfer (Trans. ASME)* 90 : 71-76.
14. Pieters, J., 1995. Influence of condensation on the heat balance and light transmission of a greenhouse. Ph. D. Dissertation, Ghent University. pp. 260.
15. Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. Ph.D. Dissertation, Wageningen Agricultural University. pp. 150.
16. Stanghellini, C. and T. de Jong. 1995. A

model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agric. and For. Meteor.* 76(1995) : 129-140.

17. Stoffers, J. A. 1975. Radiation absorption of canopy rows. *Acta Hortic.* 46 : 91-95.