

Penman-Monteith 모델에 의한 식물공장 내 상추(*Lactuca sativa* L.)의 증산량 예측

이준우 · 엄정남 · 강우현 · 신종화 · 손정익*

서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

Prediction of Transpiration Rate of Lettuces (*Lactuca sativa* L.) in Plant Factory by Penman-Monteith Model

June Woo Lee, Jung Nam Eom, Woo Hyun Kang, Jong Hwa Shin, and Jung Eek Son*

Department of Plant Science and Research Institute for Agriculture and Life Sciences,
Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. In closed plant production system like plant factory, changes in environmental factors should be identified for conducting efficient environmental control as well as predicting energy consumption. Since high relative humidity (RH) is essential for crop production in the plant factory, transpiration is closely related with RH and should be quantified. In this study, four varieties of lettuces (*Lactuca sativa* L.) were grown in a plant factory, and the leaf areas and transpiration rates of the plants according to DAT (day after transplanting) were measured. The coefficients of the simplified Penman-Monteith equation were calibrated in order to calculate the transpiration rate in the plant factory and the total amount of transpiration during cultivation period was predicted by simulation. The following model was used: $E_d = a * (1 - e^{-k*LAI}) * RAD_{in} + b * LAI * VPD_d$ (at daytime) and $E_n = b * LAI * VPD_n$ (at nighttime) for estimating transpiration of the lettuce in the plant factory. Leaf area and transpiration rate increased with DAT as exponential growth. Proportional relationship was obtained between leaf area and transpiration rate. Total amounts of transpiration of lettuces grown in plant factory could be obtained by the models with high r^2 values. The results indicated the simplified Penman-Monteith equation could be used to predict water requirements as well as heating and cooling loads required in plant factory system.

Additional key words : leaf area, canopy, radiation, simulation, water requirement

서 론

식물공장 환경에서 환경조절 및 에너지 소비 예측을 위해서는 환경요소들의 변화요인을 파악해야 한다. 이러한 환경요소들 중 온도와 습도 등 지상부 환경요소 제어는 많은 에너지가 소모되는 부분으로, 이는 식물공장의 특성상 식물체의 생장에 적합한 70%가량의 높은 습도를 유지하는 데서 비롯된다. 수증기는 높은 비열과 잠열을 가지고 있어, 온도 변화 시 많은 에너지가 소모되며 냉방 시, 열교환기에서 응축되는 과정에서도 많은 에너지가 소모된다. 냉방 시 수증기가 응축되어 습도가 낮아지는 현상은 일반적인 인간 거주환경에서는 낮은 습도를 유지하여 쾌적한 환경을 조성하게 되지만, 높은 습도

를 유지해야 하는 식물공장 환경에서는 잠열에 의한 에너지 손실과 가습기 구동에 의한 에너지 소모 등 복합적으로 에너지 소모량이 커지는 요인이 되고 있다. 이렇게 높은 습도 유지에 의한 에너지 수지를 정확히 예측하고 모델화하기 위해서는 습도에 영향을 주는 요인들을 정량화할 필요가 있다.

식물체는 광합성 과정에서 많은 양의 물을 증산을 통해 대기 중으로 방출하는데, 식물체가 뿌리에서 흡수한 수분의 1%만이 대사활동에 사용되고 99%는 잎을 통해 증발된다(Rosengerg 등, 1983; Salisbury와 Ross, 1992). 식물공장과 같은 밀폐된 공간에서 이 같은 대량의 수분 증발은 습도에 큰 영향을 주는 요인이 되므로 이를 측정하여 정량화하면 식물공장 내에서의 냉방(제습)부하 및 가습 부하를 예측할 수 있다. 뿐만 아니라 생육기간에 따른 필요한 양액의 소모량을 작물의 증산량 기준으로 예측하는 것 역시 가능하다(Bakker 등, 1995; Jolliet과 Bailey, 1992).

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr
Received June 8, 2013; Revised June 11, 2013;
Accepted June 13, 2013

식물공장에서 작물 재배 기간 중 작물의 증산량을 알기 위해서 증산량 추정 모델이 도입된다. 작물의 엽에서의 증산과 외부 환경 요인들과의 관계를 바탕으로 여러 작물들에 대해 증산량을 추정하는 모델식이 개발되어 왔다(Carmassi 등, 2007; Marcelis 등, 1998; Medrano 등, 2005; Nederhoff 등, 1984; Stanghellini, 1987; Ta 등, 2011; Ta 등, 2012). 하지만 이러한 연구들은 온실에서 재배하는 환경을 기준으로 진행 되었는데, 작물의 증산에 영향을 주는 환경 요인들이 온실에 비해 엄밀하게 제어되는 식물공장에서는 이러한 연구들에 비해 증산량 추정 모델이 보다 간략하게 정리될 것이다. 따라서 본 연구에서는 Penman-Monteith 모델을 식물공장 내에서 제어 가능한 광조건과 기상조건, 두 조건에 대해 간략화하고 이를 통하여 식물공장 환경에서 재배되는 작물의 증산량을 예측해보고자 한다.

본 연구에서는 일반적인 식물공장의 생육조건 하에서 4 품종의 상추를 재배하면서 생육 기간에 따른 증산속도를 측정하고, 증산량 추정 모델을 이용하여 식물공장에서 재배 기간 중 증산으로 인해 발생하는 수분의 양을 예측해 보았다.

재료 및 방법

1. 생육 조건

실험은 서울대학교의 LED 식물공장 모듈에서 수행하였으며 청치마, 적치마(대농 종묘), 뚝섬청측면, 뚝섬적측면(영농사) 4가지 품종의 상추(*Lactuca sativa* L.)를 이용하였다. 파종 후 20일간의 육묘과정을 거친 후 식물공장 모듈로 정식한 후 25일간 작물을 생육시켰다. 식물공장 모듈의 광조건은 Red, Blue, White 각각 8:1:1 비율로 전체 광량은 15cm 기준으로 $145 \pm 10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 유지되었으며 일장은 낮, 밤 각각 16시간, 8시간으로 설정되었다. 재배기간 동안 이산화탄소 농도와 주야간 온도 및 상대습도는 각각 $1000 \pm 50 \text{ppm}$, $22 \pm 1/16^\circ\text{C}$, $70 \pm 5\%$ 로 유지되었다. 양액은 야마자키 상추 양액($\text{EC } 1.2 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)를 사용하였다.

2. 증산량 추정

증산량 추정 모델은 Baille 등(1994)에 의해 간략화된 Penman-Monteith 방정식을 광조건에 의한 영향과 수증기 포차에 의한 영향 두 부분으로 구분하여 사용하였다.

$$E_t = a * (1 - e^{-k \cdot \text{LAI}}) * \text{RAD}_{in} + b * \text{LAI} * \text{VPD} \quad (1)$$

단, E_t 는 증산속도($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$); RAD_{in} 는 입사 광량($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); VPD 는 수증기압 포차(mmHg); LAI 는 엽면적 지수; k 는 흡광계수; a , b 는 매개변수($\text{g} \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$).

mmHg^{-1}).

식물공장에서 작물 생육 시 광원의 on-off에 따라 주야의 변화가 설정되어 있고 주야간 설정 온도 역시 다르기 때문에 식(2)와 식(3)와 같이 주야간을 구분하여 증산량 추정 모델식을 사용하였다.

$$E_d = a * (1 - e^{-k \cdot \text{LAI}}) * \text{RAD}_{in} + b * \text{LAI} * \text{VPD}_d \quad \text{Daytime (RAD}_{in} > 0) \quad (2)$$

$$E_n = b * \text{LAI} * \text{VPD}_n \quad \text{Nighttime (RAD}_{in} = 0) \quad (3)$$

단, E_d 과 E_n 은 주간과 야간의 증산속도($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$); VPD_d 와 VPD_n 은 주간과 야간의 수증기압 포차(mmHg).

3. LAI 모델과 k 결정

일반적으로 생육기간에 따른 작물의 엽면적의 증가는 sigmoidal 형태를 보이는 것으로 알려져 있다(Motulsky와 Christopoulos, 2003). 하지만 본 실험에서 식물공장에서 생육된 상추는 측정 종료 시점 (DAT 25)까지 증가속도가 계속 증가하는 것으로 나타났기 때문에 LAI 증가 모델은 다음과 같은 지수적으로 증가하는 함수를 이용하였다.

$$\text{LAI} = \text{LAI}_0 + a * e^{b \cdot \text{DAT}} \quad (4)$$

단, a , b 는 상수; LAI_0 는 초기 엽면적 지수, DAT는 정식 후 일수.

상추의 각 품종별 흡광계수 k 값은 Lambert-Beer 방정식을 기반으로 한 다음 방정식(Nobel과 Long, 1985)을 통하여 계산하였다.

$$e^{-k \cdot \text{LAI}} = \text{RAD}_o / \text{RAD} \quad (5)$$

단, RAD 는 식물 군락 상단부 광량; RAD_o 는 식물 군락 하단부 광량.

식물 군락 상하단부 광량은 휴대용 광도 측정기(LI-250A, Li-Cor, USA)를 이용하여 측정하였다.

4. 엽면적과 증산속도 측정

정식 후 5, 10, 15, 20, 25일에 각 품종별 3개체씩 엽면적(LI-3100, Li-Cor, USA)과 증산속도를 측정하였다. 증산속도는 작물 각 개체별로 별도의 양액이 담긴 비이커에 옮긴 후 생육 환경조건에서 1시간 동안 식물체와 양액의 무게의 변화를 측정하고 이 무게 변화량을 식물체의 증산량으로 계산하였다. 품종 별 30주로 총 120주의 상추가 재배되었으며 192cm^2 당 1주를 재식하였다.

5. 실험설계 및 데이터 처리 방법

모든 측정은 품종 처리 별 3반복으로 하였으며 실험의

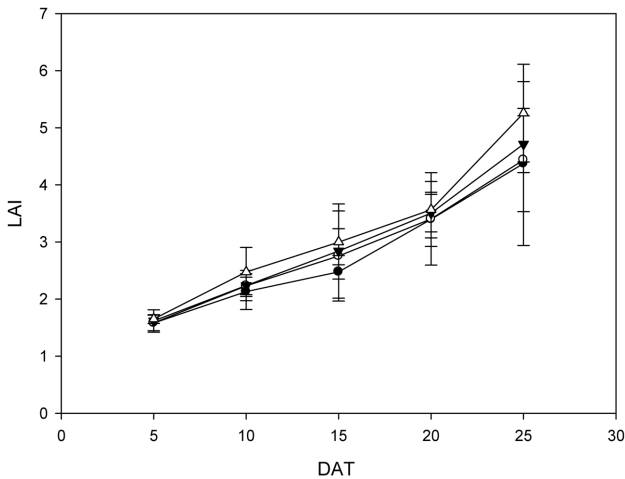


Fig. 1. Change in leaf area index (LAI) of lettuce with days after transplanting (DAT). Symbols of ●, ○, ▲, and △ mean CheongChiMa, JeokChiMa, CheongChukMyeon, and JeokChukMyeon, respectively.

통계처리는 SigmaPlot(Ver. 10.0, Systat Software Inc., USA) 소프트웨어를 사용하였다. 모델 시뮬레이션은 Berkeley Madonna(Ver. 8.3.18, Berkeley Madonna Inc., USA) 소프트웨어를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. LAI 발달과 균락 흡광도

모든 상추의 품종에서 엽면적은 생육 초기에 비교적 느리게 증가하다 생육기간의 진전에 따라 증가 속도가 점차 빨라지는 모습을 나타냈다(Fig. 1). 이 결과를 이용하여 엽면적 지수(LAI)를 추정하는 식(2)의 변수를 fitting 한 결과, 전체적으로 높은 결정계수(r^2)를 나타냈고 품종 별 상이한 변수 값을 확인하였다(Table 1).

각 품종의 상추의 LAI가 1인 시점에서 균락 상단부에서의 광량과 균락 하단부에서의 광량을 측정된 결과와 식(4)를 이용하여 추정된 각 품종 별 흡광계수 k 값은 Table 2와 같다. 전체적으로 0.49~0.61이었으며 청치마가 가장 낮았으며 적축면이 가장 높게 나타났다. 일반적으로 식물의 엽의 흡광계수가 0.63~0.86인 것(Medrano 등,

Table 2. Leaf area index (LAI), radiation measured above and below the plant canopy (RAD and RAD_o) and light extinction coefficient (k).

Cultivar	LAI	RAD	RAD _o	k
CheongChima	1.04	151.12	93.01	0.49
JeokChima	1.01	149.83	85.53	0.56
CheongChukMyeon	1.02	149.71	90.54	0.50
JeokChukMyeon	1.06	150.83	82.73	0.60

Table 3. Parameter values (a and b) and coefficient of determination (r^2) of fitting transpiration data.

Cultivar	a	b*10	r^2
CheongChima	0.02 ± 0.002	0.21 ± 0.07	0.96
JeokChima	0.02 ± 0.003	0.24 ± 0.03	0.88
CheongChukMyeon	0.01 ± 0.003	0.53 ± 0.19	0.90
JeokChukMyeon	0.04 ± 0.002	0.04 ± 0.01	0.99

a and b: coefficients in Eq. 1.

2005; Ta 등, 2011)에 비해 비교적 낮은 것으로 나타났다. 이는 이전의 작물 수광량에 대한 연구가 자연광 조건에서 과채류를 중심으로 구축된 수학적 모델들에 기반을 두고 있는 데에 반해 식물공장은 태양광과 달리 광원의 위치가 고정적이며 내부 자재들에 의한 반사, 흡수 등으로 인해 작물이 수광하는 광 프로파일이 자연광 조건과 다르기 때문으로 추정되며, 이러한 식물공장 조건 내에서의 작물의 수광 패턴의 변화에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

2. 증산 속도

생육 기간에 따른 증산량은 엽면적과 유사하게 생육 초기에 비해 상대적으로 생육 후반부로 갈수록 증가량이 커지는 모습을 보였다(Fig. 2). 또한 적축면이 가장 크게 나타났고 청치마가 가장 낮게 나타났다. 이러한 경향은 증산량이 엽면적의 영향을 가장 크게 받는다는 사실을 보여주고 있다. 상추 이외의 다른 채소 작물들(Boulard와 Jemaa, 1993; De Graaf와 Van den Ende, 1981)이나 화훼 작물들(Baille 등, 1994)에서도 유사한 결과를 보였다.

Table 1. Parameter values (a, b and LAI₀) and coefficient of determination (r^2) from fitting LAI data.

Cultivar	a	b*10	LAI ₀	r^2
CheongChima	0.83 ± 0.13	0.03 ± 0.01	0.48 ± 0.07	0.995
JeokChima	1.82 ± 0.71	0.02 ± 0.01	0.58 ± 0.14	0.996
CheongChukMyeon	0.63 ± 0.27	0.03 ± 0.02	0.89 ± 0.34	0.978
JeokChukMyeon	1.28 ± 0.26	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.02	0.996

a and b: coefficients in Eq. 2.

LAI₀: Initial LAI in Eq. 2.

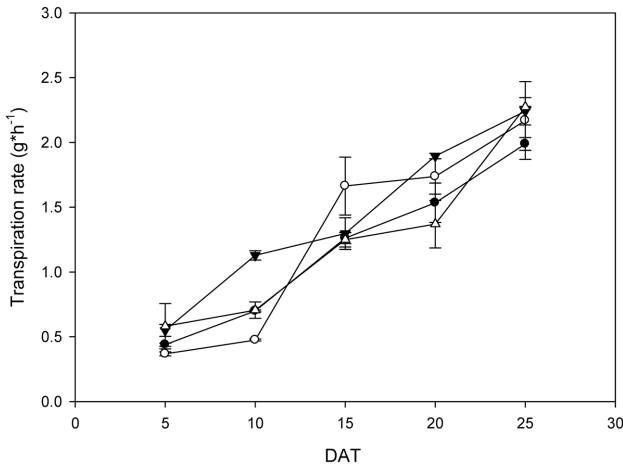


Fig. 2. Change in transpiration rate of one lettuce with days after transplanting (DAT). Symbols of ●, ○, ▲, and △ mean CheongChiMa, JeokChiMa, CheogChukMyeon, and JeokChukMyeon, respectively.

3. 모델식 fitting

각 품종 별 상추의 엽면적의 증가에 따른 증산속도의 변화는 Fig. 3과 같다. 엽면적에 대해서 증산량은 엽면적의 증가에 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 작물의 엽면의 기공을 통해 증산이 일어나므로 엽면적 증가에 따라 기공의 수가 증가하여 증산량도 증가하였다고 해석할 수 있다. Fig. 3의 결과를 이용하여 증산량을 추정하는 식(1)의 변수를 fitting 한 결과는, 전체적으로 높은 결정계수(r^2)를 나타냈고 품종 별 상이한 변수 값을 확인하였다(Table 2).

일반적으로 Penman-Monteith 방정식을 이용하여 환경 요인들에 대한 증산에 반응을 모델화한 연구들에서는 일

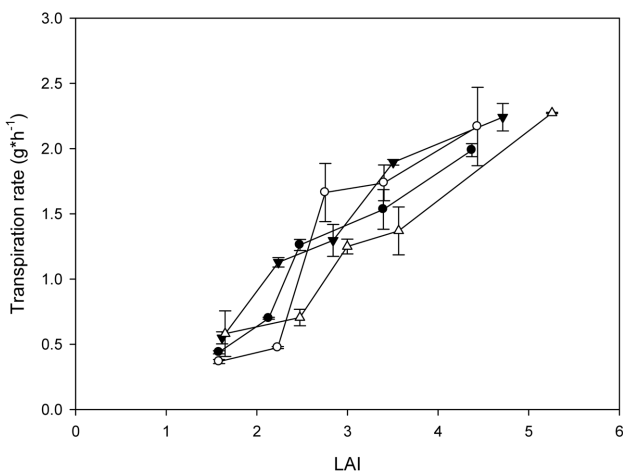


Fig. 3. Relationship between leaf area index (LAI) and transpiration rate of one lettuce. Symbols of ●, ○, ▲, and △ mean CheongChiMa, JeokChiMa, CheogChukMyeon, and JeokChukMyeon, respectively.

중 또는 일간 광량과 온습도 변화에 따라 실측값과 모델로 인한 추정값 사이에 큰 차이가 나타났던 것(Baille, 1994; Joillet과 Bailey, 1992; Medrano, 2005; Stanghellini, 1987)에 비해 인공광원으로 인해 일정한 광량이 조사되고 항온, 항습 유지로 인해 VPD의 변화가 없는 식물공장 환경 조건에서는 식(1)과 같은 간략화 된 Penman-Monteith 방정식에서 RAD 값과 VPD 값이 일종의 상수화 되기 때문에 증산량(E_t)이 작물의 엽면적 지수 LAI의 변화에만 영향을 받는 단변수 함수로 결정되었다.

4. 모델 시뮬레이션

측정된 생육 기간에 따른 엽면적의 증가와 증산 속도의 변화값을 이용하여 일장 16h/8h(낮 = $150\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 22°C ; 밤 = $0\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 16°C)에 상대 습도 70%로 유지되는 식물공장에서 청치마 품종의 상추를 40일간 재배하였을 때 LAI의 변화와 상추 한 주당 재배기간 중 증산을 통해 공기 중으로 증발시키는 수증기의 양을 추정하였다.

시뮬레이션 결과 설정된 환경 조건에 대해서 청치마 상추는 Fig. 4와 같은 양상으로 생육 기간에 따라 엽면적 지수가 증가하는 것으로 나타났다. 생육기간에 따른 청치마 상추 1주의 증산 속도는 24시간 하루 중에도 주간 식(2)에 의해 광과 VPD 두 변수에 의한 증산 속도와 야간 식(3)에 의해 VPD에 의한 증산 속도가 서로 다른 것을 확인하였다(Fig. 5). 또한 생육기간에 따라 Fig. 4에서 확인된 것과 같은 엽면적의 증가로 인해 생육이 진전됨에 따라 증산 속도 역시 점차 증가하는 것으로 나타났다.

상추 1주에서 증산에 의해 생육기간 중 식물공장 내 공기 중으로 배출되는 수증기의 총량은 생육종료 시점인

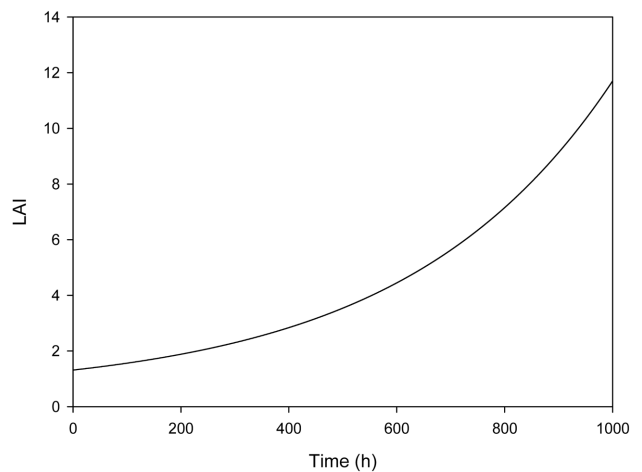


Fig. 4. Simulated leaf area index (LAI) of CheongChima with the time after transplanting. $LAI = LAI_0 + a \cdot e^{b \cdot \text{Time}^{24}}$, where, $a = 0.83$, $b = 0.003$, and $LAI_0 = 0.48$.

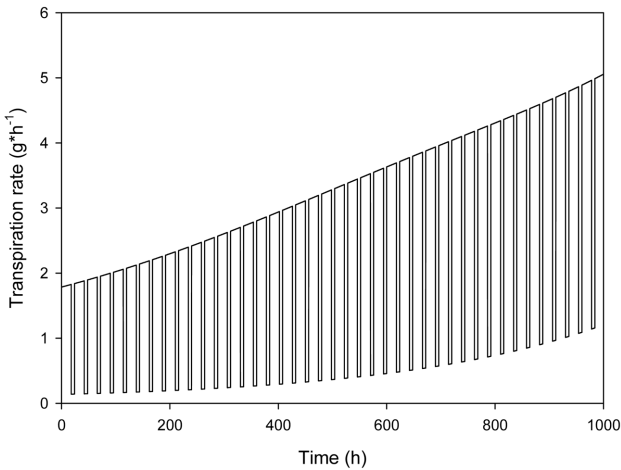


Fig. 5. Simulated transpiration rate with the time after transplanting. Transpiration rates were determined as $[a * (1 - e^{-k \cdot LAI}) * RAD_{in} + b * LAI * VPD_d]$ at daytime (top line) and $[b * LAI * VPD_n]$ at nighttime (bottom line), where, $a = 0.02 \text{ g}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$, $b = 0.02 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$, $k = 0.49$, $LAI =$ derived from Fig. 4, $RAD_{in} = 150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $VPD_d = 7 \text{ mmHg}$, and $VPD_n = 5 \text{ mmHg}$.

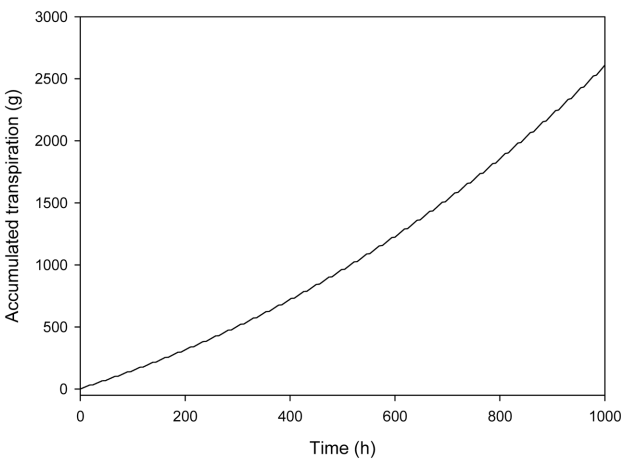


Fig. 6. Simulated accumulated transpiration of CheongChima with the time after transplanting. Accumulated transpiration was obtained as the sum of the transpiration rates in Fig. 5.

40일까지 총 2,592.24g인 것으로 나타났다(Fig. 6). 이는 1기압 24°C에서 포화 수증기량은 $18.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 이므로 본 연구에서 적용한 식물공장 모듈($V = 77.35 \text{ m}^3$) 공간 내의 총 포화수증기량은 1,466.77g인 것을 고려해보았을 때 상당한 량의 수증기가 증산을 통해 배출된다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 식물공장에서 일반적으로 관찰되는 과습 및 심한 결로현상을 설명할 수 있다. 따라서 식물공장에서 작물 생육의 적절한 습도를 제어하기 위해서 반드시 냉난방 장치의 냉방 시 제습 이외에 별도의 추가적인 제습 장치가 필요할 것이다.

적 요

밀폐된 식물공장 환경에서 환경 조절 및 에너지 소비 예측을 위해서는 환경요소들의 변화 요인을 파악해야 한다. 식물체는 광합성 과정에서 많은 양의 물을 증산을 통해 대기 중으로 방출하게 되는데, 일반적으로 식물공장의 특성상 비교적 높은 습도 유지가 필요하며, 증산은 실내 습도에 직접적인 영향을 주기 때문에 식물의 증산량에 대한 정량화가 필요하다. 본 연구에서는 식물공장 생육조건에서 4가지 품종의 상추를 재배하면서 생육기간에 따른 엽면적 변화와 증산속도를 측정하고 이를 바탕으로 Penman-Monteith 방정식을 식물공장 조건에 맞게 변형시켰다. 그리고 이러한 결과들을 토대로 식물공장에서 재배 기간 중 증산으로 인해 발생하는 수분의 양을 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 그 결과 작물의 엽면적과 증산속도는 생육기간이 진전됨에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났으며 엽면적과 증산량 사이는 비례관계를 나타냈다. 증산량 추정 모델식 변형은 일반적으로 다양한 환경 요인들에 의해 증산량이 결정되던 기존의 모델식들에 비해 엄밀한 환경 요소들에 대한 제어가 가능한 식물공장에서 증산량은 환경 요소들은 상수로 취급 가능하며, 작물의 엽면적지수의 변화에 대해서만 주로 결정되었다. 또한 설정된 환경 조건에서 생육기간에 따른 증산량 추정모델을 이용하여 전체 생육기간 중 작물 개체당 누적 증산량을 높은 결정계수(r^2)로 예측할 수 있었다. 이렇게 예측된 증산량은 식물공장 환경 제어 기술 중 냉난방 부하 계산 및 관수 계획을 세우는데 활용 가능할 것이다.

추가 주제어 : 엽면적, 균락, 일사량, 시뮬레이션, 습도 제어

사 사

본 연구는 농림축산식품부(농림수산기술기획평가원)의 연구과제의 일환으로 수행되었음.

Literature Cited

- Baille, M., A. Baille, and J.C. Laury, 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hort.* 59:217-232.
- Bakker, J.C., G.P.A. Bot, H. Challa, and N.J. Van de Braak, 1995. *Greenhouse climate control*. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands. p. 15- 160.
- Boulard, T. and R. Jemaa. 1993. *Greenhouse tomato crop tran-*

- spiration model application to irrigation control. *Acta Hort.* 355:381-387.
- Carmassi, G., L. Incrocci, R. Maggini, F. Malorgio, F. Tognoni, and A. Pardossi. 2007. An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rock-wool culture with saline water. *Agr. Water Manage.* 88:73-82.
- De Graaf, R. and J. Van den Ende. 1981. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crops. *Acta Hort.* 119:147-158.
- Jolliet, O. and B.J. Bailey. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurements and models comparison. *Agr. For. Meteorol.* 58:43-63
- Marcelis, L.F.M., E. Heuvelink, and J. Goudrian. 1998. Modeling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Sci. Hort.* 74:83-111.
- Medrano, E., P. Lorenzo, M.C. Sanchez-Guerrero, and J.L. Montero. 2005. Evaluation and modeling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Sci. Hort.* 105:163-175.
- Motulsky, H. and A. Christopoulos. 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. GraphPad Software Inc. San Diego. CA., USA.
- Nedeffhoff, E.M. 1984. Light interception of a cucumber crop at different stages of growth. *Acta Hort.* 148:525-534.
- Nobel, P.S. and S.P. Long. 1985. Canopy structure and light interception. In: J. Coombs, D.D. Hal, S.P. Long, and J.M.O. Scurlock (ed.). *Techniques in bioproductivity and photosynthesis.* Pergamon Press, Oxford, UK. p. 41-49.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad, and S.B. Verma. 1983. *Microclimate- The Biological Environment.* 2nd ed. Wiley, New York, NY, USA. p. 495.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1992. *Environmental physiology: in: Plant Physiology.* 4th Ed, Wadsworth Pub. Company, Belmont, CA, USA. p. 549-600.
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. PhD dissertation. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands. p. 150.
- Ta, T.H., J.H. Shin, T.I. Ahn, and J.E. Son. 2011. Modeling of transpiration of paprika (*Capsicum annuum* L.) plants based on radiation and leaf area index in soilless culture. *Hort. Environ. Biotechnol.* 52:265-269.
- Ta, T.H., J.H. Shin, E.H. Noh, and J.E. Son. 2012. Transpiration, growth, and water use efficiency of paprika (*Capsicum annuum* L.) plants as affected by irrigation frequency. *Hort. Environ. Biotechnol.* 53:129-134.