

작물재배온실에 대한 한가지 계산류체력학적모형화

안철호, 김석일, 리효정

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《나라의 전기사정이 긴장한 조건에 맞게 자연에너지를 리용하여 남새온실의 난방 문제를 해결하는 방향으로 나아가야 합니다.》

우리는 겨울철난방을 순수 태양에너지로 보장하는 피동식태양열비닐박막온실의 계산류체력학적(CFD)모형화에서 제기되는 몇가지 문제를 연구하였다. 지금까지 작물의 생명활동 특히 작물의 호흡이 주는 영향을 고려하는 작물온실의 CFD모형들은 현열원천항이 없는 에너지방정식 또는 공기와 작물을 하나의 등가매질로 환산한 에너지방정식에 기초하였다.[2-4]

론문에서는 공기와 작물의 온도차로 이루어진 현열원천항을 에너지방정식에 도입하고 FLUENT를 리용하는 작물온실의 CFD모형화를 실현하였다.

1. 물리적 및 수학적모형

공기와 물김의 수송방정식과 란류모형은 선행연구[1, 2]와 같이 취하였다. 그러나 에너지방정식과 복사수송모형, 물김응결모형들을 아래와 같이 개선하였다.

1) 공기의 에너지방정식과 작물층에서 원천항

작물온실의 CFD모형화에 대한 일부 선행연구[3-4]들의 온실공기에 대한 에너지방정식에는 작물층의 조종체적(세포)에서 현열흐름항이 없었다. 현열흐름은 작물과 주변 공기사이의 온도차에 의하여 생긴다. 그러므로 작물의 존재를 고려하는 경우 무시할수 없다. 현열흐름은 다음과 같은 작물층세포에 관한 열평형식에 포함되어있다.

$$\frac{S_r}{LAD} - ET - 2h_{fs}(T_l - T_a) = 0 \quad (1)$$

여기서 S_r 는 작물세포에서 순수복사에너지흐름세기 ($W \cdot m^{-3}$), ET 는 작물호흡에 의한 물의 기화와 관련된 잠열흐름세기 ($W \cdot m^{-2}$), h_{fs} 는 열전달계수 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), T_l 은 작물 잎온도 (K), T_a 는 공기온도 (K), LAD 는 작물잎면적밀도 (m^{-1})이다. 선행연구[2-5]에서는 온실공기온도는 에너지방정식에서, 잎온도는 식 (1)에서 결정하였다. 즉

$$T_l = \frac{S_r / LAD - ET}{2h_{cv}} + T_a \quad (2)$$

현열원천항은 선행연구[2]에서 처음으로 에너지방정식에 포함되었는데 그것은 식 (1)의 첫 2개 항으로 이루어져있었다. 한편 작물층세포의 열특성량을 공기와 작물의 체적비에 따르는 무게평균으로 결정하였다. 따라서 에너지방정식으로 얻는 작물층세포의 온도는 무게평균열특성량을 가진 가상적인 등가매질의 온도이다.

방정식 (2)로부터 잎온도를 결정하기 위하여서는 가상적등가매질의 온도가 아니라 순수 공기온도가 필요하다. 즉 공기온도와 잎온도가 분리된 현열항이 필요하다. 이러한 관점에서 식 (1)에 기초하여 에네르기방정식원천항을 다음과 같이 수정하였다.

$$C_p \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho T_a) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T_a) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda_f + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right) \frac{\partial T_a}{\partial x_i} \right] + S_s \quad (3)$$

$$S_s = -h_{fs} A_{fs} (T_a - T_l) \quad (4)$$

여기서 C_p 는 공기의 비열 ($\text{Jkg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), λ_f 는 공기의 열전도도 ($\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), μ_t 는 공기의 란류점도, Pr_t 는 란류프란틀수(=0.85), h_{fs} 는 대류열전달계수 ($\text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), A_{fs} (=2LAD) 는 식물과 공기의 호상접촉면적, S_s 는 현열원천항이다.

작물과 주변 공기사이의 대류열전달계수는 다음과 같이 결정된다.[2]

$$h_{fs} = \frac{\rho C_p}{r_a} \quad (5)$$

여기서 r_a 는 작물잎의 저항력 (sm^{-1}) 이다.

2) 복사수송모형화

에네르기방정식과 태양에너지를 결합하는데서 능률적인 태양빛추적모형을 FLUENT의 DO복사모형과 결합하여 리용하였다. DO복사모형은 전체 태양복사가 아니라 직달복사와 산일복사를 요구한다. 전체 태양복사 $G_{sol} (\text{Wm}^{-2})$ 는 다음과 같이 분리할수 있다.[5]

$$G_{sol} = G_D \cos \theta + G_d \quad (6)$$

여기서 G_D 는 직달복사 (Wm^{-2}), G_d 는 산일복사 (Wm^{-2}), θ 는 입사각이다. 각 θ 는 FLUENT의 태양계산기에서 얻은 태양자리벡토르에 기초하여 결정하였다. 비 $\beta (= G_d / G_D)$ 또한 태양계산기의 출력자료로부터 결정하였다. 그러면 측정된 G_{sol} 로부터 G_D 와 G_d 를 다음과 같이 결정할수 있다.

$$G_D = \frac{G_{sol}}{\beta + \cos \theta} \quad (7)$$

$$G_d = \beta \cdot G_D \quad (8)$$

3) 물김응결의 모형화

비닐박막, 작물잎에서 물김응결을 예측하자면 매 세포의 이슬점온도를 아는것이 필요하다. 이슬점온도를 다음과 같은 테텐의 방정식[6]에 기초하여 결정하였다.

$$P_{sat} = 610.78 \times 10^{7.5t / (237.3+t)} \quad (9)$$

여기서 P_{sat} 는 포화물김압력(Pa), t 는 온도($^{\circ}\text{C}$)이다. 포화물김압력을 알면 이슬점온도는 다음과 같이 구할수 있다.[6]

$$t_{dp} = \frac{237.3(\ln P_{sat} - 6.415)}{23.685 - \ln P_{sat}} \quad (10)$$

여기서 t_{dp} 는 이슬점온도($^{\circ}\text{C}$)이다.

비닐박막린접세포와 작물층세포들가운데서 이슬점온도보다 낮은 온도를 가지는 세포의 상대습도가 1보다 크면 다시 1로 낮추고 1이상의 습기량을 세포별응결량에 더하였다. 즉 상대습도를 초과하는 물김량은 응결량으로 환산하였다. 같은 수법을 공기중의 세포들에도 적용하였다.

작물호흡 및 물기응결모형에 포함된 기본방정식들의 해석과 파라미터결정은 모두 FLUENT에 결합시킨 하나의 종합적인 사용자정의함수를 통하여 실현하였다.

2. 유효성검토

실험온실은 길이 60m의 2중비닐박막온실이며 기본구조와 치수는 그림 1과 같다.

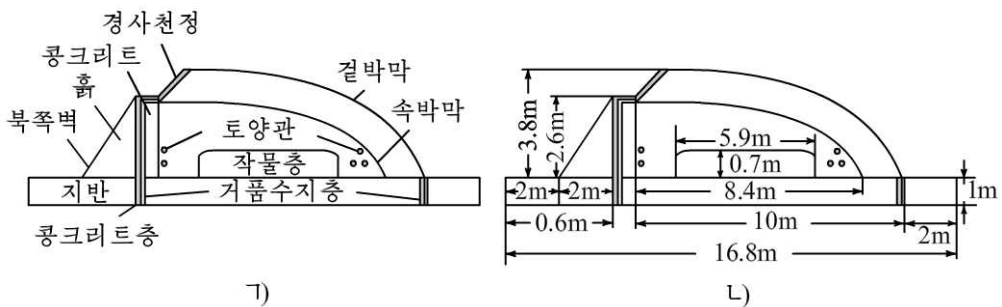


그림 1. 온실의 구조와 치수

ㄱ) 구조, ㄴ) 치수

경계조건과 물성파라미터들은 선행연구[1]와 동일하다.

실험적측정은 어느 한 겨울날의 9시부터 다음날 9시까지 진행되었다. 2중비닐박막우의 보온모포들을 모두 9시에 말아올리고 17시부터 다음날 9시까지 덮어두었다. 이 24h과정을 수치적으로 모의하였다.

그림 2는 온실중심의 두 높이 0.5m와 1.5m에서 모의와 실측으로 얻은 온실공기온도곡선들을 보여준다.

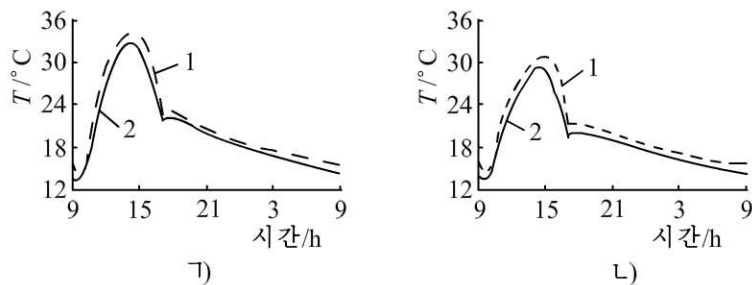


그림 2. 온실공기온도(1-측정값, 2-모의값)

ㄱ) 높이가 1.5m인 경우, ㄴ) 높이가 0.5m인 경우

그림 2의 ㄱ)와 ㄴ)의 그래프들에 관한 두제곱평균오차는 각각 1.07, 1.17°C 이고 상대오차는 각각 5.2, 6.4%이다. 급격한 외부적변화에 대한 수치모형의 응답은 실제와 약간 차이났다. 그 원인은 수치모형이 실천에서는 불가능한 완벽한 덮기와 밀폐(모포와 박막에 의한)를 가정하였고 불변적인 열물리상수들을 포함하기때문이라고 본다.

맺 는 말

작물호흡과 물김응결을 고려하는 CFD모형을 개발하였다. 작물층세포에서 작물온도와 구별되는 공기온도를 얻을수 있도록 에네르기방정식의 현열항을 수정하였다. FLUENT에 추가되는 UDF를 통하여 작물의 호흡과정과 물김응결을 모형화하였다. 온실공기온도의 실측값과 모의값은 비교적 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성 종합대학학보 수학, 64, 2, 120, 주체107(2018).
- [2] T. Boulard et al.; Biosystems Engineering, 158, 110, 2017.
- [3] P. Bournat et al.; Computers and Electronics in Agriculture, 74, 2, 195, 2010.
- [4] H. Majdoubi et al.; Open Journal of Fluid Dynamics, 6, 88, 2016.
- [5] Y. A. Cengel; Heat Transfer in Practical Approach, MGH, 586~588, 2002.
- [6] R. S. Gates et al.; IFAC Control Applications and Ergonomics in Agriculture, Greece, 271~276, 1998.

주체109(2020)년 9월 5일 원고접수

A CFD Modeling for Cropped Greenhouses

An Chol Ho, Kim Sok Il and Ri Hyo Jong

A numerical model was developed for a passive solar double plastic-covered greenhouse. We introduced a sensible heat term containing of difference between air temperature and leaf temperature to energy equation. Modeling of plant transpiration was accomplished by applying a user defined function added to FLUENT. Comparisons between the measured and simulated temperatures showed a good agreement on a 24-hour-course including the coldest winter night.

Keywords: CFD model, double plastic-covered greenhouse, fruit vegetable