

한가지 자연대류식태양열건조기에서 건조과정에 대한 모형개선연구

윤 순 철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 과학기술을 발전시켜도 남들이 걸은 길을 따라만 갈것이 아니라 우리 과학자들의 애국충정과 우리 인민의 슬기와 민족적자존심을 폭발시켜 년대와 년대를 뛰어넘으며 비약해나가야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

인민경제 여러 분야에서 널리 리용되고있는 태양열건조기의 건조특성을 정확히 예측하기 위하여 모형개선에 대한 연구를 진행하였다.

태양열건조기들은 화석연료나 전기에너지를 소비하지 않고 식료품들을 건조시키기 위하여 세계적으로 많이 리용되고있다.[1]

태양열을 리용하는 방법에 따라 태양열건조기는 강제대류식과 자연대류식으로 구분된다. 강제대류식태양열건조기에서는 건조과정을 촉진시키기 위하여 통풍기를 리용하지만 자연대류식건조기에서는 공기흐름이 태양열에 의하여 진행된다. 작은 규모의 태양열건조기들은 대체로 자연대류식이다.

태양열건조기는 가열부와 건조실로 이루어진다. 태양열가열부에서 열전달과정은 정상과정으로 취급될수 있지만 건조실에서 열 및 질량전달과정은 비정상과정으로 취급되어야 한다. 선행한 수학적모형들[1]에서 건조실의 공기흐름온도와 습도의 비정상효과는 대류변화에 비하여 작다고 보고 무시하였다. 그러나 사실 공기흐름의 온도와 습도에 대한 비정상효과는 건조매질의 습기함량의 비정상효과에 비하여 무시할수 있다는 근거는 없다.

론문에서는 건조실에서 공기흐름의 온도와 습도의 비정상효과를 고려하여 수학적모형을 개선하고 수값계산을 진행하여 선행모형결과와 비교하였다. 계산결과는 습기함량이 선행모형에 비하여 14%정도 낮다는것을 보여주었다.

1. 자연대류식건조기에서 열 및 물질전달의 기본방정식

수학적모형화를 위한 기본방정식이 다음의 자연식태양열건조기에 대하여 설정되었다.(그림 1)

가열부에서 열적과정은 정상과정으로 고찰되지만 건조매질에서 열 및 질량전달은 습기함량의 시간에 따르는 변화로부터 비정상과정으로 고찰되어야 한다.

가열부에서 공기의 가열과정은 덮개와 열흡수판, 공기에 대한 에너지를 방정식으로 표현된다.[2]

유리덮개:

$$h_{af}(T_c - T) + h_{ca}(T_c - T_{am}) + h_{rc}(T_c - T_s) + h_{rp}(T_c - T_p) = \alpha_{cs}(1 + \tau_{cs}\rho_{ps})\phi$$

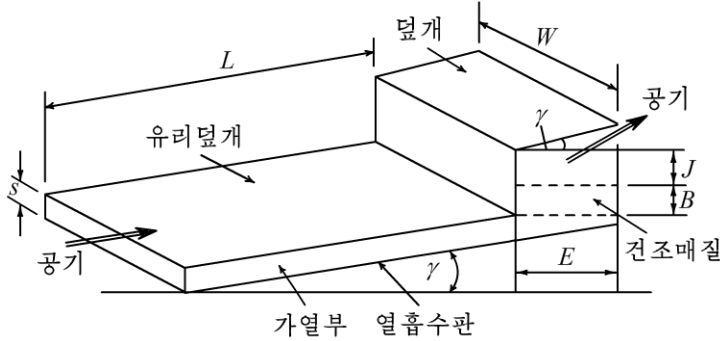


그림 1. 태양열자연대류식건조기의 구조

열 흡수판:

$$h_{af}(T_p - T) + h_{rp}(T_p - T_c) + U_b(T_p - T_{am}) = \frac{\alpha_{ps}\tau_{cs}\phi}{1 - \rho_{ps}\rho_{cs}}$$

공기 흐름:

$$s\rho_a v C_{pa} \frac{dT}{dx} = h_{af}((T_p - T) + (T_c - T))$$

여기서 온도 T 와 T_c , T_p 들은 공기와 덮개, 열 흡수판에서의 값들이다.

대류열전달계수들은 다음과 같이 결정된다.[3]

강제대류열전달계수:

$$h_{af} = \frac{Nu_x k}{x}, \quad Re_x = \frac{Vx}{\nu}$$

$$Nu_x = 0.664 Re_x^{0.5} Pr^{1/3}, \quad \text{층류} (Re_x < 5 \times 10^5)$$

$$Nu_x = 0.0308 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}, \quad \text{난류} (5 \times 10^5 < Re_x < 10^7)$$

윗방향으로 진행되는 자연대류의 열전달계수:

$$h_{ca} = \frac{Nu k}{L_c}$$

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4}, \quad Ra = \frac{g\beta(T_c - T_s)L_c^3}{\nu^2} Pr, \quad L_c = \frac{L}{2(1+L)}$$

아래방향으로 진행되는 자연대류의 열전달계수:

$$U_b = \frac{Nu k}{L_c}$$

$$Nu = 0.27 Ra^{1/4}, \quad Ra = \frac{g\beta(T_c - T_s)L_c^3}{\nu^2} Pr, \quad L_c = \frac{L}{2(1+L)}$$

유리덮개로부터 대기중으로의 열복사:

$$h_{rc} = \epsilon_c \sigma (T_s + T_c)(T_s^2 + T_c^2)$$

유리덮개와 열 흡수판사이의 열복사:

$$h_{rp} = \frac{\sigma(T_c + T_p)(T_c^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1}$$

경계조건들:

$$\text{입구}(x=0) \quad T = T_c = T_p = T_a, \quad T_s = 0.055 \, 2T_a^{1.5}$$

건조실에서 건조매질은 가열부를 통하여 옷쪽으로 흐르는 공기흐름에 의하여 건조되는 것으로 고찰된다.

질량전달:

$$\rho_a \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right) = -\rho_g \frac{\partial M}{\partial t}$$

얇은 건조층에서 성립하는 경험식:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-K t^C)$$

강냉이에 대한 건조상수들은 $RH = 3 - 83\%$, $Q = 2.2 - 71.1^\circ\text{C}$, $V = 0.025 - 2.33\text{m/s}$, $M_0 = 0.18 - 0.6\text{kg/kg}_{\text{강냉이}}$ 의 범위에서 다음식으로 표시된다.[4]

$$K = \exp(-7.173 \, 5 + 1.279 \, 3 \ln(1.8\theta + 32.0) + 0.137 \, 8 V)$$

$$C = 0.081 \, 1 \ln(100RH) + 0.78M_0$$

습기함량 M_e 는 다음의 방정식으로 표시된다.

$$M_e = 0.338 \, 72 - 0.058 \, 97 \ln(-(\theta + 30.205) \ln(RH))$$

건조매질의 열전달방정식:

$$\rho_g (C_{pg} + C_{pl}M) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + a_v h_s (T - \theta) + h_{fg} \rho_g \frac{\partial M}{\partial t}$$

건조매질에서 공기의 열전달방정식:

$$\rho_a (C_{pa} + C_{pv}H) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -\rho_g C_{pv} \frac{\partial M}{\partial t} (T - \theta) - a_v h_s (T - \theta)$$

강냉이의 열전도도와 비열은 다음과 같다.

$$k_g = 0.140 \, 9 + 0.112 M_{w.b}$$

$$C_{pg} = 1 \, 465 + 3 \, 560 M_{w.b}$$

강냉이에서 물의 증발열은 다음과 같다.

$$h_{fg} = (250 \, 200 + 2 \, 390\theta)[1 + 1.292 \, 5 \exp(-16.961M)]$$

공기흐름의 경계조건:

$$T = T_e, \quad H_0 = \frac{0.622 RH_0 p_{ve}}{p - RH_0 p_{ve}}, \quad RH = \frac{H_0 p}{(0.622 + H_0) p_{ve}}$$

건조매질의 초기조건:

$$M = M_0, \quad Q = Q_0$$

건조매질에서 공기의 흐름속도는

$$V = \frac{G \, s}{\rho \, E}$$

이다.

자연대류식태양열건조기에서 대기압이상으로 가열된 공기가 만드는 뜰힘조성압력은 공기흐름을 조성한다. 공기의 질량속도는 열적뜰힘조성압력이 태양열건조기의 압력손실과

평형을 이룬다. 즉

$$\Delta p_{tb} = \Delta p_{gb} + \Delta p_c + \Delta p_E$$

2. 계산결과분석

수값풀이과정은 위의 방정식들을 풀기 위하여 리용되고 습기변화가 정량적으로 계산된다. 수값계산을 위하여 다음의 조건들이 리용되었다.

$T_a = 27^\circ\text{C}$, $p_a = 105\text{Pa}$, $\phi = 635\text{W/m}^2$, $L = 1\text{m}$, $s = 0.05\text{m}$, $\gamma = 18.5^\circ$, $B = 0.04\text{m}$, $E = 0.34\text{m}$
가열부에서 다음의 특성값들이 리용되었다.

$$\alpha_{cs} = 0.06, \alpha_{ps} = 0.92, \tau_{cs} = 0.92, \rho_{ps} = 0.08, \rho_{cs} = 0.02$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p = 0.92, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

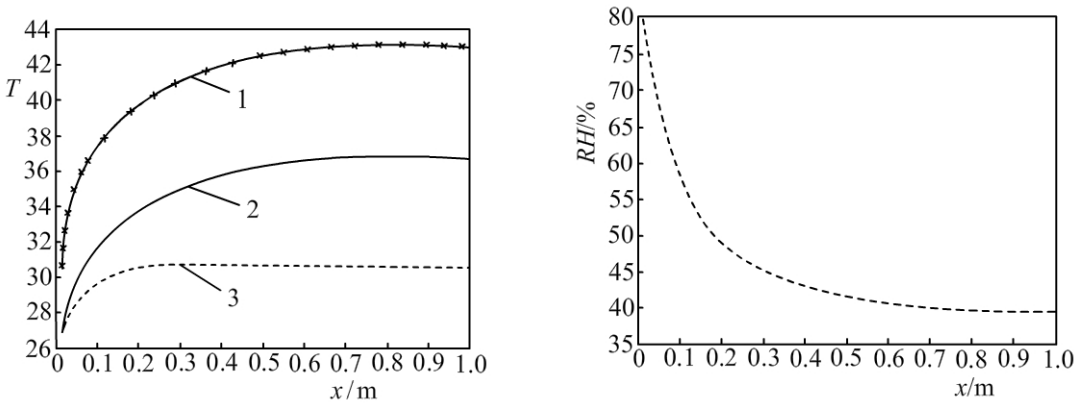


그림 2. 가열부에서 공기흐름의 온도와 상대습도의 변화특성

1—유리덮개, 2—공기, 3—열흡수판

계산된 공기흐름을 따르는 온도와 상대습도분포를 그림 2에 보여주었다. 유리덮개와 열흡수판사이로 흐르는 공기의 온도가 약 10°C 정도로 가열되고 상대습도는 80%로부터 40%로 낮아졌다.

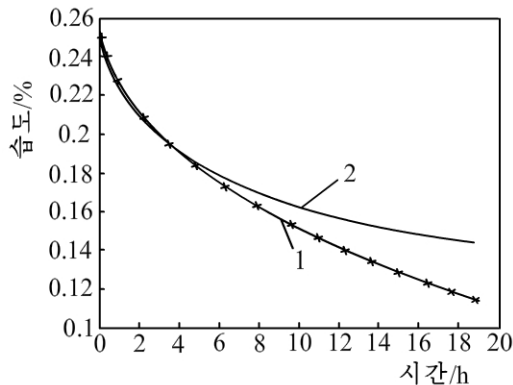


그림 3. 시간에 따르는 건조매질의 습기함량변화

1—선행, 2—개선

건조실에서 건조매질의 초기습도는 25.2%이고 온도는 27°C 였다. 선행모형과 개선된 모형의 계산결과들이 비교되었다. 수값계산결과는 19h후에 개선된 모형의 결과가 선행모형의 결과보다 약 14%정도의 낮은 습도함량을 보여주었다.(그림 3)

맺 는 말

공기흐름의 열 및 질량전달방정식에서 온도와 습도의 비정상성은 열 및 질량의 대류적변화에 비하여 무시할수 있을 정도로 작다고 고찰되었다. 그러나 수값계산결과는 자연대류식태양열가열기에서 온도와 습도의 비정상성을 고려하는것이 필요하다는것을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] B. Amina et al.; Physics Procedia, 55, 96, 2014.
- [2] I. N. Simate; Renewable Energy, 28, 435, 2003.
- [3] Y. A. Cengel; Heat Transfer, McGraw-HILL, 466~472, 2002.
- [4] Misra MK et al.; Trans ASAE, 23, 1254, 1980.

주체107(2018)년 6월 5일 원고접수

Study on Model Improvement of Drying Process in a Solar Dryer by Natural Convection

Yun Sun Chol

In this article, the mathematical model was improved in the consideration of unsteady effects of temperature and humidity in a solar dryer by natural convection and the drying process was calculated.

Key words: natural convection, solar dryer, numerical calculation