

인삼 열풍건조의 수분확산에 관한 수치해석적 연구

Numerical Analysis of Moisture Diffusion for Hot-air Drying of Ginseng

김명호*	김철수*	박승제*	이종호*
정회원	정회원	정회원	정회원
M. H. Kim	C. S. Kim	S. J. Park	C. H. Lee

1. 서론

농산물 및 식품 건조 중의 함수율 변화를 기술하기 위해 다양한 model들이 사용되고 있는데, 이들은 크게 두 종류로 분류된다. 보통 건조방정식이라 부르는 실험식들이 그 첫 번째 부류로서 Page model, Approximate diffusion model, Thompson model, Wang model등이 이에 속한다 (Jayas et al., 1991). 이러한 건조방정식은 피건조물의 평균함수율 또는 함수율 비와 건조시간 간의 관계를 표시하기 때문에 포괄적인 건조식 (lumped drying equation)이라고도 한다. 거의 모든 건조방정식들은 두 개 이상의 매개변수를 포함하고 있는데, 실제 건조실험치를 이용한 회귀분석을 거쳐 이들은 건조공기의 온도, 상대습도, 풍속 등과 같은 건조요인들의 함수로서 결정된다.

분산형 건조식 (distributed drying equation)은 피건조물 내부에서의 수분이동을 지배하는 기작에 대한 수학적 기술로부터 출발하여 개발된 건조 model로서 앞에서 언급한 건조실험식들보다는 더욱 논리적인 준거를 가진다고 할 수 있다. Waananen 등 (1993)에 의하면 고체 물질내 수분이동의 주요 기작은 확산, 모세관흐름, 증발-응축, 유출, 포와젤 이동 등이 알려져 있다. 분산형 건조 model은 보통 포물선형 편미분방정식의 형태를 가지므로 거의 모든 경우에 computer를 이용한 수치해석적 풀이가 요구된다는 단점은 있지만 경계조건과 건조방법이 다른 다양한 건조과정들에의 적용성이 뛰어나며 건조 중 피건조물의 온도가 비정상상태인 경우도 손쉽게 다룰 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한, 평균함수율 뿐만 아니라 피건조물 내부의 함수율 분포에 대한 예측이 가능하며, 주요 건조요인들이 건조에 미치는 영향도 어느정도 파악할 수 있다.

새로운 건조기법과 건조기의 개발, 그리고 사용중인 건조기의 효율적인 운전과 관련한 연구에 이와 같은 장점을 가진 건조 model이 사용된다면 큰 도움이 되리라 판단되어 본 연구에서는, 건조 중의 수분전달을 확산현상으로 해석하여 4년근 박피백삼의 열풍건조에 대해 simulation을 수행함으로써 분산형 건조 model의 유용성을 검토하고자 하였다.

* 全北大學校 農科大學 農業機械工學科

2. 재료 및 방법

인삼의 열풍건조를 다음과 같은 해석적 model로 먼저 표시하였다. 즉, 건조는 등온과정으로 이뤄지며, 건조과정 중의 수분전달현상은 Fickian 확산식으로 기술될 수 있고 수분은 반경방향으로만 이동한다고 가정하였다.

① 지배방정식

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{\text{eff}}(T, M) r \frac{\partial M}{\partial r} \right]$$

② 초기조건 및 경계조건

$$t = 0, M = M_e(T_{\text{air}}, rh_{\text{air}}); \quad r = 0, \frac{\partial M}{\partial r} = 0; \quad r = R, M = M_e(T_{\text{air}}, rh_{\text{air}})$$

이 식의 풀이를 위해서는 인삼의 유효수분확산계수 $D_{\text{eff}}(T, M)$ 와 평형함수 $M_e(T_{\text{air}}, rh_{\text{air}})$ 가 필요하며, 본 연구에서는 다음 값들을 사용하였다.

(a) 유효수분확산계수 $D_{\text{eff}}(T, M)$

유효수분확산계수 D_{eff} 는 함수율비 MR과 건조시간 t간의 관계를 이용한 slope법으로 구하였다. 즉, Fick's law로 기술되는 원통형 물체에서의 수분확산현상의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^2} \exp\left(-\beta_n^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{R_c^2}\right)$$

여기서 R_c 는 인삼몸통의 반경이며, β_n 은 1차 Bessel함수의 근이며, 위의 무한급수로 주어진 해는 건조시간 t가 커지면 첫째 항만으로도 충분히 근사화할 수 있다. 즉, 첫째 항만을 취하고 양변을 ln로 변환시키면 위 식은 다음과 같은 형태를 갖게 되어, ln MR과 t간의 건조곡선의 기울기로부터 D_{eff} 를 계산할 수 있게 된다.

$$\ln MR = -5.783 \frac{D_{\text{eff}} t}{R_c^2}$$

위와 같은 slope법으로써 D_{eff} 를 구하려면 우선 인삼의 건조곡선을 수식화해야 하며 본 연구에서는 최 등 (1992a)이 추천한 다음의 유사확산형 건조실험식을 사용하였다.

$$MR = A \exp(-kt)$$

여기서, A와 k는 각각 인삼의 직경, 건조공기의 온도, 상대습도로 표시된 매개변수

유효수분확산계수는 보통 온도와 함수율에 따라 변화한다고 알려져 있으므로, 어떤 한 건조온도에서 얻어진 건조곡선에 대해 건량기준 함수율 0.2-2.5 범위의 5개 함수율 수준에서 그 기울기 값을 계산하였으며, 이들에 대해 회귀분석을 실시하여 아래와 같은 D_{eff} 값을 구하였다.

$$D_{\text{eff}}(T, M) = -0.2123 \times 10^{-5} + 0.1397 \times 10^{-6}T - 0.1344 \times 10^{-8}T^2 + 0.5525 \times 10^{-11}T^3$$

여기서, D_{eff} : 인삼의 유효수분확산계수 (m^2/hr) T : 온도 ($^{\circ}\text{C}$)

(b) 평형함수율 $M_e(T_{\text{air}}, \text{rh}_{\text{air}})$

평형함수율은 아래와 같은 Oswin model로 표시된 최 등 (1992b)의 결과를 사용하였다.

$$M_e(T_{\text{air}}, \text{rh}_{\text{air}}) = \frac{(0.1272 - 0.000742T_{\text{air}})}{\left(\frac{\text{rh}_{\text{air}}}{1 - \text{rh}_{\text{air}}}\right)^{0.4164 - 0.001368T_{\text{air}}}}$$

여기서, M_e : 평형함수율(db, dec) T_{air} : 공기의 온도($^{\circ}\text{C}$) rh_{air} : 공기의 상대습도(dec)

상기 편미분방정식의 해인 건조과정중 인삼의 함수율 $M(r,t)$ 는 Crank-Nicholson method를 이용하여 지배방정식을 다음의 차분근사식으로 변환시킨 후, 수치해석적으로 구하였다. Δr 과 Δt 의 값으로는 각각 1.2 mm와 30 sec를 사용하였다.

① $i = 2, \dots, n-1$ 에 대해서는,

$$\begin{aligned} & -\beta\left(\frac{i-1.5}{i-1}\right)(D_{\text{eff}})_{i+1}^{i+1}M_{i-1}^{i+1} + (1 + 2\beta(D_{\text{eff}})_{i+1}^{i+1})M_i^{i+1} - \beta\left(\frac{i-0.5}{i-1}\right)(D_{\text{eff}})_{i+1}^{i+1}M_{i+1}^{i+1} \\ & = \beta\left(\frac{i-0.5}{i-1}\right)(D_{\text{eff}})_i^i M_{i+1}^i + (1 - 2\beta(D_{\text{eff}})_i^i)M_i^i + \beta\left(\frac{i-1.5}{i-1}\right)(D_{\text{eff}})_i^i M_{i-1}^i \\ & \quad \left(\text{여기서, } \beta = \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2}\right) \end{aligned}$$

② $i = 1$ (즉, $r = 0$)에서는,

$$\{1 + 4\beta(D_{\text{eff}})_1^{i+1}\}M_1^{i+1} - 4\beta(D_{\text{eff}})_1^{i+1}M_2^{i+1} = 4\beta(D_{\text{eff}})_1^i M_2^i + \{1 - 4\beta(D_{\text{eff}})_1^i\}M_1^i$$

③ $i = n$ (즉, $r = R$)에서는, 경계조건 $M = M_e$ 로부터, $M_n^i = M_e(\text{rh}_{\text{air}}, T_{\text{air}})$

상기 인삼건조 model의 적합성은 함수율 예측치와 실제 실험치 (최 등 (1992a))를 비교, 평균 상대오차율 (mean relative percentage deviation) P 를 계산하여 검증하였다. 또한, 최 등 (1992a)의 유사확산형 건조실험식에 의한 예측치와의 상대비교도 실시하였다. 아래 식으로 주어지는 평균상대오차율의 정의는, 인삼의 건조실험 data중에서 건조과정의 대부분이라 볼 수 있는 습량기준 함수율 65%에서 20%까지의 범위에 한하여 측정 함수율과 건조 model에 의하여 예측된 함수율과의 잔차를 측정치로 나누어 표준화시킨 후, 그 평균치를 계산하여 백분율화한 것이다.

$$P(\%) = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y - Y'|}{Y}$$

여기서, Y, Y' : 각각 실측 및 예측 함수율 N : 측정치의 갯수

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에서와 같이 건조 공기온도 30°C, 상대습도 45%의 조건에서는 본 연구에서 사용한 simulation model은 함수율을 실제 측정치보다 낮게, 유사확산형 건조방정식은 실험치보다 높게 예측하였다. Fig. 2는 건조 공기온도 50°C, 상대습도 45%의 경우로서, simulation model과 실험식 공히 만족스러운 예측성능을 보였고, 특히 simulation model의 경우 건조시작 8시간 이후부터는 실험치와 거의 동일한 예측치를 보였다. 일반적으로 유사확산형 건조방정식은 건조말기에는 정확도가 높지만 건조초기에 큰 오차를 보인다고 알려져 있는데, Fig. 2에 나타낸 건조초기 약 5시간 동안의 실측치와 예측치간 비교로부터도 이같은 경향을 확인할 수 있었다. 비교적 고온인 건조 공기온도 70°C, 상대습도 50%의 조건에서도 전체 건조기간의 반에 해당하는 초기 10시간 동안 유사확산형 건조실험식에 의한 예측치는 큰 오차를 보여주었으나, simulation model에 의한 예측치는 건조초기 약간의 오차를 제외하고는 실제 실험치와 잘 일치하였다 (Fig. 3).

평균상대오차율을 사용하여 이상의 3가지 건조조건하에서 함수율 예측의 정확도를 조사한 결과, 유사확산형의 건조식은 각각 8.9, 13.2, 18.5% (평균 13.5%), 본 연구에서 사용한 모델은 각각 14.6, 4.9, 8.6% (평균 9.4%)의 평균상대오차율을 보여 본 연구에서 사용된 simulation model이 인삼의 실제 건조과정을 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것으로 생각되었다.

열풍건조중의 수분확산현상을 Fick's law로 modeling한 후, 이를 수치해석적으로 풀이할 때 요구되는 두 가지 중요한 물성중 하나인 유효수분확산계수 D_{eff} 는 농산물과 식품의 경우, 온도와는 지수함수, 함수율과는 지수함수 또는 선형적인 함수관계가 있다고 보통 알려져 있으나 (Jayas et al., 1991), 본 연구에서 사용된 인삼의 D_{eff} 값은 온도의 1/2승에 비례하여 증가하였지만 함수율에는 좌우되지 않았다. 피건조물의 유효수분확산계수 D_{eff} 는 건조와 관련된 가장 중요한 물성중의 하나라는 사실과 인삼의 경우 수분확산계수와 온도, 함수율간의 관계가 여타 농산물과는 다른 양상이었다는 점을 고려할 때, 인삼의 유효수분확산계수 D_{eff} 의 정밀한 측정과 D_{eff} 값과 온도, 함수율간의 상관관계에 대한 연구의 필요성이 인식된다.

4. 요약 및 결론

1. 건조과정 중의 수분이동을 확산현상으로 해석한 건조 model에 대해 수치해석을 수행, 함수율 예측치를 구하고 이를 실측치와 비교함으로써 건조 model의 유용성을 검토하였다.

2. 본 연구에서 사용된 분산형 건조 model은 유사확산형 건조방정식과 거의 동등한 수준의 함수율 예측도를 보여 주었다.

3. 인삼의 경우, 유효수분확산계수 D_{eff} 의 정밀한 측정과 D_{eff} 값과 온도, 함수율간의 상관관계에 대한 추가연구의 필요성이 인식되었다.

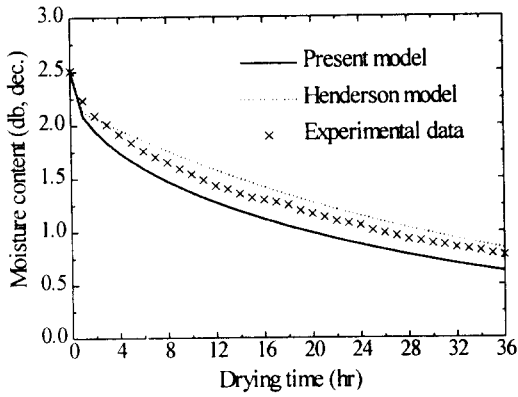


Fig. 1. Predicted and measured moisture contents during Ginseng drying ($T_{air}=30^{\circ}C$, $rh_{air}=45\%$)

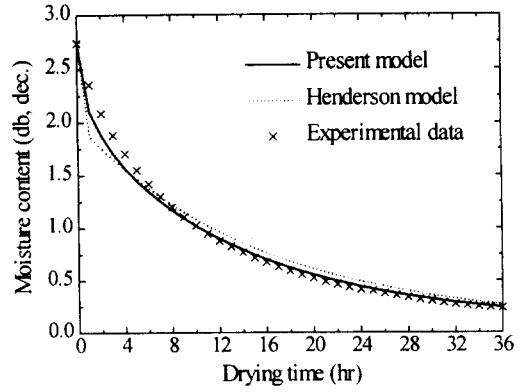


Fig. 2. Predicted and measured moisture contents during Ginseng drying ($T_{air}=50^{\circ}C$, $rh_{air}=45\%$)

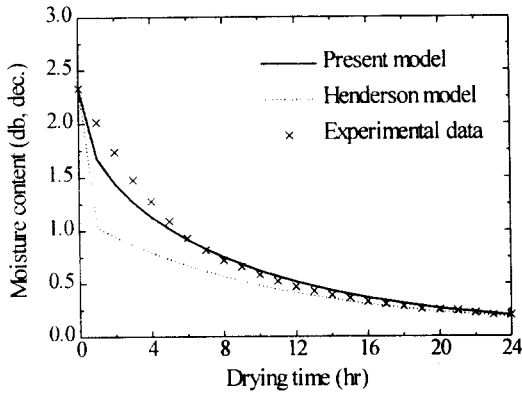


Fig. 3. Predicted and measured moisture contents during Ginseng drying ($T_{air}=70^{\circ}C$, $rh_{air}=50\%$)

5. 참고문헌

1. 최병민, 이종호, 박승제. 1992a. 인삼의 건조특성 구명 및 건조모델 개발에 관한 연구. 고려인삼학회지 **16**(2): 111-123
2. 최병민, 이종호, 박승제, 김철수, 이중용. 1992b. 인삼의 평형함수율에 관한 연구. 한국농업기계학회지 **17**(3): 247-259
3. Jayas, D. S., S. Cenkowski, S. Pabis, and W. E. Muir. 1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, **9**(3): 551-588.
4. Waananen, K. W., J. B. Litchfield, and M. R. Okos. 1993. Classification of drying models for porous solids. *Drying Technology*, **11**(1): 1-40.