

인삼 열풍건조시 템퍼링 과정의 영향에 관한 수치해석적 연구

김명호 · 김철수 · 박승제 · 이종호
전북대학교 농과대학 농업기계공학과

Numerical Study of Tempering Effect on Hot-air Drying of Ginseng

Myoung Ho Kim, Chul Soo Kim, Seung Je Park and Chong Ho Lee
Department of Agricultural Machinery Engineering, Chonbuk National University

Abstract

Effects of tempering practice on Ginseng drying was evaluated from a simulation study. Ginseng drying process was first modeled and corresponding implicit finite difference equations were formulated and solved for the moisture contents. Drying time, drying rate, and energy consumption was calculated from the simulation results on a continuous hot-air drying and three cyclic drying where a period consisting of 30 min drying phase and subsequent tempering phase of 30, 60, and 90 min, respectively, is repeated throughout the entire process. The diffusion type simulation model provided a satisfactory prediction of Ginseng drying. Model predictability, however, was likely to improve if the effective moisture diffusivity would be further refined. Total drying time increased as the time ratio of tempering to drying phase increased, but not necessarily proportionally. Energy consumption decreased as the time ratio of tempering to drying phase increased since a majority of energy was consumed to heat the drying air required in the drying phases. Overall drying rate was not affected by either the existence or the length of tempering phase, although it is expected to increase due to a uniform moisture gradient achievable during tempering. Assumption of tempering being a practice of passing unheated air through the thin-layer of Ginseng is believed to have something to do with this finding.

Key words: Ginseng, hot-air drying, tempering, numerical analysis, simulation

서 론

농산물, 특히 곡류의 건조에 있어서 건조속도의 증가, 소요 에너지의 절감, 피건조물의 품질 열화 방지 등을 위해 많은 노력이 기울여지고 있다. 이들은 건조공정의 물리적 현상 자체를 보다 더 잘 이해함으로써 건조의 효율성을 높이려는 최적화, 자동 제어를 포함한 건조공정의 자동화 및 기계화, 새로운 건조방식의 개발, 그리고 기존 건조공정의 수정을 통한 건조방법의 개선이라는 네 가지로 대분할 수 있다. 건조방법의 개선과 관련하여 템퍼링 (tempering)은 공기흐름이 없는 공간 내에 피건조물을 일정시간 거치하는 조작을 의미하며, 그 방법에 따라 피건조물과 외부대기 간의 열 및 물질전달이 모두 차단되거나 또는 물질전달만이 차단되게 된다. 광의의 템퍼링은 가온이나 가습을 행하지 않은 상온상태의 공기를 열풍건조 도중 피건

조물에 일정시간 저속으로 송풍함을 뜻하기도 하며 (Ezeike와 Otten, 1981), 이러한 템퍼링의 효과로는 건조 도중 또는 건조 완료 후 피건조물의 균열발생 감소, 후속 공정에서의 건조속도 증가 및 이로 인한 전체적인 건조 소요에너지의 감소 등이 보고되고 있다 (Brooker *et al.*, 1992; Gustafson *et al.*, 1983; Velupillai와 Verma, 1986).

농산물 및 식품의 건조 중 함수율 변화를 기술하는 model은 크게 두 종류로 분류된다. 보통 건조방정식이라 부르는 실험식들이 그 첫 번째 부류로서, Page model, 유사확산형 model, Thompson model, Wang model 등이 이에 속하며 (Jayas *et al.*, 1991), 피건조물의 평균함수율 또는 함수율비와 건조시간 간의 관계를 표시하기 때문에 포괄적인 건조식 (lumped drying equation)이라고도 한다. 거의 모든 건조방정식들은 두 개 이상의 매개변수를 포함하고 있는데, 이들은 실제 건조실험치에 대한 회귀분석을 거쳐 건조공기의 온도, 상대습도, 풍속 등과 같은 건조요인들의 함수로서 결정된다.

Corresponding author: Myoung Ho Kim, Department of Agricultural Machinery Engineering, Chonbuk National University, Chonju, Chonbuk 561-756, Korea

분산형 건조식(distributed drying equation)은 피건조물 내부에서의 수분이동을 지배하는 확산, 모세관흐름, 증발-응축, 유출, 포와젤 유동과 같은 물리적 현상에 대한 수학적 기술로부터 출발하여 유도된 건조 model로서 앞에서 언급한 건조실험식들보다는 더욱 논리적인 근거를 가진다고 할 수 있다(Waananen *et al.*, 1993). 분산형 건조 model은 보통 포물선형 편미분방정식의 형태를 가지므로 거의 모든 경우에 수치해석적 풀이가 요구된다는 단점은 있지만 경계조건과 건조방법이 다른 다양한 건조과정들에의 적용성이 뛰어나며 건조 중 피건조물의 온도가 비정상상태인 경우에도 손쉽게 다룰 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한, 평균함수를 뿐만 아니라 피건조물 내부 함수를 구배의 예측이 가능하며, 주요 건조요인들이 건조에 미치는 영향도 어느 정도 파악할 수 있다.

새로운 건조기법과 건조기의 개발, 그리고 건조기의 효율적 운전과 관련한 연구에 이같은 장점을 가진 건조 model이 사용된다면 큰 도움이 되리라 판단되어 본 연구에서는, 건조 중의 수분전달을 확산현상으로 해석한 인삼 열풍건조의 simulation tool을 개발하여 그 유용성을 검토하고, 또 이를 이용하여, 인삼의 열풍 건조 공정에 도입한 템퍼링 과정이 전체 건조시간과 소요에너지에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

해석적 모델의 차분근사화와 수치해석

인삼의 열풍건조를 다음과 같은 해석적 model로 먼저 표시하였다. 즉, 건조는 등온과정으로 이뤄지며, 건조과정 중의 수분전달현상은 Fickian 확산식으로 기술될 수 있고 수분은 반경방향으로만 이동한다고 가정하였다. 또한, 본 연구에서 인삼의 템퍼링은 상온 저속 통풍 조작을 통하여 행한다고 상정하였으므로, 템퍼링 과정 역시 동일한 model로써 해석하였다. 해석적 model 및 차분근사식의 기술에 쓰인 각 기호와 첨자에 대한 설명은 다음과 같다.

- D_{eff} : 유효수분확산계수(m^2/s)
- M : 함수율(건량기준, 소수) (-)
- M_e : 평형함수율(-)
- M_i : 초기함수율(-)
- R : 반지름(m)
- r : 반경방향 거리(m)
- rh_{air} : 건조공기의 상대습도(-)

- T : 온도($^{\circ}C$)
- T_{air} : 건조공기의 온도($^{\circ}C$)
- t : 시간(sec)
- i : 차분화된 반경방향 거리를 정의하기 위해 사용된 지수
- j : 차분화된 건조시간을 정의하기 위해 사용된 지수

① 지배방정식

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

② 초기조건 및 경계조건

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

상기 편미분방정식의 해인 건조 중 인삼의 함수율 $M(r,t)$ 는 Crank-Nicholson method를 이용, 지배방정식을 다음의 차분근사식으로 변환시켜 구하였다. 건조 시료인 원형 인삼의 직경은 대편으로 간주되는 약 26 mm로 가정하였고, Δr 과 Δt 의 값으로는 각각 1.2 mm와 30 sec를 사용하였다. 반경방향으로의 대칭성에 따라 총 12개의 격자점을 인삼 중심부 ($i=1$)로부터 표면 ($i=n$)까지 등간격으로 설정하였으며, 이들 위치에서의 함수율은 아래의 연립방정식을 수치해석적으로 풀어서 구하였다.

① $i=2, \dots, n-1$ 에 대해서는,

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

② $i=1$ (즉, $r=0$)에서는,

$$\begin{aligned} & \{1 + 4\beta (D_{eff})_1^{j+1}\} M_1^{j+1} - 4\beta (D_{eff})_1^{j+1} M_2^{j+1} \\ & = 4\beta (D_{eff})_1^j M_2^j + \{1 - 4\beta (D_{eff})_1^j\} M_1^j \end{aligned}$$

③ $i=n$ (즉, $r=R$)에서는, 경계조건 $M=M_e$ 로부터, $M_n^j = M_e(rh_{air}, T_{air})$

상기 model의 적합성은 함수율 예측치와 실제 실

험치(최병민 등, 1992a)를 비교, 평균상대오차율(mean relative percentage deviation) P를 계산하여 검증하였다. 또, 최병민 등(1992a)의 유사확산형 건조실험식에 의한 예측치와의 상대비교도 실시하였다. 아래와 같이 정의된 평균상대오차율은, 인삼의 건조실험치 중에서 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

필요 물성의 결정

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

1) 유효수분확산계수 $D_{eff}(T, M)$: 유효수분확산계수 D_{eff} 는 함수율비 MR과 건조시간 t간의 관계를 이용한 slope법으로 구하였다. 즉, Fick's law로 기술되는 원통형 물체에서의 수분확산현상의 해는 다음과 같다.

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

여기서 R_c 는 인삼몸통의 반경, 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 윗 식은 다음과 같은 형태를 갖게 되어, ln MR과 t간의 건조곡선의 기울기로부터 D_{eff} 를 계산할 수 있게 된다.

$$\ln MR = -2.124 - 5.783 \frac{D_{eff} t}{R_c^2}$$

위와 같은 slope법은 대개 도해적으로 사용되어 D_{eff} 가 구해지지만, 본 연구에서는 인삼의 건조곡선을 최 등(1992a)이 추천한 다음의 유사확산형 건조실험식을 사용하여 수식화한 후, 해석적인 방법으로써 D_{eff} 를 결정하였다.

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

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 범위 내의 5개 함수율 수준에서 그 기울기 값을 계산하였으며, 이들에 대해 회귀분석을 실시하여 아래와 같은 D_{eff} 의 회귀식을 구하였다.

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

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

2) 평형함수율 $M_e(T_{air}, rh_{air})$: 평형함수율은 아래와 같은 Oswin model로 표시된 최 등(1992b)의 결과를 사용하였다.

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

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

인삼 건조과정의 시뮬레이션

인삼의 열풍건조에 미치는 템퍼링 과정의 영향을 조사하고자 각각 30분 열풍건조+30분 템퍼링, 30분 열풍건조+60분 템퍼링, 30분 열풍건조+90분 템퍼링을 반복하여 약 30% (습량기준)의 최종 함수율까지 인삼을 건조시키는 세 가지 간헐건조법을 상정하였다. 이 때, 열풍건조 과정과 템퍼링 과정에서의 건조조건은 각각 공기온도 $50^{\circ}C$, 상대습도 45% 및 공기온도 $20^{\circ}C$, 상대습도 60%로 가정하였다. 이들과 비교목적으로 온도 $50^{\circ}C$, 상대습도 45%의 열풍을 연속 사용하는 관행 건조법에 대한 분석 역시 실시하였다. 건조 소요에너지의 분석을 위해서 상용화된 회분식 선반형 건조기를 사용한다고 가정했으며, 이 경우 열풍은 직접연소식 석유 버너와 도풍관 불이 축류 팬(풍량 $100 m^3/min$, 발생 정압 $20 mmHg$, 팬 효율 0.65, 전동기 효율 0.75)에 의해 공급되는 것으로 가정하였다. 전체 건조 소요에너지는 건조공기의 가열과 팬 구동에 필요한 에너지이며 이들은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$q_{air} = \rho_{air} Q C_p \Delta T \times t$$

$$E_{fan} = \frac{Q \Delta p}{102 \times \eta_{fan} \eta_{motor}} \times t$$

여기서, q_{air} : 공기 가열 에너지(kJ)
 E_{fan} : 팬 구동 에너지(kJ)
 ρ_{air} : 공기의 밀도(kg/m³)
 Q : 풍량(m³/s)
 C_p : 공기의 비열(kJ/kg°C)
 η_{fan}, η_{motor} : 팬 및 팬 구동모터의 효율
 ΔT : 건조공기의 온도 증가량(°C)
 Δp : 팬의 발생 정압(mm Hg)
 t : 시간(sec)

결과 및 고찰

인삼 열풍건조의 simulation model 개발

본 연구에서 개발한 인삼 열풍건조의 simulation model에 의한 함수율을 예측치와 최병민 등(1992a)이 구한 유사확산형 건조방정식에 의한 예측치 및 실험치를 Figs. 1-3에 비교하여 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 건조 공기온도 30°C, 상대습도 45%의 조건에서는 본 연구에서 개발한 simulation model은 함수율을 실제 측정치보다 낮게, 유사확산형 건조방정식은 실험치보다 높게 예측하였다. Fig. 2는 건조 공기온도 50°C, 상대습도 45%의 경우로서, simulation model과 실험치 공히 만족할 만한 예측성능을 보여주었으며, 특히 simulation model의 경우 건조시작 8시간 이후부터는 실험치와 거의 동일한 예측치를 보여주었다. 일반적으로 유사확산형 건조방정식은 건조말기에는 정확도가 높지만 건조초기에 큰 오차를 보인다고 알려져 있는데, Fig. 2에 나타난 건조초기 약 5시간 동안의

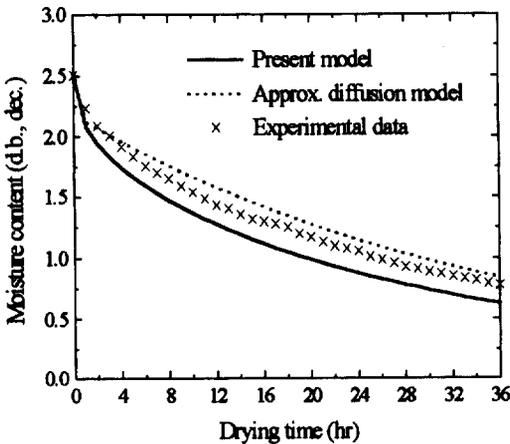


Fig. 1. Comparison between predicted and measured moisture contents during Ginseng drying ($T_{air}=30^{\circ}C$, $rh_{air}=45\%$).

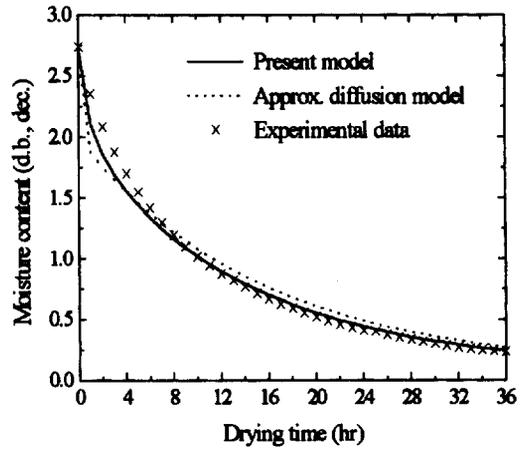


Fig. 2. Comparison between predicted and measured moisture contents during Ginseng drying ($T_{air}=50^{\circ}C$, $rh_{air}=45\%$).

실측치와 예측치간 비교로부터도 이같은 경향을 재확인할 수 있었다. 비교적 고온인 건조 공기온도 70°C, 상대습도 50%의 조건에서도 거의 전 건조기간의 반에 해당하는 초기 10시간 동안 유사확산형 건조실험식에 의한 예측치는 큰 오차를 보여주었으나, simulation model에 의한 예측치는 건조초기 약간의 오차를 제외하고는 전 건조기간 동안 실제 실험치와 잘 일치하였다 (Fig. 3).

평균상대오차율을 사용하여 이상의 3가지 건조조건 하에서 함수율 예측의 정확도를 조사한 결과, 유사확산형의 건조식은 각각 8.9, 13.2, 18.5% (평균 13.5%), 본 연구에서 사용한 분산형 건조 model은 각각 14.6,

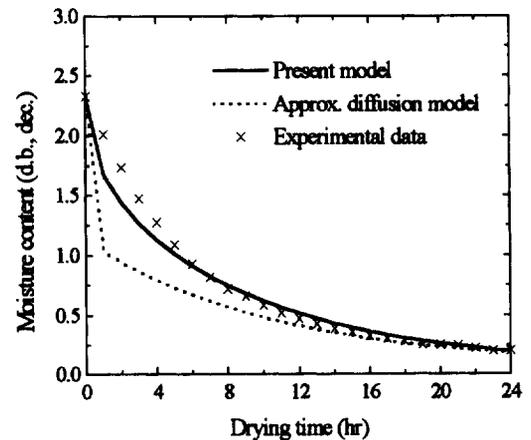


Fig. 3. Comparison between predicted and measured moisture contents during Ginseng drying ($T_{air}=70^{\circ}C$, $rh_{air}=50\%$).

4.9, 8.6% (평균 9.4%)의 평균상대오차율을 보여 본 연구에서 사용된 simulation model이 기존의 유사확산형 건조실험식에 비해 인삼의 실제 건조과정을 더 정확하게 예측할 수 있을 것으로 생각되었다.

건조 중의 수분확산현상을 수치해석적으로 풀이할 때 요구되는 두 가지 중요한 물성 중 하나인 유효수분확산계수 D_{eff} 는 농산물과 식품의 경우, 온도와는 지수함수, 함수율과는 지수함수 또는 선형적인 함수 관계가 있다고 보통 알려져 있으나(Jayas *et al.*, 1991), 본 연구에서 사용된 인삼의 D_{eff} 값은 온도의 1/2승에 비례하였지만 함수율에는 좌우되지 않았다. 피 건조물의 유효수분확산계수 D_{eff} 는 건조와 관련된 가장 중요한 물성 중의 하나라는 사실과 인삼의 경우 수분확산계수와 온도, 함수율 간의 관계가 여타 농산물과는 다른 양상이었다는 점을 고려할 때, 인삼의 유효수분확산계수 D_{eff} 의 정밀한 측정과 D_{eff} 값과 온도, 함수율 간의 상관관계에 대한 연구의 필요성이 인식되었다.

템퍼링 효과의 분석

백삼의 관행 건조법에 따르면 습량기준 약 75% (건량기준으로는 300%)의 초기 함수율을 가진 수삼은 온도 40~55°C, 상대습도 40~60%의 열풍에 의해 습량기준 13% (건량기준 14.9%)의 최종 함수율까지 건조되는데, 원료수삼의 직경이 약 2.5 cm일 경우 55시간이 소요된다 (최병민 등, 1992a). Fig. 4와 5 및 Table 1은 단기간의 열풍건조 구간과 상온통풍 템퍼링 구간을 조합하여 이 과정을 주기적으로 반복하는 간헐건조법을 백삼건조에 사용할 경우, 건조시간과 건조 소요에너지의 예측결과를 나타내고 있다.

습량기준 초기 함수율 73% (건량기준으로는 270%)인 원료수삼을 약 23%의 습량기준 함수율(건량기준 30%)까지 건조시킬 때, 총 소요시간은 연속 건조의 경우는 33.5시간, 열풍건조 구간과 템퍼링 구간을 30분+30분, 30분+60분, 30분+90분으로 하여 이를 반복시킨 간헐건조의 경우는 각각 50.5시간, 62시간 및 68.5시간으로 예측되었다(Fig. 4). 각각의 간헐건조법에서의

총 건조 소요시간이 연속 건조법에서의 소요시간에 비해 정확히 2배, 3배, 그리고 4배가 아닌 것은 템퍼링 구간에서도 상온통풍에 의한 건조가 다소 진행되었기 때문으로 생각되며, 분석 결과 건조 소요시간을 기준

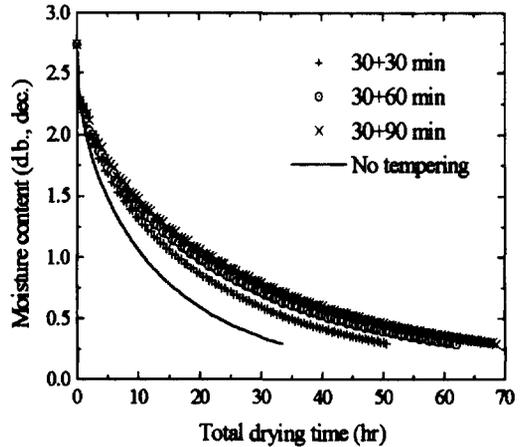


Fig. 4. Predicted moisture content change with total drying time for each drying method ($T_{air}=50^{\circ}C$, $rh_{air}=45\%$).

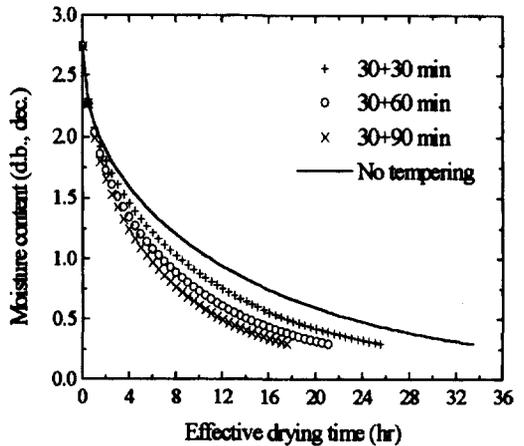


Fig. 5. Predicted moisture content change with effective drying time for each drying method ($T_{air}=50^{\circ}C$, $rh_{air}=45\%$).

Table 1. Predicted drying time and energy consumption for each drying method

	No tempering	30+30 min	30+60 min	30+90 min
Total time (hr)	33.5	50.5	62.0	68.5
Active drying time (hr)	33.5	25.5	21.0	17.5
Energy req'd for heating air (MJ)	7,319	5,571	4,588	3,823
Energy req'd for fan (MJ)	81	122	150	165
Total energy req'd (MJ)	7,400	5,693	4,738	3,988

으로 하면 간헐건조시 템퍼링 구간이 갖는 건조에의 기여도는 열풍 건조구간의 약 1/3에 해당하였다.

총 건조 소요시간 중 실제로 50°C의 열풍이 가해진 유효건조시간은 열풍건조 구간과 템퍼링 구간 간의 시간비에 비례하므로, Fig. 5에서와 같이 연속건조의 경우는 33.5시간이었고 3가지 간헐건조의 경우는 각각 25.5시간, 21시간 및 17.5시간이었다. 또한, 건조공기의 가열과 팬 구동에 필요한 단위 시간당 에너지의 추정치는 각각 218.5 MJ과 2.4 MJ로서, 전 건조기간에 걸쳐 소요되는 송풍 에너지는 열풍건조 구간에서만 계산되는 열 에너지 소요량에 비해 무시할 정도였으므로, Table 1에서와 같이 각 건조방법 간 전체 소요 에너지의 비 역시 유효건조시간의 비와 큰 차이를 보이지 않았다.

건조와 관련하여 일반적으로 언급되는 템퍼링의 효과 중 하나로서 피건조물 내부의 함수율 구배 평탄화와 이로 인한 후속 공정에서의 건조속도 증가를 들 수 있다. Figs. 6-8은 습량기준 평균 함수율이 각각 60%, 45%, 33%일 때, 템퍼링 구간 직후의 해당 열풍 건조 구간에서의 건조속도를 예측하여 각 건조방법 별로 비교한 결과이다.

건조가 시작되면 인삼 표면의 함수율은 건조공기의 온도와 상대습도에 영향을 받아 일반적으로 매우 낮은 평형함수율 값으로 수렴되며, 이로 인해 상대적으로 표면과 가까운 부분에는 상당한 크기의 건조 추진력이 발생하여 높은 건조속도가 나타나게 된다. 이러한 경향은 건조가 진행됨에 따라 점차 내부로 전파되고 최고 건조속도를 보이는 위치 역시 인삼의 중앙부 쪽으로 이동하며(Fig. 6), 일정 시간 후에는 인삼 내부

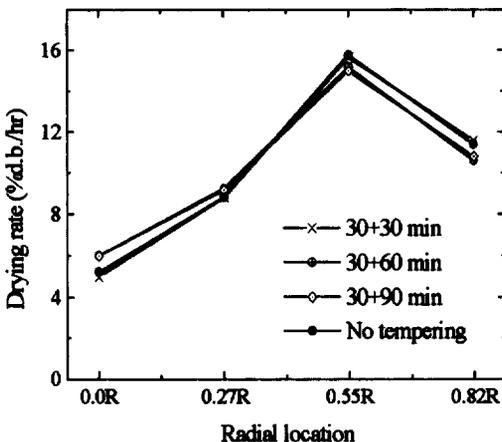


Fig. 6. Predicted drying rate profiles for each drying methods when $M_{avg}=60\%$ (w.b.).

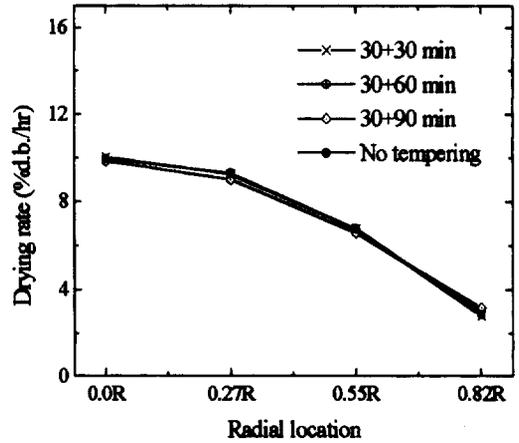


Fig. 7. Predicted drying rate profiles for each drying methods when $M_{avg}=45\%$ (w.b.).

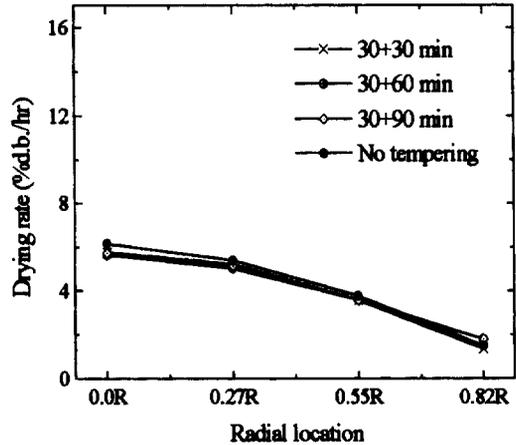


Fig. 8. Predicted drying rate profiles for each drying methods when $M_{avg}=33\%$ (w.b.).

위치별 건조속도는 중심부($r=0$)에서 최대가 되고 중심에서 멀어짐에 따라 감소하는 형태가 확립됨을 알 수 있었다(Figs. 7-8).

그러나, Figs. 6-8에서 각 건조방법 별 건조속도의 비교로부터 알 수 있듯이 템퍼링 과정의 유무 및 템퍼링 시간의 장단에 따른 건조속도의 변화는 예견되지 않았다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 템퍼링 과정의 정의, 즉 인삼의 템퍼링 과정은 상온 저속통풍 조작을 통하여 행해진다는 가정과 밀접한 관련이 있지 않나 추정된다. 전술한 바와 같이, 템퍼링 구간에서도 상온통풍에 의한 건조가 다소 진행되었으며 이는 오히려 피건조물 내부의 함수율 구배 평탄화라는 템퍼링 자체의 효과에 불리하게 작용하였을 것으로 생각된다.

요 약

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

2. 본 연구에서 사용된 분산형 건조 model은 유사확산형 건조방정식과 거의 동등한 수준의 함수율 예측도를 보였지만, 인삼의 유효수분확산계수 D_{eff} 의 정밀한 측정, 그리고 D_{eff} 값과 온도, 함수율 간의 상관관계에 대한 추가연구의 필요성이 인식되었다.

3. 연속 건조와 간헐 건조에서의 총 건조 소요시간은 템퍼링이 전체 건조과정에서 차지하는 비율에 따라 증가하였으나, 템퍼링 구간과 열풍건조 구간 간의 시간비에 정확히 비례하지는 않았다. 반면, 건조 소요에너지는 템퍼링 구간과 열풍건조 구간 간의 시간비가 커짐에 따라 감소함이 예측되었다.

4. 템퍼링에 의해 피건조물 내부의 함수율 구배는 평탄화되어 후속 공정에서의 건조속도 증가를 가져온다는 정설과는 달리 각 건조방법에서의 건조속도들은 서로 차이점을 보이지 않아, 템퍼링 과정의 유무 및 템퍼링 기간의 장단은 건조속도와는 무관함이 예측되었다. 이는 본 연구에서 채택한 템퍼링 과정의 정의에서 비롯된 것으로 추정되었다.

감사의 글

본 연구는 농림부의 농림수산특정연구과제의 연구결과 중 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

문 헌

- 최병민, 이종호, 박승제. 1992a. 인삼의 건조특성 구명 및 건조모델 개발에 관한 연구. *고려인삼학회지* 16(2): 111-123
- 최병민, 이종호, 박승제, 김철수, 이종용. 1992b. 인삼의 평형함수율에 관한 연구. *한국농업기계학회지* 17(3): 247-259
- Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall. 1992. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold, New York, N. Y.
- Ezeike, G.O.I. and L. Otten. 1981. Theoretical analysis of the tempering phase of a cyclic drying process. *Trans. of ASAE* 24(6): 1590-1594
- Gustafson, R.J., A.Y. Mahmoud and G.E. Hall. 1983. Breakage susceptibility reduction by short-term tempering of corn. *Trans. of ASAE* 26(3): 918-922
- 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
- Velupillai, L. and L.R. Verma. 1986. Drying and tempering effects on parboiled rice quality. *Trans. of ASAE* 29(1): 312-319
- Waananen, K.W., J.B. Litchfield, and M.R. Okos. 1993. Classification of drying models for porous solids. *Drying Technology* 11(1): 1-40