

배치식 터널 건조기의 고추 건조 시뮬레이션 모델 연구

Simulation Model for Drying Characteristics of Batch-type Tunnel Dryer

황 규 준*	고 학 균*	홍 지 향*	김 종 순*
	정회원	정회원	
K. J. Hwang	H. K. Koh	J. H. Hong	J. S. Kim

SUMMARY

In this study, experiments were performed for various drying air temperatures, air flow rates and tray distances to analyze drying characteristics of batch type tunnel dryer. In comparison of tunnel drying with cabinet drying which is currently used in the farm, the results of drying simulation model of cabinet dryer was used and then the possibility of applying the drying simulation model of cabinet dryer to batch type tunnel dryer was investigated.

The results showed that as the drying temperature increased, the drying rate and moisture difference in the direction of air flow increased and as the air flow rate increased, the drying rate increased and moisture difference decreased. In tunnel dryer, drying through bottom of the tray had large effect on drying rate and the effect was more significant when the drying temperature increased. As air flow rate increased, the difference of drying rates between tunnel and cabinet drying increased and drying rate of tunnel drying was higher. The drying simulation model could estimate moisture content in tunnel drying more precisely by using modified effective moisture diffusion coefficient for air flow rate.

주요용어(Key words) : Red pepper, Tunnel dryer, Drying characteristics, Simulation model

1. 서 론

고추는 대부분 수확후 건조과정을 거쳐 건고추로 유통되어 소비되며, 수확 직후 함수율은 80%(wb) 이상으로 건조에는 많은 에너지와 시간이 소요된다. 현재 국내의 고추건조는 대부분 소형의 상자형 배치식 화력건조기를 이용하여 농가 개별적으로 이루어지고 있으나, 이러한 방법은 건조과정에서 많은 노동력이 요구될 뿐 아니라 건조비용의 상승을 초래하고 있으며, 구조상 건조시스

템의 자동화, 대형화에 부적합하다. 따라서, 주산지별로 대형의 고추 건조시스템을 점차적인 건조공정의 자동화를 이루어 나가기 위해 터널건조기의 이용이 요구되고 있다.

터널건조기는 크게 배치식(batch type), 병류식(concurrent flow), 향류식(counter current flow)으로 구분되며, 특히 배치식 터널건조기는 구조가 간단하여 제작비용이 저렴하고 자동화, 대형화가 용이하다는 장점이 있다. 현재 전세계적으로 배치식 터널건조기가 다양한 농수산물의 건조에 널리 이

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

용되고 있는 추세이나 건조특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 최근 터널건조기의 성능분석에 관한 연구들이 수행되고 있으나 아직 초보적인 수준에 머물러 있다.

강정문(1998)은 가공용 고추 건조시스템에 터널건조기를 이용할 것을 제시하고 적합한 건조조건을 찾기 위하여 전처리 및 온도별 실험을 하였으며, Lee 등(1993)은 터널건조기를 이용한 무 절편의 최적 건조조건을 찾기 위한 연구를 수행하였다. 국외에서는 자두, 포도, 파파야 등의 건조에 사용되는 터널건조기의 최적화에 관한 연구들이 다수 수행되었다. Kiranoudis(1996, 1998)는 반 배치식 터널형 포도건조기의 설계와 최적화에 관한 연구에서 트럭(truck) 단위로 평형식을 세워 시뮬레이션을 수행하였다. Soponronnarit 등(1997)은 배치식 터널건조기를 이용한 파파야 절편의 건조과정을 최적화하기 위하여 상자형 건조모델을 적용하였으며, 터널을 공기 흐름방향으로 여러 개의 얇은 단면(thin layer)으로 나누어 평형식을 세웠다. 본 연구는 추후 국내에서 각종 농산물의 건조에 널리 이용될 것으로 예상되는 배치식 터널건조기를 이용한 고추의 기본적인 건조특성에 관해 알아보고 기존의 상자형 건조기와 건조특성을 비교하는 것을 목적으로 하였다. 고추의 상자형 건조모델은 이미 개발되었으므로(조용진, 1991; 금동혁 등, 1991) 실험 회수를 줄이기 위하여 건조모델의 예측 결과를 상자형 건조실험 대신 비교자료로 이용하였다. 또한 상자형 건조의 시뮬레이션 모델을 터널형 건조에 적용할 수 있는가의 여부에 대해서도 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 실험에 사용된 고추는 충북 괴산에서 1998년 수확된 영웅, 풍촌, 부광 품종이며, 수확 후 함수율은 약 84%(wb)였다. 고추는 실험기간중 온도 3℃, 상대습도 90% 조건의 저온저장고에 보관되었으며, 실험 전 상온에 약 12시간 노출하였다.

나. 실험장치

공시기는 1997년 서울대학교 농산가공시스템 연구실에서 제작된 배치식 터널건조기이다. 제작된 터널건조기(그림 1)에서 유입풍속이 불균일하고 속도편차가 크게 나타나므로 소형의 실험용 터널을 제작하여 건조기 내에 설치하여 건조실험을 수행하였다. 시료 고추의 함수율을 시간별로 측정하기 위하여 샘플 트레이를 20(w)×20(l)×4(t) cm로 하였으며, 중간 트레이는 20(w)×40(l)×4(t) cm로 하였다.

다. 실험내용

터널건조기에서 송풍온도, 건공기 질량유동률 및 트레이 간격의 변화가 건조속도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험과 트레이 밀면을 통한 건조효과를 알아보기 위한 별도의 실험을 실시하였다. 설정온도 3조건(60, 70, 80℃), 공기질량유동률 4조건(1,962, 2,825, 3,296, 3,767kg/hr·m²) 및 트레이 간격변화 2조건(4, 11cm)에서 건조실험을 수행하였다. 그림 1과 같이 터널 내에 트레이를 3층으로 설치하였으며 1cm 트레이 간격 시험에서는 중간층을 제거하였다. 고추를 각 층의 트레이에 겹치지 않도록 단층으로 적재하여 산물밀도가 57kg/m²이 되도록 하였다.

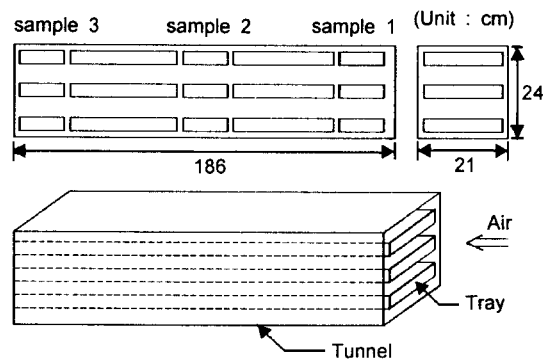


Fig. 1 Specification and layout of experimental tunnel for tunnel drying.

트레이 밀면을 통한 건조효과를 알아보기 위하여 트레이와 바닥 사이에 공간을 둔 것과 두지 않은 것의 두 경우로 나누어 실험을 실시하였으며 온도는 3조건(60, 70, 80℃)으로 하였다. 건조실험에서 건공기의 상대습도는 모두 5% 미만으로 건조속도에 큰 영향을 주지 못하므로 분석 대상에서 제외하였다.

터널건조기와 상자형 건조기의 건조특성을 비교하기 위하여 비교자료로 상자형 건조 시뮬레이션 모델의 예측결과를 이용하였으며, 그림 2와 같이 트레이를 설치하여 온도 2조건(70, 80℃)에서 모델의 검증용 실험을 실시하였다. 상자형 건조 시뮬레이션에는 Bakker- Arkema 등(1974)이 제시한 고정층 건조과정을 지배하는 다음과 같은 4개의 편미분 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-hA_s(T-\theta)}{G_a \cdot c_a + G_a \cdot c_v \cdot H} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{hA_s(T-\theta)}{\rho_p(c_p + Mc_w)} + \frac{h_{fg} + c_v(T-\theta)}{\rho_p(c_p + Mc_w)} G_a \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = a \text{ thin layer drying equation} \dots\dots (4)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$T(x,0) = T_{in}, \quad \theta(x,0) = \theta_0,$$

$$T(0,t) = T_{in}$$

$$H(x,0) = H_{in}, \quad M(x,0) = M_0,$$

$$H(0,t) = H_{in}$$

고추의 수분 평형을 나타내는 박층건조방정식으로 조용진(1991)이 제시한 식 (5)를 사용하였다.

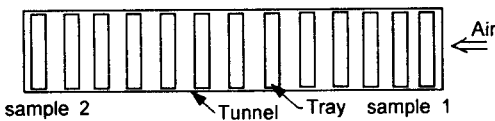


Fig. 2 Layout of experimental tunnel for thick layer cabinet drying.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{-3D_e}{d^2} (M - M_e) \dots\dots\dots (5)$$

$$D_e = AM^B$$

$$A = 0.000041492(1-rh) \exp(0.0405465 \theta)$$

$$d = 0.01898 + 0.02684 M - 0.00227 M^2 + 0.01186 M m_b$$

평형함수방정식, 중발잠열방정식 및 물질값이 필요하며, 본 연구에서는 조용진(1991)이 제시한 방정식들을 사용하였다.

건조모델의 수치해를 구하기 위하여 식 (1), (2)를 다음과 같은 유한차분식으로 나타내었으며, 식 (5)는 4차 Runge-Kutta 방법을 적용하여 해를 구하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{T_{x+1}^{i+1} - T_x^{i+1}}{\Delta x} \\ &= \frac{-hA_s}{G_a(c_a + c_v H_{x+1}^{i+1})} [\frac{1}{2}(T_{x+1}^{i+1} + T_x^{i+1}) - \frac{1}{2}(\theta_{x+1}^{i+1} + \theta_x^{i+1})] + 0. \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\theta_{x+1}^{i+1} - \theta_x^{i+1}}{\Delta t} \\ &= \frac{hA_s}{\rho_p(c_p + c_v M_{x+1}^{i+1})} [\frac{1}{2}(T_{x+1}^{i+1} + T_x^{i+1}) - \frac{1}{2}(\theta_{x+1}^{i+1} + \theta_x^{i+1})] \\ &+ \frac{(M_{x+1}^{i+1} - M_x^{i+1})}{(c_p + c_v M_{x+1}^{i+1}) \Delta t} \{ h_{fg} + c_v [\frac{1}{2}(T_{x+1}^{i+1} + T_x^{i+1}) - \frac{1}{2}(\theta_{x+1}^{i+1} + \theta_x^{i+1})] \} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

위의 유한차분식을 이용하여 해를 구하는 순서는 다음과 같다.

- i) 시간 Δt 을 충분한다.
- ii) M_{x+1}^{i+1} 을 구한다.
- iii) H_{x+1}^{i+1} 을 구한다.
- iv) 식 (6)과 식 (7)를 연립하여 풀어 T_{x+1}^{i+1} 와 θ_{x+1}^{i+1} 을 구한다.
- v) 깊이를 Δx 증분위 모델의 해를 구하기 위해서는 고추의 하여 전체되적층 깊이에 이를 때까지 ii)~iv) 단계를 반복한다.
- vi) 목표 함수율에 이를 때까지 i)~v) 단계를

반복한다.

이 때, $\Delta t = 0.05(hr)$, $\Delta x = 0.02(m)$ 로 하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 건공기 질량유동률 $3,296\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$ 에서 온도에 따른 터널건조기의 건조속도를 나타낸 것으로 온도가 높을수록 건조속도가 증가하는 경향을 보였다. 표 1에는 평균 함수율의 함수율비가 1/2이 되는 반건조시간과 이 때의 입구와 출구 시료의 함수율차를 나타내었다. 온도가 높을수록 건조속도와 길이방향의 함수율차가 증가하였다. 그림 4는 온도가 약 75°C 일 때, 서로 다른 질량유동률이 건조속도에 미치는 영향을 비교한 것이며, 이 때의 반건조시간과 길이방향 함수율차를 표 2에 나타내었다. 질량유동이 증가할수록 건조속도는 증가하고 길이방향의 함수율차는 감소하였다.

그림 5는 트레이와 바닥 사이에 공간이 없는 단층 트레이(1-layer) 건조실험과 공간이 있는 3층 트레이(단층과 동일한 두께) 건조실험의 건조속도를 나타낸 것이며, 표 3에는 각 조건의 반건조시간과 두 방법간의 반건조시간 차이를 나타내었다. 결과에서 단층건조속도가 보다 느리게 나타났으며 온도가 커질수록 두 방법간의 건조속도차가 크게 나타났다. 따라서, 터널건조에서 트레이 밑면을 통한

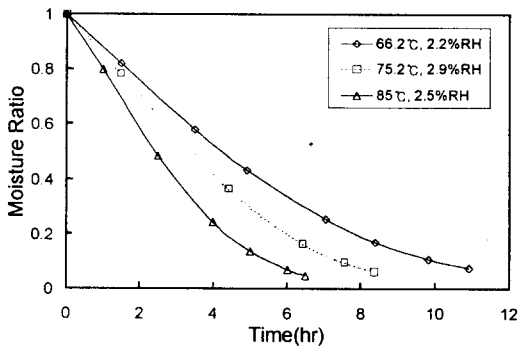


Fig. 3 Measured average drying rates of tunnel drying at the air flow rate $3,296\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$.

건조효과도 건조속도에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 트레이 다공판의 개구비를 크게 하는 것이 건조속도를 증가시키는 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

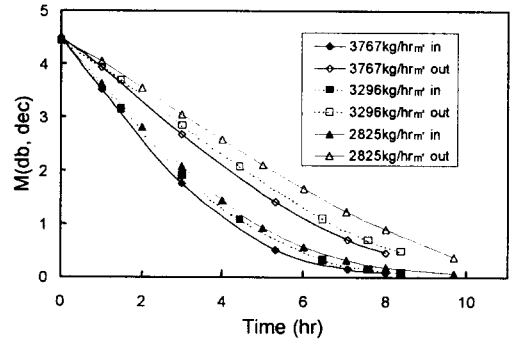


Fig. 4 Measured moisture contents of tunnel drying at various drying conditions ($76.4^\circ\text{C} \cdot 3,797\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$, $75.2^\circ\text{C} \cdot 3,296\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$, $74.1^\circ\text{C} \cdot 2,825\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$).

Table 1 Half drying time and moisture difference at the flow rate of $3,296\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$

Drying condition	Half time (hr)	Inlet moisture (db, dec)	Outlet moisture (db, dec)	Diff.
66.5°C	4.25	1.838	2.656	0.818
75.2°C	3.45	1.776	2.623	0.847
85°C	2.42	1.531	2.633	1.102

Table 2 Half drying time and moisture difference at 75°C

Drying condition ($\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2$)	Half time (hr)	Inlet moisture (db, dec)	Outlet moisture (db, dec)	Diff.
3767	3.02	1.757	2.675	0.918
3296	3.32	1.654	2.666	1.012
2825	3.9	1.506	2.631	1.125

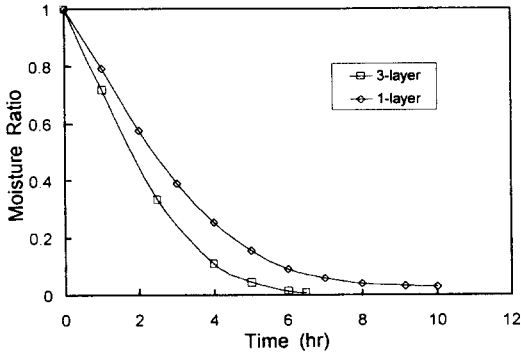


Fig. 5 Drying rates of single layer and 3-layer drying at 85°C.

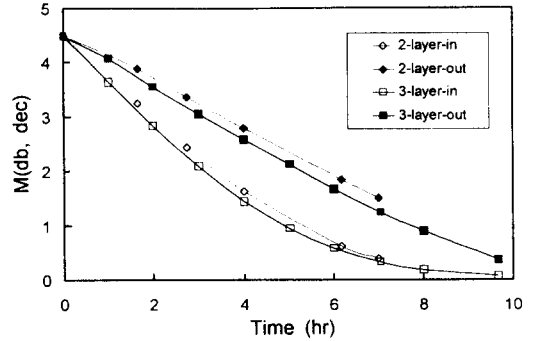


Fig. 6 Drying rates of 2-layer(at 72.8°C, 3,500kg/hr · m²) and 3-layer drying (at 74.1°C, 2,825kg/hr · m²).

Table 3 Half drying time and difference of 1-layer and 3-layer drying

Drying condition	Drying method	Half time (hr)	Diff. (hr)
77°C	1-layer	2.81	0.36
	3-layer	2.45	
85°C	1-layer	2.41	0.56
	3-layer	1.85	

Table 4 r² and RMSE between measured and estimated moisture contents of thick layer cabinet drying

Drying condition		r ²	RMSE
75.9°C, 1,962kg/hr · m ²	in	0.993	0.162
	out	0.999	0.054
83.4°C, 1,962kg/hr · m ²	in	0.999	0.057
	out	0.999	0.168

그림 6은 중간층을 제거하여 트레이 간격을 크게 한 2층건조와 3층건조의 입구와 출구시료의 건조속도를 비교한 것이다. 질량유동률이 2층건조에서 보다 큼에도 불구하고 전체적 건조속도가 비슷하게 나타나는 것으로 보아 건조공기가 고추의 건조에 효과적으로 쓰이지 못함을 알 수 있다. 실험결과를 통해 트레이 간격이 커질수록 건조속도가 비례하여 증가하지 않는다는 것을 알 수 있으며, 이 경우 3층건조에 투입된 고추의 양이 많으므로 트레이 간격을 작게 하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단된다.

그림 7은 상자형 시뮬레이션 모델의 검증실험 결과이며, 표 4는 이 때 상관계수(r²)와 RMSE(Root Mean Square Error)를 나타낸 것이다. 실험결과와 예측결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 예측결과를 실험결과 대신 비교자료로 사용할 수 있을 것이다.

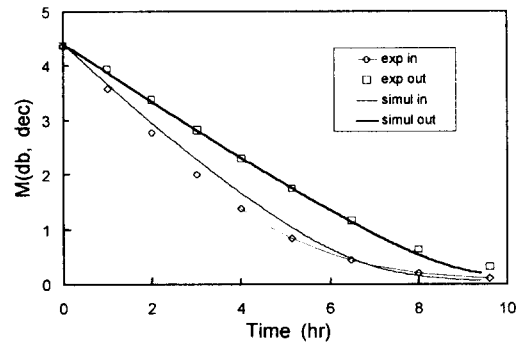


Fig. 7 Measured and estimated moisture contents of the thick layer cabinet drying at 75.9°C.

그림 8, 9는 상자형 시뮬레이션 모델을 이용하

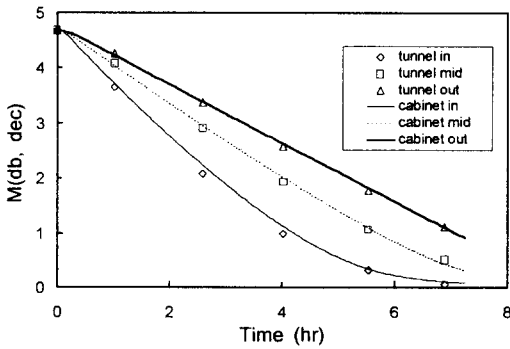


Fig. 8 Measured thick layer cabinet drying rate and estimated tunnel drying rate at 81 °C, 1,962kg/hr · m².

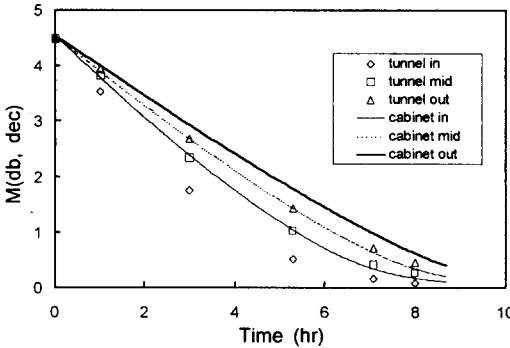


Fig. 9 Measured thick layer cabinet drying rate and estimated tunnel drying rate at 76.4 °C, 3,767kg/hr · m².

여 터널건조와 상자형 건조의 건조속도를 비교한 것이며, 표 5는 각각의 건조조건에서 평균함수율의 반건조시간을 구한 것이다. 결과에서 공기의 질량유동률이 작은 때에는 두 결과가 비교적 일치하지만 질량유동률이 커질수록 건조속도의 차이가 증가하여 터널건조의 건조속도가 상자형 건조의 건조속도보다 커지는 것으로 나타났다. 이것은 질량유동이 증가하면서 나타나는 유동의 변화 때문으로 생각된다.

건조실험에서 건조속도의 차이는 질량유동이 1,962kg/hr m² 일 때 나타나기 시작했으며, 이 때 트레이 사이에서 관내유동에 대한 레이놀드수 (Re_{D_s})를 구해보면 다음과 같다.

$$V = 1962 \times \frac{0.24}{0.15} \times \frac{1}{1.09 \times 3600} = 0.8(m/s)$$

$$D_h = \frac{4 \times 0.21 \times 0.05}{2 \times (0.21 + 0.05)} \approx 0.081(m)$$

$$Re_{D_s} = \frac{VD_h}{\nu} = \frac{0.8 \times 0.081}{2.045 \times 10^{-5}} = 3168.7$$

이 값은 관내유동에서 난류로 천이 되는 임계값과 비슷하다. 따라서, 건조속도의 차이는 난류의 영향 때문으로 생각되며 건공기의 유동이 난류유동으로 천이 되면서 터널형 건조의 건조속도가 상자형 후층건조의 건조속도보다 점점 커진다고 판단된다. 그러나 같은 규격의 송풍기를 사용할 때,

Table 5 Difference of half drying time between tunnel and cabinet drying

Drying condition		Half time(hr)	Difference
81.0°C, 1,962 kg/hr · m ²	tunnel	3.31	0.05
	cabinet	3.36	
75.5°C, 2,825 kg/hr · m ²	tunnel	3.45	0.23
	cabinet	3.68	
84.9°C, 3,296 kg/hr · m ²	tunnel	2.44	0.25
	cabinet	2.69	
76.4°C, 3,767 kg/hr · m ²	tunnel	3.02	0.73
	cabinet	3.75	

터널형 건조기에서는 트레이 사이의 빈 공간 때문에 송풍저항이 감소하여 보다 큰 송풍량을 가질 수 있으므로 건조속도는 더욱 빠르다고 할 수 있다.

위의 비교결과에서 질량유동률이 클 때, 터널 건조의 건조속도가 상자형 건조의 건조속도보다 크게 나타났지만 그 차이는 크리 크지 않았으며 질량유동률이 증가할수록 건조속도의 차이도 증가하는 경향을 보였다. 따라서 작은 오차범위 내에서 상자형 건조 시뮬레이션 모델은 터널건조기의 분석과 설계에 적용될 수 있을 것으로 보이며, 종류에서 완전히 발달한 난류영역에 이르는 질량유동률의 범위에 대해 질량유동률과 건조속도와의 관계가 구명된다면 보다 정확한 건조속도 예측 도구로서 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 터널건조기의 기본적 건조특성에 대해 알아보고 상자형 건조기와 비교하는 것을 목적으로 하였으며, 비교결과를 이용하여 상자형 건조모델을 터널건조기에 적용할 수 있는 가능성에 대하여 살펴보았다.

터널건조기에서 온도가 높아질수록 건조속도와 길이방향 함수율차가 증가하는 경향을 보였으며, 질량유동이 증가할수록 건조속도는 증가하고 길이방향 함수율차가 감소하는 경향을 보였다. 그리고, 트레이 밑면을 통한 건조효과는 전체적 건조속도에 큰 영향을 주었으며, 트레이 간격이 변화할 때 간격의 크기와 건조속도가 비례하지 않는다는 사실을 알 수 있었다.

터널건조와 상자형 건조의 건조속도는 질량유동이 작은 범위에서는 비슷하지만 질량유동이 커질수록 건조속도의 차이가 발생하여 터널건조기의 건조속도가 빠르게 나타났다. 그러나, 그 차이가 주목할만한 수준은 아니므로 상자형 건조모델을 터널건조기의 분석, 설계에 이용할 수 있을 것으로 보이며, 질량유동과 건조속도의 관계가 구명되

어 상자형 건조모델이 수정된다면 비교적 정확한 예측모델이 될 수 있을 것으로 판단된다.

< List of Symbols >

A_s	: 고추퇴적층의 비표면적 (m^2/m^3)
c_a	: 건공기의 비열 ($kJ/kg \cdot K$)
c_p	: 고추의 비열 ($kJ/kg \cdot K$)
c_v	: 수증기의 비열 ($kJ/kg \cdot K$)
c_w	: 물의 비열 ($kJ/kg \cdot K$)
d	: 고추의 과피두께 (cm)
D_e	: 고추의 유효수분확산계수 (cm^2/hr)
G_a	: 공기 질량유동률 ($kg/hr \cdot m^2$)
h	: 고추퇴적층의 대류열전달계수 ($kJ/hr \cdot m^2 \cdot K$)
h_{fg}	: 고추의 수분증발잠열 (kJ/kg)
H	: 절대습도
H_m	: 유입공기의 절대습도
m_b	: 고추의 개체 건물중량 (g)
M	: 고추의 함수율 (dec. db)
M_0	: 고추의 초기함수율 (dec. db)
M_e	: 고추의 평형함수율 (dec. db)
rh	: 공기의 상대습도 (dec.)
t	: 건조시간 (hr)
T	: 건공기의 온도 ($^{\circ}C$)
T_m	: 유입공기의 온도 ($^{\circ}C$)
x	: 고추퇴적층의 깊이 (m)
θ	: 고추의 온도 ($^{\circ}C$)
θ_0	: 고추의 초기온도 ($^{\circ}C$)
ρ_p	: 고추건물의 산물밀도 (kg/m^3)

참 고 문 헌

1. 강정문. 1998. 가공용 고추의 건조 시스템 개발에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문.
2. 금동혁, 최창현, 김수연. 1991. 고추 건조기의

- 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회지 16(3): 248-262.
3. 조용진. 1991. 고추의 건조과정 모형화 및 최적화에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
4. Kiranoudis, C. T. et al. 1996. Modeling and optimization of a tunnel grape dryer. *Drying Technology* 14:1695-1718.
5. Kiranoudis, C. T. 1998. Design of batch grape dryers. *Drying Technology* 16(1&2):141-162.
6. Lee, D. S. and Y. R. Pyun. 1993. Optimization of operating conditions in tunnel dryig of food. *Drying Technology* 11(5):1025-1052.
7. Soponronnarit, S. 1988. Energy model of grain dryer system. *Asian Journal on Science and Technology for Development* 5(2):43-68.