

건조효율 향상을 위한 고추건조공정의 최적화

정순경·금동혁*·이동선

경남대학교 식품공학과, *성균관대학교 농업기계공학과

Process Optimization of Red Pepper Drying for the Improvement of Drying Efficiency

Sun-Kyung Chung, Dong-Hyuk, Keum* and Dong-Sun Lee

Department of Food Engineering, Kyungnam University

*Department of Agricultural Machinery Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract

Drying process in a fixed bed red pepper dryer was modeled and simulated. Drying efficiency describing the effectiveness of energy usage in red pepper drying was defined as a ratio of energy used for moisture evaporation to total energy consumption, and expressed in combination of measurable temperature variables. The efficiency was compared with real evaporative efficiency and tested in the simulated and experimental drying. An overall drying efficiency was derived, and analyzed for various control variables consisting of drying temperature, air recycle ratio and air flow rate. Optimal operation conditions of drying was then searched by Box's complex method by using it as an objective function. Carotenoids retention was simulated and put as a constraint of product quality in the optimization. The optimization results gave that two staged drying operation could improve the drying efficiency compared with single staged drying. As a technique for further energy saving automatic termination of drying appeared feasible by monitoring an exit air temperature from dryer.

Key words: energy, conservation, drying efficiency, red pepper drying, optimization

서 론

우리나라에서의 고추생산은 건조추를 기준으로 약 15만톤에 이르러 채소류 생산량의 약 4%를 점유하고, 채소류 생산액의 약 30%를 차지하는 작물로서 농가 소득면에서 미국 다음으로 중요한 위치를 점하고 있다¹⁾. 생산량중 대부분은 수확후 농가에서 건조추로 건조되어 유통 소비되고 있으며 건조과정의 관리가 양질의 건조추를 생산하기 위한 중요한 요소의 하나이다. 고추의 수확은 8월초에서 10월초에 집중되며 단기간에 많은 양의 건조를 하여야 하는 점으로 인해 최근에 열풍건조기가 농가에 많이 보급되고 있다. 특히 고추의 생산이 주요산지 중심으로 단지화, 집단화되고 있으므로 열풍건조기의 도입은 계속 증가될 것으로 예측된다²⁾. 따라서 열풍건조기 사용에 따른 에너지소비의 절감과 양질의 고추생산을 위하여 적절한 운전조건의 제시가 요구된다.

건조공정에서의 에너지 사용의 효율성을 높이기 위해서는 에너지 사용 효율의 지표에 대한 정의가 필요하고,

이의 여러 공정변수에 대한 의존관계를 밝혀야 한다. 그리고 건조에 있어서 에너지 효율 뿐만 아니라 품질도 중요하므로 이와 같은 요소들의 종합적 검토가 필요하다. 따라서 적정품질이 유지되면서 에너지 사용 효율이 높은 최적조건으로 공정이 운영되어야 한다. 즉, 최적 건조조건을 찾고 이를 건조공정에서 제어할 수 있어야 한다. 이러한 조건들은 양질의 건조추를 생산하면서 에너지 소비를 최소화 할 수 있는 농가단위 고추건조기의 최적 운전조건이 되며 이러한 인자들은 건조기 운전에서 적절히 제어되어야 한다.

따라서 본 연구의 목적은 고추건조공정에 있어서 에너지 효율의 지표를 건조효율로 정의, 유도하고 적정 품질을 유지하면서 건조효율을 최대화시키는 최적 건조조건을 찾고, 에너지 절감을 위한 건조 종료시점을 결정하는데 있다.

재료 및 방법

고추의 건조과정 모델링

고추건조과정의 해석을 위해서는 고추건조과정을 simulation 하고 예측할 수 있는 건조 모델이 개발되어야 한다. 건조과정중 고추의 수분함량은 그 건조특성에 의해

Corresponding author: Dong-Sun Lee, Department of Food Engineering, Kyungnam University, 449 Wolyoung-dong, Masan 631-701, Korea

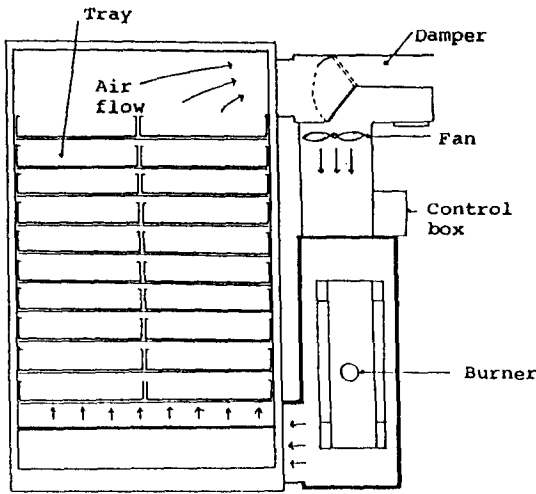


Fig. 1. Schematic diagram of a red pepper dryer

결정되므로 이를 수학적 모델로 표시하기 위하여 여러 방법이 제안되고 있다. 조 등⁽³⁾은 고추의 열풍건조특성을 연구하고 이를 모델링(modeling) 하였으며 그후 다시 여러 품종의 열풍건조에 적용될 수 있는 범용건조 모델을 개발하였다⁽⁴⁾. 금 등⁽⁵⁾은 조 등⁽⁴⁾의 건조 모델을 이용하여 고추건조기에서 진행되는 고정층건조를 simulation 하고 최적건조조건을 검토한 바 있다.

농가형 고추건조기의 구조는 제작회사에 따라 조금씩은 다르지만 대체적으로 Fig. 1과 같은 구조로 되어 있다. 건조기내에는 전체적으로 10개의 선반이 적재되고 열풍은 아래에서부터 고추층을 지나면서 고추를 건조하게 되고 최상층을 통과한 열풍은 일부가 배기되고 일부의 외기공기와 혼합되어 heater로 가열된 후 다시 건조실 하부로 인입되게 된다. 고추건조속도와 건조중 에너지 소비는 인입 열풍의 온도, 풍량, 열풍재순환율 등에 의해 영향을 받게 된다.

제안된 건조모델 중에서 고추건조를 simulation 할 수 있는 것으로는 조 등⁽⁴⁾이 제안한 고추의 범용건조 모델이 가장 보편적으로 이용가능한 것으로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 조 등⁽⁴⁾의 범용고추 모델을 고정층건조에 이용한 금 등⁽⁵⁾의 방법을 일부 수정하여 Fig. 1과 같은 고추건조기에서 Lee 등⁽¹²⁾에 의하여 분석된 조건과 같이 건조과정을 모델링하였다.

Bakker-Arkema 등⁽¹³⁾에 의하여 확립된 고정층을 통과하는 공기에 대한 에너지 및 물질수지에서 벽면으로의 에너지 손실을 고려하여 얻어진 식 (1)~(4)의 편미분 방정식을 유한차분법으로 풀었다. 조 등⁽⁴⁾의 모델에 의하면 고추의 건조속도는 다음 식 (4)에 의하여 표현된다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha(T - T_m)}{G_a C_a + G_a C_v H} - \frac{h_w A_w (T - T_{am})}{G_a C_a + G_a C_v H} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{ha(T - T_m)}{\rho_d C_p} - \frac{\lambda + C_v(T - T_m)}{\rho_d C_p} G_a \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

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

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{3D_e}{d^2} (M - M_e) \quad (4)$$

$$D_e = A M^B \quad (4-1)$$

$$A = 0.000041492(1 - RH) \exp(0.0405465 T_m) \quad (4-2)$$

$$B = 0.295258 + 0.00738769 T_m \quad (4-3)$$

$$d = 0.01898 + 0.02684M - 0.002270M^2 + 0.01186M m_b \quad (4-4)$$

여기서, a : 고추층의 비표면적(m²/m³)

A_w : 건조기 벽면의 면적(m²)

C_a : 건공기의 비열(kJ/kg·K)

C_v : 수증기의 비열(kJ/kg·K)

C_p : 고추기의 비열(kJ/kg·K)

G_a : 송풍공기의 질량유량(kg/m²·hr)

h : 고추층의 열전달계수(kJ/m²·K·hr)

h_w : 건조기 벽면의 열전달계수(kJ/m²·K·hr)

H : 절대습도(kg water/kg dry air)

x : 고추퇴적층의 높이(m)

M : 고추의 함수율(dec., d.b.)

M_e : 평형함수율(dec., d.b.)

t : 건조시간(hr)

D_e : 고추의 유효수분확산계수(cm²/hr)

A, B : 계수

d : 고추의 과피두께(cm)

T : 열풍의 온도(°C)

T_{am} : 외기공기의 온도(°C)

T_m : 고추의 온도(°C)

RH : 공기의 상대습도(dec)

m_b : 고추의 개체 건물중량(g)

ρ_d : 고추 건물의 산물밀도(kg/m³)

λ : 고추에서의 수분 증발잠열(kJ/kg)

위의 식 (4)에 의하여 열풍의 온도와 습도에 따른 각 고추층의 건조속도가 계산되며 이로부터 각 시간에 따른 고추층의 수분함량이 얻어지게 된다. 그리고 이러한 건조속도로부터 식 (3)에 의하여 고추층을 통과하는 열풍의 습도 증가가 계산되고 식 (1)에 의하여 고추층을 통과하는 열풍의 온도감소가 계산되게 된다.

식 (4)에 필요한 고추의 평형함수율 M_e는 조 등⁽⁴⁾에 의한 다음 식 (5)에 의한 관계식으로 나타내어진다.

$$M_e = -0.05959 \ln(-\ln(RH)) + C_1 \quad (5)$$

$$C_1 = 0.17711 - 0.000015051T^2 - 0.039181/m_b \quad (5-1)$$

고추퇴적층의 비표면적은 조 등⁽⁴⁾에 의해 보고된 고추 1개의 표면적에 대한 관계로부터 다음 (6)식으로 계산된다.

$$a = \frac{0.1\rho_d A_b}{m_b} \quad (6)$$

$$A_b = 3.74 + 23.62m_b - 1.76m_b^2 \quad (6-1)$$

여기서, A_b : 고추 1개의 표면적(cm^2)

열풍으로부터 고추로의 열전달계수는 금 등⁽⁵⁾이 이용한 식 (7)의 관계를 이용하였다.

$$h = 80.87v^{0.74} \quad (7)$$

여기서, v : 송풍공기의 유속(m/s)

고추로부터의 수분의 증발잠열 λ 는 조 등⁽⁴⁾에 의하면 다음 (8)식과 같다.

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} = 1 + (4.6033 - 2.1080/m_b) \exp(-16.78M) \quad (8)$$

여기서, λ_w : 자유수의 증발잠열(kJ/kg)

고추의 비열은 수분함량의 함수로 조 등⁽⁴⁾에 의하면 다음 식 (9)와 같다.

$$C_p = (1.441 + 4.187M)/(1 + M) \quad (9)$$

고추의 건조중 품질변화 모델

고추의 건조과정에서 색소 성분, 신미 성분, 비타민류 등의 여러가지 성분의 변화가 일어나는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁻¹¹⁾. 건조과정 동안 여러가지 성분변화 중에서도 건조고추의 상품성과 관련하여 색소 성분의 변화가 큰 관심의 대상이 되어 왔다^(6,10,11). Lee와 Kim⁽⁶⁾은 고추의 건조과정중 갈변현상과 carotenoids 파괴의 품질변화 모델을 제시한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 고추의 건조과정중 품질변화의 지표로서 고추의 색소성분인 carotenoids 파괴가 검토되었다. Carotenoids 파괴속도는 위의 건조모델에 의해 결정되는 고추의 수분함량과 온도에 의해 결정되며 이러한 관계는 Lee와 Kim⁽⁶⁾에 의해 확립된 관계를 초기 수분함량에 대해 normalized 하면 다음 (10)~(13)식으로 된다.

$$\frac{dC}{dt} = -k C \quad (10)$$

$$k = k_0 \exp(-E_{ac}/R T_s) \quad (11)$$

$$\ln k_0 = 4.1879 - 6.4621(M/M_0) + 35.9475(M/M_0)^2 \quad (12)$$

$$E_{ac} = 7698.3 - 2299.2(M/M_0) + 21062.0(M/M_0)^2 \quad (13)$$

여기서, C : carotenoids 함량(mg/kg dry soild)

- E_{ac} : 활성화에너지(cal/mol)
- k : 반응속도상수(min^{-1})
- k_0 : 빈도인자(min^{-1})
- M_0 : 초기수분함량(dec. 건물기준)
- R : 기체상수(1.987 cal/K·mol)
- T_s : 고추의 온도(K)

Lee와 Park⁽⁷⁾은 고추건조에서 carotenoids 색소보존의 최적화 조건은 갈변의 최소화 조건과 같아진다고 보고하고 있어서 carotenoids 파괴의 검토가 고추건조에 있어서의 전반적인 품질을 표현할 수 있는 것으로 생각된다.

건조과정에서의 에너지 사용효율지표로서의 건조효율

건조기 운전에 있어서 에너지 사용효율의 표현방법으로는 여러 연구자가 목적에 따라 여러 지표를 제시하고 있다. Ashworth⁽¹⁴⁾는 열풍건조에 있어서 증발에너지 효율은 투입에너지에 대하여 수분증발에 사용된 에너지의 비로 단순화시켜 나타낼 수 있는 것으로 제시하고 그의 표현방법을 유도하였다. Bakshi 등⁽¹⁵⁾도 곡물건조기에서 에너지 사용효율을 수분증발량에 대한 에너지 사용량의 비로서 표현한 바 있다. 이 외에도 여러 연구자에 의하여 에너지 사용개념의 정의가 다양하게 이루어지고 있다^(16,17).

위에서 언급한 바와 같이 식품건조에서의 에너지 사용의 효율성지표로서 여러가지가 제안되고 있지만, 현실적인 조건에서 측정가능하고 에너지효율을 정확히 표현하는 지표의 정립이 필요하다. 그리고 이는 건조공정의 최적화 등에 사용될 수 있는 것이어야 한다. 본 연구에서는 Ashworth⁽¹⁴⁾가 제안한 에너지효율의 정의인 식 (14)의 Eff_i이 건조과정중 에너지 사용효율을 평가하는데 비교적 간단히 사용될 수 있는 것으로 생각되어 이를 수정 개선하였다.

$$Eff_i = \frac{\pi_M^F - \pi^0}{\pi_M^F - \pi_H^F} \quad (14)$$

- 여기서, π_M^F : 외기공기의 mass transfer potential
즉, $(H_G^F - H_{WB})/(H_G^I - H_{WB})$
- π_H^F : 외기공기의 heat transfer potential
즉, $(T_G^F - T_{WB})/(T_G^I - T_{WB})$
- π^0 : 배기공기의 heat transfer potential이나 mass transfer potential
즉, $(H_G^0 - H_{WB})/(H_G^I - H_{WB})$ 이나 $(T_G^0 - T_{WB})/(T_G^I - T_{WB})$
- T_G^I : 건조기의 인입열풍의 온도
- T_G^0 : 건조기를 나오는 배기온도
- T_G^F : 외기공기의 온도
- T_{WB} : 건조기에서의 습구온도
- H_{WB} : 습구온도에서의 포화습도

Ashworth⁽¹⁴⁾가 제안한 에너지효율의 정의인 Eff_i는 건조과정을 단일건조로 가정하고 에너지효율의 계산에서

벽면으로 열손실을 무시하였으므로 실제의 건조과정에서의 에너지효율과는 약간 상이하게 되므로 이를 보정하였다. 즉, 벽면으로의 에너지손실에 의한 투입에너지에 대한 비율은 다음 식 (15)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{C_{PH}^O GA_c (T_G^{OP} - T_G^O)}{GA_c \{C_{PH}^I (T_G^I - T_G^O) + C_{PH}^F (1-r)(T_G^O - T_G^F)\}} \\ &= \frac{(\pi_H^{OP} - \pi_H^O) / (1 - \pi_H^O)}{1 + (\pi_H^O - \pi_H^F) / (\pi_M^F - \pi_M^O)} \\ &= \frac{(\pi_H^{OP} - \pi_H^O)}{(1 - \pi_H^O)} \times \frac{(\pi_M^F - \pi_M^O)}{(\pi_M^F - \pi_H^F)} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, T_G^{OP} : 단열건조로 가정되었을 때의 출구온도 (°C)

π_H^{OP} : 단열건조 가정시 출구공기의 heat transfer potential

$C_{PH}^I, C_{PH}^O, C_{PH}^F$: 외기, 인입열풍, 출구열풍의 비열(kJ/kg·°C)

A_c : 열풍이 통과하는 단면적(m²)

따라서 벽면으로의 에너지손실을 고려한 순수한 에너지 효율지표로의 건조효율은 Eff₁에서 ε 를 제하면 식 (16)과 같이 얻어지게 된다.

$$Eff = Eff_1 - \varepsilon \quad (16)$$

식 (14)~(17)로 나타나는 Eff는 인입열풍의 건구 및 습구온도, 배기공기의 건구 및 습구온도가 측정되면 psychrometric chart의 관계를 이용하여 계산이 가능하다. 여러 연구자들^{15, 18)}이 제안한 에너지 사용효율 지표들을 예비적으로 검토, 분석한 결과 Hodgett¹⁸⁾가 제안한 에너지효율의 개념인 방정식 (17)의 Eff₂가 단순하고 일반적으로 많이 사용되고 있어서 이와 Eff를 비교하였다.

$$Eff_2 = \frac{T_G^I - T_G^O}{T_G^I - T_G^O + (1-r)(T_G^O - T_G^F)} \quad (17)$$

여기서, r: 열풍의 재순환율

식 (16)으로 제안된 건조효율 Eff가 건조공정에서 에너지 사용효율을 표현할 수 있는지, 공정 최적화에 이용가능한 지를 평가하였고 그리고 Eff를 실제의 에너지 사용효율과 비교하기 위해 건조중 투입에너지에 대하여 증발에 사용된 에너지의 비인 실제의 증발에너지 효율 즉, Eff₃를 식 (18)로 표현하고 simulation된 건조과정 및 실제의 건조과정에서 Eff 및 Eff₂와 비교하였다.

$$Eff_3 = \frac{\lambda(dM/dt)\rho_a V}{(dE/dt)} \quad (18)$$

여기서, M_1 : 건조후의 평균수분함량(dec., d.b.)

V: 식물의 부피

E: 건조에 투입된 에너지

수분의 증발잠열 λ 는 식 (8)로부터 계산되어진다. 시간에 따른 수분함량의 변화(dM/dt)는 수분함량 변화의 측정 data를 Leduy와 Zajic⁽¹⁹⁾의 방법에 따라 미분하여 얻었다.

식 (18)에서 건조기에 투입되는 에너지 (dE/dt)는 송풍공기에 대한 에너지 수치식인 다음 식 (19)에 의하여 계산된다.

$$\frac{dE}{dt} = G_a (T_G^I - T_{mix}) C_{pmix} \quad (19)$$

여기서, T_{mix} : 배기공기와 외부공기가 혼합되어 가열된 기전 공기의 온도

C_{pmix} : 혼합공기의 비열

T_{mix}, C_{pmix} 는 배기공기온도와 외부공기의 재순환율에 의해 결정되며 위의 모든 계산과정에 필요한 공기의 모든 특성은 psychrometric chart의 특성을 수학적관계로 정립한 관계식⁽²⁰⁾을 이용하였다.

공정변수가 건조효율에 미치는 영향

검토된 고추건조 중의 건조효율에 미치는 건조공정에서의 제어변수의 영향을 검토하기 위하여 평균건조효율을 다음 식 (20)과 같이 정의하고 열풍온도, 열풍재순환율, 풍량 등의 제어변수의 여러 조합에 따라 비교하였다. 즉 건조시간에 따라 에너지 사용지표가 변할 수 있기 때문에 공정제어변수의 영향은 건조 전과정에 대하여 평가되어야 하므로 평균건조효율 EFF를 건조조건의 함수로서 평가, 검토하였다.

$$EFF = \frac{\int Eff(-dm/dt)dt}{\int (-dm/dt)dt} \quad (20)$$

그리고 건조효율의 최대화를 위한 목적함수로서 EFF를 사용하여 여러 제한조건하에서 건조공정의 최적화를 Fig.2와 같은 algorithm에 의하여 수행하였다. 현실적인 조건에서의 고추건조는 Lee 등⁽¹²⁾에 의하여 검토된 바와 같이 품질조건을 고려한 상황에서 에너지 소비나 건조시간 등의 여러 변수를 고려함이 타당한 것으로 평가되며 에너지 소비의 절감을 위해서는 건조에 있어서의 에너지효율의 평가방법이 확립되어야 한다. 열풍온도, 열풍 재순환율, 풍량 등의 공정제어변수로서 최적조건을 complex method⁽²¹⁾에 의하여 찾았다. Lee 등⁽¹²⁾이 고추의 고정충진조에 있어서 2단계 건조가 같은 품질제한 조건하에서 에너지소비를 절감시킬 수 있는 것으로 보고한 바 있으므로 1단계 건조 및 2단계 건조의 최적화를 수행하고 이를 비교하였다. 이러한 과정에서 원료의 조건은 일반적인 고추의 조건인 수분함량 4.00 (건물기준), 고추 개체당 건물무게 2.0g, 습물밀도 350 kg/m³, 초기온도 25C 로 가정하였고, 외기의 대기조건은 Lee 등⁽¹²⁾이 사용한 서울지역 8월 평균치인 24.4°C, 습도 85%의 조건에서 건조되는 것으로 가정하였다.

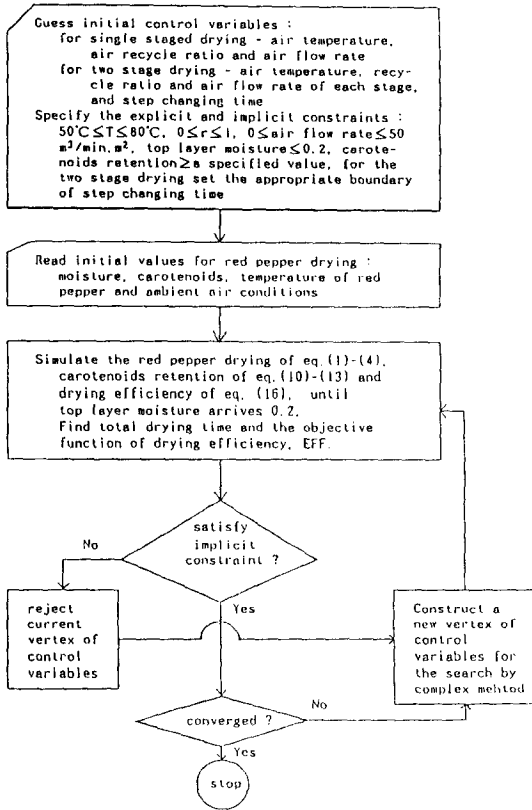


Fig. 2. Red pepper drying optimization algorithm

건조시간제어에 의한 에너지소비 절감

에너지효율의 제고를 위한 공정변수의 최저과와는 달리 실제로 이러한 최적 운전조건을 현실적으로 어떻게 제어하며 달성할 수 있는 것인가가 또 다른 하나의 큰 문제이다. 공정운영의 제어에 의해서 에너지소비를 절감시키기 위해서 Shinsky⁽²²⁾, Fadum 등⁽²³⁾과 Badavas⁽²⁴⁾는 최종제품의 수분함량의 제어방법을 제시하고 있다. Merritt⁽²⁵⁾는 에너지 소비절감을 위한 방법으로서 배기공기의 습도제어방법을 제시하고 있다. Brown 등⁽²⁶⁾은 옥수수 건조기의 simulation 모델에 의하여 건조시간의 자동제어가 가능함을 보여주었다.

식품건조공정의 운영에서는 최종 목표수분함량에 도달될 때까지 건조하여야 하고 필요 이상의 과건조를 막기 위한 방안이 마련되어야 한다. 제시되는 대부분의 제어 방법은 배기공기의 온도를 측정관리함으로써 과건조를 방지하는데 초점을 두고 있으며⁽²²⁻²⁴⁾ 본 연구에서도 이러한 방법을 이용하여 최상층의 수분함량과 측정 배기 공기온도의 변환변수사이의 관계를 식 (21)에 따라 표현하고자 하였다.

$$M_T = a_1 Q + b_1 \tag{21}$$

여기서, M_T 는 최상부 고정층의 수분함량을 나타내고,

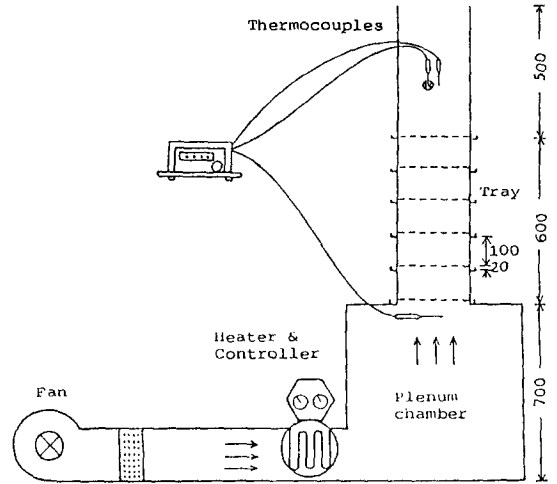


Fig. 3. An experimental red pepper dryer

Table 1. Specification of experimental drying equipment

Item	Specification
Drying tray	400×400×120(mm ³)×5
Plenum chamber	820×600×700(mm ³)
Motor	0.75 kW
Heater	1 kW
Fan	Centrifugal type

Q 는 공정중 배기열풍온도를 이용한 여러 변수이며, a_1 , b_1 은 상수이다. Simulation된 건조과정 및 건조실험의 과정에서 배기열풍의 온도를 사용한 여러 변수에 대해서 식 (21)의 회귀관계를 검토하였다.

건조실험장치 및 건조실험

고추건조공정에 있어서 건조효율의 simulation 및 측정을 위하여 Fig.3과 같이 고추건조기를 제작하여 설치하고 고추를 건조하였다. 고추로는 수원지방에서 채배하여 수확한 다복과 홍일 2가지 품종을 시장에서 구입하여 사용하였다.

고추채배농가에서 실제 사용되는 Fig.1과 같은 고추건조기는 실험에 소요되는 고추의 양이 많고 풍량이나 열풍재순환율 등의 제어나 측정이 어려우므로 본 연구에서는 소량의 시료로서 간편하게 실제건조기에서의 건조과정을 표현할 수 있는 실험용 건조장치(Fig.3)를 이용하여 실험에 사용하였다. 이 건조기는 건조중 시간별 함유율을 측정하기 위하여 선반을 분리 가능하도록 제작하였다. 건조기의 구성은 송풍기, 송풍량측정 덕트, 전열기, plenum 및 건조상자로 되어있다. 실험장치의 사양은 Table 1과 같다.

건조실험은 주어진 조건에서 건조하면서 시간에 따른 고추의 무게변화와 함께 열풍 인입구 및 출구의 온도를

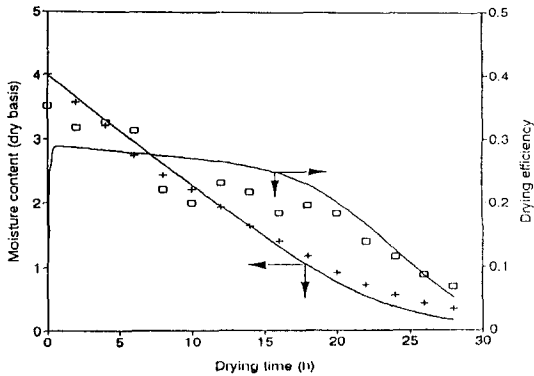


Fig. 4. Simulation of red pepper drying process in the experimental dryer under drying conditions of 55°C, recycle 0 and air flow 11.9 m³/min·m² (m_b: 1.96)
 —; simulated moisture, +; experimental moisture,
 - - -; simulated Eff₃, □; experimental Eff₃

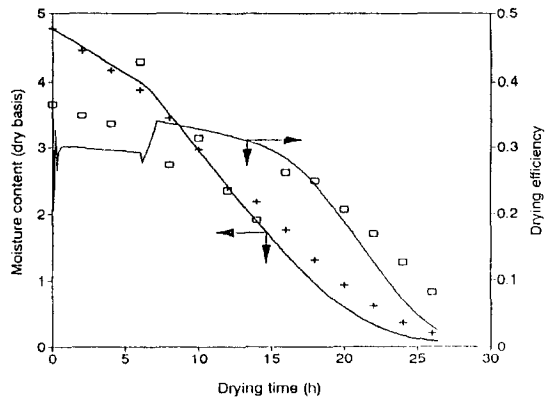


Fig. 5. Simulation of red pepper drying process having step change of temperature from 72°C to 50°C at 6 hour drying time with same drying conditions of Fig. 4 (m_b: 1.87)
 —; simulated moisture, +; experimental moisture,
 - - -; simulated Eff₃, □; experimental Eff₃

측정하면서 실시하였다. 수분함량 결정을 위한 고추층의 무게는 5개 건조상자를 2시간마다 분리하여 측정하였다. 풍량 및 온도가 조절된 상태에서 고추를 건조하면서 위에서 확립된 건조효율을 측정하고 simulation된 건조효율과 비교하였다.

건조과정 동안 일정한 시간 간격으로 외기의 건구 및 습구온도, 인입공기온도와 배기공기의 건구 및 습구온도를 동-콘스탄탄 열전대(Eilab CTD.85)을 사용하여 측정하였다. 건조된 시료의 수분함량 측정은 조 등⁽⁴⁾의 방법에 준하여 상압건조법으로 실시하였는데 105°C에서 24시간 동안 가열한 후 데시케이터 속에 넣어 실온과 평형을 이루게한 후 무게를 측정하였다. 고추개체당 무게의 측정도 시료중 임의로 15개의 고추를 같은 방법으로 건조하여 측정하였다.

결과 및 고찰

건조과정의 simulation과 건조효율

식 (1)~(4)로서 확립된 고추건조의 모델에 의하여 고추건조의 전체과정에서의 수분함량을 simulation 할 수 있는 것으로 나타나고 simulation에 의한 건조효율 Eff는 시간에 따른 수분함량의 변화 data로부터 계산된 증발에너지 효율 Eff₃와 비교적 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다(Fig. 4, 5). Eff와 Eff₃는 시간에 따라 어느 정도의 차이를 보여주는 경우도 있지만 이는 Eff₃ 계산에서 수분함량 data의 시간에 대한 미분값을 이용함에 따른 오차의 증폭에 의한 것으로 보인다. 그러나 건조과정 전체를 두고 볼때 simulation에 의하여 얻어진 건조효율 Eff는 건조과정에서의 증발에너지 효율의 변화를 잘 표현하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 열풍의 인입온도 및 출구온도의 측정치로부터 얻어진 하나의 에너지 사용효율의 개념인 Eff₂도 Eff와 비교했을 때 비교적

근사한 범위의 값을 보이나 약간 높게 나타났으며 (data는 생략) 이는 Eff₂의 계산에서 벽면에 의한 열손실과 같이 실험과정에서 발생하는 에너지 손실 등으로 인한 열풍의 온도감소도 증발에 사용되지 않았지만 에너지효율로 계산됨에 기인하는 것으로 생각된다.

식 (16)로 정의되는 에너지 사용효율인 건조효율 Eff는 건조과정중 건조모델에 의하여 simulation이 가능하고 건조과정중 인입열풍의 건구온도 및 습구온도, 배기공기의 건구 및 습구온도를 측정하면 공정에서 on-line으로 계측이 가능한 것으로 판단된다. 이는 건조과정중 에너지 사용효율에 대한 즉각적인 평가를 쉽게 가능하게 하며 이로 인해 에너지효율 향상을 위한 운전과 제어를 이룰 수가 있을 것이다.

건조실험에서는 시간에 따라 무게측정을 하면서 동시에 열풍의 건구 및 습구온도의 정확한 측정이 불가능하며 Fig. 1과 같은 농가형 고추건조기에서의 건조를 simulation함으로써 건조시간에 따른 Eff의 동적변화를 살펴보고자 하였다. 식 (16)으로 정의된 건조효율 Eff의 건조시간에 따른 변화를 Fig. 6과 7에서 보여주고 있다. Eff는 건조중 투입에너지에 대한 증발에 사용된 에너지의 비인 실제의 증발에너지 효율 Eff₃와 비교적 전체 건조과정에서 잘 일치하고 있어서 에너지 사용효율의 지표로서 건조효율을 표현하는데 적당한 것으로 나타나고 있다. 상대적으로 실험용 건조장치에 비하여 벽면으로의 에너지 손실이 많은 이유로 인해 식 (17)의 Eff₂는 건조효율의 표현에 오차를 보여주고 있다. Eff₂은 증발에너지와 현열에너지 사용을 포함한 에너지 효율로서 열손실 등으로 인한 열풍의 온도감소도 에너지 효율이나 건조효율에 포함되어 표현되는 한계를 지니고 있다. 따라서 이는 단열이 충분하고 열풍의 유출손실이 없는 건조기의

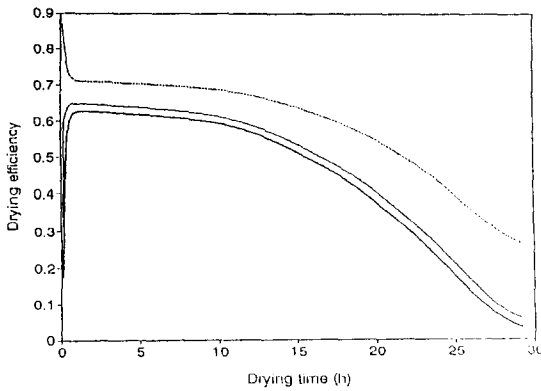


Fig. 6. Drying efficiency during drying of red peppers under drying conditions of 70°C, recycle ratio 0.6 and air flow rate 20.0 m³/min.m²
 —; Eff, —; Eff₁,; Eff₂

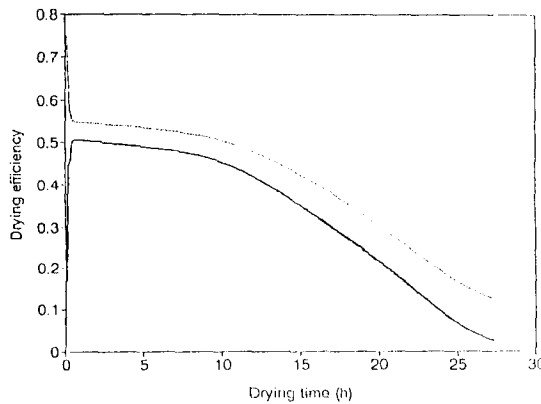


Fig. 7. Drying efficiency during drying of red peppers under drying conditions of 70°C, recycle ratio 0 and air flow rate 20.0 m³/min.m²
 —; Eff, —; Eff₁,; Eff₂

경우에만 적용될 수 있는 에너지 사용효율이나 건조효율의 개념으로 평가되어야 할 것으로 생각된다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 Eff가 건조중의 에너지 사용효율을 정확히 나타낼 수 있는 것으로 평가되고 본 연구에서는 이를 에너지 사용효율이나 건조효율의 지표로 사용하였다. 이 외에도 Bakshi 등¹⁵⁾이 제시한 에너지 사용지표와 다른 지표 등이^{16,17)} 비교되었지만 실제의 에너지 사용효율을 나타내는 데에는 적합치 못한 것으로 나타났다.

건조가 진행됨에 따라 에너지 사용효율, 즉 건조효율이 낮음은(Fig. 4~7) 수분함량의 함수로서 건조효율을 나타낸 Fig. 8로써 설명될 수 있다. 감율건조로 이루어지는 고추건조에 있어서 건조말기로 가면서 건조속도가 낮아지고 이로 인해 건조효율이 낮아짐을 보여주고 있다. 그리고 수분함량이 낮아지는 건조말기에 건조효율이 나

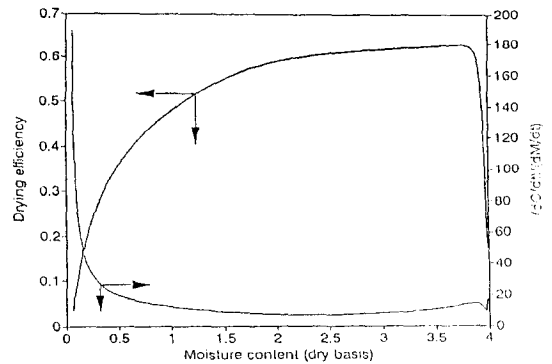


Fig. 8. Drying efficiency and (dC/dt)/(dM/dt) as a function of moisture content of red peppers under the conditions of Fig. 6
 —; Eff,; (dC/dt)/(dM/dt)

빠질 뿐만 아니라 수분함량 감소속도에 대한 carotenoids의 파괴속도가 상대적으로 높아지고 있어서 품질면에서도 건조말기의 공정관리가 중요함을 보여주고 있다(Fig. 8).

건조효율의 분석 및 최적건조조건

고추건조 중의 에너지 사용효율에 미치는 건조공정에서의 제어변수의 영향을 검토하기 위하여 평균건조효율을 식 (20)에 의하여 구하고 열풍온도, 열풍재순환율, 풍량 등의 조합에 따라 비교, 분석하였다.

풍량이나 열풍재순환율이 고정되었을 때 건조온도가 고추건조에 미치는 영향은 Fig. 9에 잘 나타난다. 높은 건조온도는 건조시간을 단축시키고 carotenoids 보존량을 감소시키고 건조효율은 증가시킨다. 반면에 열풍재순환율이 증가할수록 건조효율은 증가하나 건조시간이 늘어나고 carotenoids 보존함량이 감소하고 있다(Fig. 10). 풍량이 증가하면 건조시간은 단축되나 건조효율은 감소하고 carotenoids 보존은 증가하고 있다(Fig. 11). 건조중 건조효율만을 고려한다면 현실적인 제한조건의 범위에서 높은 건조온도에서 높은 열풍재순환율과 저풍량의 조건에서 건조하는 것이 좋지만 carotenoids 보존과 같은 품질제한조건을 고려하여야 하고 이로 인해 건조의 최적화는 단순하지 않은 문제로 부각된다.

또한 Fig. 4~7에서 보는 바와 같이 건조효율은 건조진행과정에 따라 달라지며 건조말기에 현격히 떨어지고 있다. 이는 건조말기의 낮은 수분함량에서는 건조속도가 현저히 낮아짐에 기인한 것으로 생각되고 이는 Fig. 8에 의하여 확인된 바 있다. 따라서 Lee 등¹²⁾에 의해서 확인된 바와 같이 2단계 건조에서 적절한 제어변수의 선택에 의하여 건조말기의 건조효율을 향상시킬 수 있다면 바람직한 고추건조의 지침을 제공할 수 있을 것이다. 식 (20)으로 확립된 건조효율의 지표를 사용하여 Fig. 2의 algorithm에 의하여 이를 검토하였다. Table 2에서는

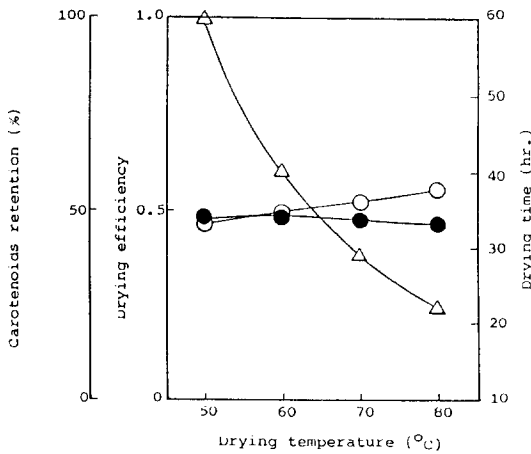


Fig. 9. Effect of drying temperature on drying efficiency and dependent variables under the conditions of recycle ratio 0.6 and air flow 20.0 m³/min.m²
 ○—○; drying efficiency, ●—●; carotenoids retention, △—△; drying time

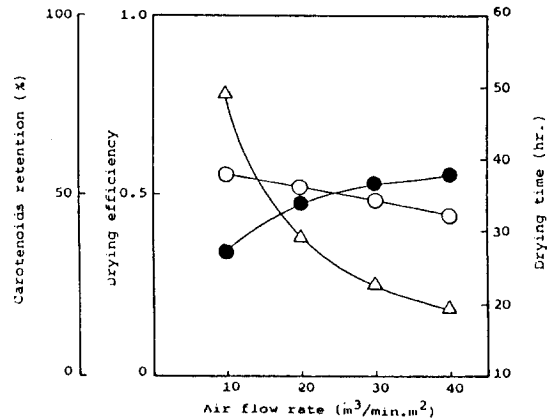


Fig. 11. Effect of air flow rate on drying efficiency and dependent variables under the conditions of air temperature 70°C and recycle ratio 0.6
 ○—○; drying efficiency, ●—●; carotenoids retention, △—△; drying time

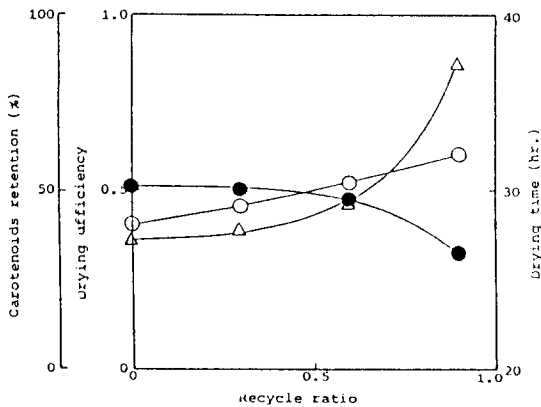


Fig. 10. Effect of recycle ratio on drying efficiency and dependent variables under the conditions of drying temperature of 70°C and air flow 20.0 m³/min.m²
 ○—○; drying efficiency, ●—●; carotenoids retention, △—△; drying time

품질제한조건을 만족시키면서 에너지소비를 최소화하는 2단계 고추건조의 최적화결과를 보여주고 있다. 2단계 건조는 같은 품질제한조건에서의 1단계 최적건조조건 (건조온도 79.1°C, 열풍재순환율 0.847, 풍량 48.8 m³/min.m²)에서의 건조시간 14.4시간일 때 건조효율 0.598에 비해서 높은 건조효율 0.634을 얻을 수 있었다. 품질제한조건을 만족시키면서 건조효율을 최대화하기 위해서는 건조초기에 저풍량에서 낮은 건조온도로 건조하고, 2단계 건조에서 고풍량에서 고온으로 건조하여야 하는 것으로 나타난다. 열풍재순환율은 큰 변화는 없으나 1단계보다 2단계에서 약간 높아지고 있다. 이러한 최적

Table 2. Optimal two staged drying conditions satisfying quality constraint¹⁾

Control variables	1st stage	2nd stage
Air temperature(°C)	56.2	79.9
Recycle ratio	0.789	0.914
Air flow rate(m ³ /min.m ²)	31.9	49.5

¹⁾Total drying time: 17.5 hr., Stage changing time: 3.8 hr., Carotenoids retention constraint: 51%, Attained energy efficiency: 0.634

건조조건은 앞에서 살펴본 각 제어변수가 건조효율, 소요건조시간, carotenoids 보존에 미치는 영향(Fig. 9~11)과 함께 건조중 수분함량에 따른 건조효율의 변화의 영향(Fig. 4~8)으로 인하여 건조효율이 낮은 건조 후반부인 두번째 단계에서 건조효율을 증가시키면서도 carotenoids 파괴를 억제하면서 건조속도를 빠르게 하기 위하여 고풍량, 고온의 건조조건이 이용되는 것으로 보인다. 열풍재순환율은 건조효율에 전체적으로 영향을 주는 것으로 전체 건조과정에서 최적값에 가깝게 큰 변화없이 유지되어야 하는 것으로 판단된다. 이러한 최적화 결과는 고추건조의 효율적인 운영을 위한 지침으로서 이용될 수 있을 것이다. 즉, 고추의 건조는 초기에 저온, 저풍량에서 적당한 재순환으로 건조되다가 후기에 고온, 고풍량으로 바꾸어 건조함이 효과적인 것으로 제시된다. 열풍재순환의 범위는 고추의 초기조건, 외기환경, 품질제한조건에 따라 달라질 것이며 후기에 약간 증가될 수 있는 것으로 보인다.

1단계 및 2단계의 최적건조조건에서 여러 상태변수의 변화를 비교하면 2단계 최적건조의 경우 건조초기에 수분함량의 감소속도가 1단계 건조에 비해 상대적으로 약간 낮아지고 carotenoids 파괴를 비교적 억제하다가

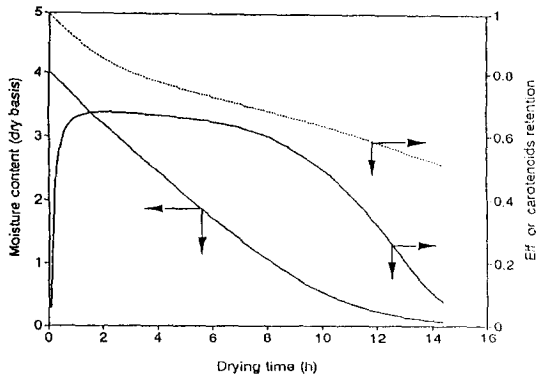


Fig. 12. Change of state variables and drying efficiency through the optimal single stage red pepper drying of 79.1°C, recycle ratio 0.847 and air flow rate 43.8 m³/min.m²

—; moisture content, ·····; carotenoids retention, - - -; Eff

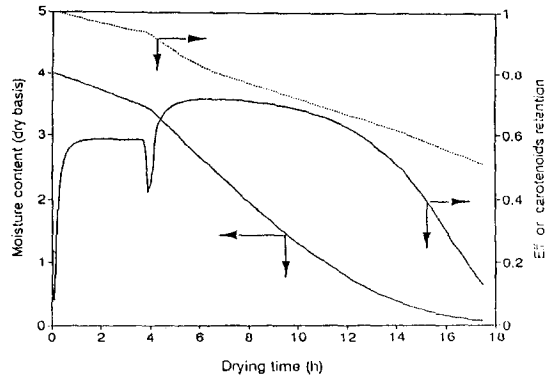


Fig. 13. Change of state variables and drying efficiency through the optimal two stage red pepper drying of Table 2

—; moisture content, ·····; carotenoids retention, - - -; Eff

Table 3. Linearity of equation (21) between top layer moisture and several converted variables for simulated red pepper drying under different drying conditions

Converted variable	Drying conditions		r ²	a ₁	b ₁	
	Recycle	Air temperature(°C)				
$(T_G^1 - T_{wb}) / (T_G^0 - T_{wb})$	0.0	50	1.000	3.535	-3.870	
		60	1.000	3.532	-3.919	
		70	1.000	3.490	-3.928	
		80	1.000	3.436	-3.928	
	0.6	50	1.000	3.513	-3.851	
		60	1.000	3.530	-3.925	
		70	1.000	3.511	-3.963	
		80	1.000	3.459	-3.965	
	$\ln(T_G^1 - T_{wb}) / (T_G^0 - T_{wb})$	0.0	50	1.000	4.188	-0.390
			60	1.000	4.235	-0.452
			70	1.000	4.245	-0.513
			80	1.000	4.247	-0.580
0.6		50	1.000	4.166	-0.394	
		60	1.000	4.244	-0.462	
		70	1.000	4.285	-0.530	
		80	1.000	4.283	-0.596	
$(T_G^0 - T_{wb})$		0.0	50	0.999	-0.234	4.506
			60	1.000	-0.175	4.553
			70	0.999	-0.139	4.561
			80	0.999	-0.116	4.565
	0.6	50	0.999	-0.186	3.583	
		60	0.999	-0.142	3.697	
		70	0.999	-0.115	3.777	
		80	1.000	-0.097	3.818	
	$(T_G^1 - T_G^0)$	0.0	50	0.999	-0.234	4.506
			60	1.000	-0.175	4.553
			70	0.999	-0.139	4.561
			80	0.999	-0.116	4.565
0.6		50	0.999	-0.186	3.583	
		60	0.999	-0.142	3.697	
		70	0.999	-0.115	3.777	
		80	1.000	-0.097	3.818	

Table 4. Linearity of equation (21) between top layer moisture and a converted variable for simulated red pepper drying of different pepper conditions at 70°C and zero recycle ratio

Converted variable	Red pepper		r ²	a ₁	b ₁
	Initial moisture(dry basis)	Bone dry weight(g)			
(T _G ¹ -T _{wb})/(T _G ⁰ -T _{wb})	3.5	1.0	1.000	2.611	-2.947
		2.0	1.000	2.938	-3.305
		3.0	1.000	3.312	-3.721
	4.0	1.0	1.000	3.079	-3.477
		2.0	1.000	3.490	-3.928
		3.0	1.000	3.963	-4.456
	4.5	1.0	1.000	3.557	-4.016
		2.0	1.000	4.052	-4.561
		3.0	1.000	4.629	-5.204

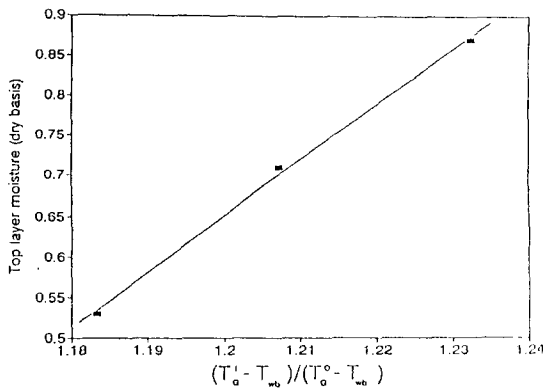


Fig. 14. Observed linearity of equation (21) during experimental red pepper drying of Fig. 4 (r²=0.98, a₁=6.921, b₁=-7.655)

■; experimental data, —; regression line

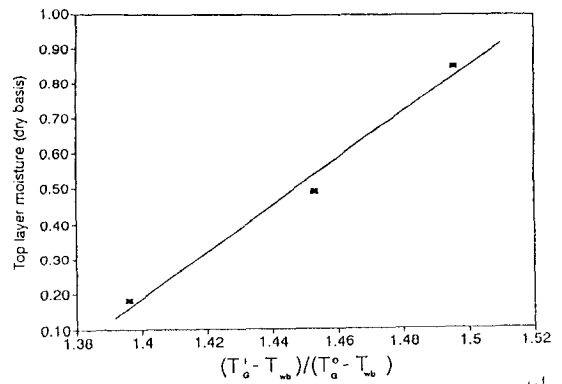


Fig. 15. Observed linearity of equation (21) during experimental red pepper drying of Fig. 5 (r²=0.984, a₁=6.649, b₁=-9.124)

■; experimental data, —; regression line

건조중 후반부에서 수분함량의 많은 감소가 이루어지고 있다(Fig. 12, 13). 2단계 최적건조에서는 건조의 중후반부까지 높은 건조효율을 유지시켜 주고 있다. Carotenoids 파괴와 건조효율의 수분의존성(Fig. 8)으로 인해 carotenoids 보존의 제한조건을 만족시키면서 건조효율의 증가를 이룩하기 위하여 시간에 따른 제어변수의 변화가 이러한 상태함수의 변화를 유도시키게 되는 것으로 생각된다.

건조제품의 수분함량 제어를 위한 변수간의 회귀관계

에너지 사용효율을 증가시키는 또 다른 하나의 방법이 과건조를 방지하여 건조를 적절한 시간에서 끝내는 것이다. 이를 위해서는 건조의 최종점을 자동적으로 제어하고 제품의 수분함량이 일정한 제품을 얻어야 한다. 수분함량이 일정한 제품을 얻을 수 있는 공정의 제어를 위해서는 측정 가능한 공정변수를 확립하여야 한다. 이를 위해 Table 3에서 Fig. 1과 같은 건조기에서 simulation된 고추건조에서 식 (21)에 따라 여러 온도변환변수와 0.5

~0.1범위의 최상층 수분함량과의 사이에 얻어진 직선적 회귀관계를 검토하였다. 배기공기의 온도를 포함한 여러 변환변수와 최상층의 수분함량은 좋은 직선적인 회귀관계를 보여주고 있으며 고추의 초기조건 일정하면 (T_G¹-T_{wb})/(T_G⁰-T_{wb})는 최상층 수분함량 사이에서 직선적 회귀관계가 성립하고 건조조건이 달라도 a₁, b₂값이 비슷하였다. 따라서 식 (21)의 Q로서 (T_G¹-T_{wb})/(T_G⁰-T_{wb})를 선택하여 고추의 원료조건이 다른 경우의 회귀관계를 검토한 결과는 Table 4에서 보여주고 있다. 고추의 원료조건이 달라지면 식 (21)의 회귀관계를 나타내는 a₁, b₁값이 달라지고 있어서 (T_G¹-T_{wb})/(T_G⁰-T_{wb})와 M₁사이의 관계는 원료조건이 일정한 경우는 일정한 하나의 값으로 사용될 수 있으나 원료조건이 달라지면 그때마다 a₁, b₁이 새로이 결정되어야 함을 보여주고 있다.

Fig. 14와 15에서는 각각 Fig. 4 및 5의 실험조건에서 건조말기에 최상층 수분함량과 (T_G¹-T_{wb})/(T_G⁰-T_{wb}) 사이에 얻어진 회귀관계를 보여주고 있다. 전체적으로

직선적 회귀관계는 높은 결정계수(r^2)로 나타나듯이 아주 양호하다. 다만 회귀방정식 식 (21)에서의 a_1 , b_1 값들은 실험조건에 대하여 건조 simulation으로부터 얻어진 값(Fig. 14의 경우 $a_1=4.235$, $b_1=-4.461$; Fig. 15의 경우 $a_1=4.602$, $b_1=-4.901$)과 어느 정도의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 건조 simulation 모델이 갖는 오차에도 원인이 있을 수 있다. 특히 건조말기의 수분함량 simulation에서의 약간의 오차도 식 (21)의 회귀관계에 민감한 영향을 끼치며 a_1 , b_1 값들을 변화시킬 수 있으므로, 이의 개선에 대해서는 보다 더 깊은 연구가 필요한 것으로 생각된다. 특히 Fig. 4와 5에서 보이는 바와 같이 제안된 simulation model이 비교적 건조 전과정을 잘 표현 예측하고 있으나 건조 말기에 약간의 오차를 보여주고 있으므로 이러한 것이 a_1 , b_1 값의 결정에 영향을 줄 수 있으므로 이를 보정하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 다만 건조조건이 다르면서도 원료조건이 비슷한 Fig. 14와 15의 경우에서 a_1 , b_1 값이 비교적 비슷한 값을 보이고 있음은 현실적인 건조조건에서 원료조건이 일정하다면 실험적인 방법에 의해 보편적으로 적용되는 매개변수 a_1 , b_1 을 결정하여 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 배기공기의 온도를 측정 관리하면서 식 (21)의 관계를 이용하여 고추가 원하는 수분함량에 도달하면 건조를 종료할 수 있을 것으로 생각된다.

결론적으로 본 연구에서는 고추건조기에서의 건조과정을 모델링하고 건조과정에서 에너지 사용효율을 나타내는 건조효율을 유도 정의하고 이를 이용하여 carotenoids 보존 제한조건하에서 고추건조조건을 최적화 하였다. 그리고 공정운영에서 과건조를 방지하기 위한 건조종료 algorithm을 검토하였다. 건조공정에서 에너지 사용효율을 나타내는 지표로서의 제시된 건조효율의 개념은 식품건조의 에너지 효율향상을 위해 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또 얻어진 최적건조조건과 건조 종료 방법은 고추건조에서 에너지 소비절감을 위한 제어시스템의 구축에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

고추건조에 대한 에너지사용의 효율성을 표현할 수 있는 건조효율 지표를 유도하고 정의하였으며 건조효율에 미치는 공정변수의 영향을 분석하고 carotenoids 보존의 제한조건하에서 건조효율을 최대화시키는 최적건조조건을 찾았다. 전체 사용에너지에 대한 증발에너지의 비로 단순화시켜서 열풍의 건구 및 습구온도의 함수로 표현된 건조효율이 건조공정중 실제의 에너지 사용의 효율성을 표현할 수 있는 것으로 확인되었고, 이를 이용하여 주어진 조건에서의 최적화가 가능하였다. 최적화 결과 1단계 건조에 비해서 2단계 건조가 같은 품질제한 조건하에서 건조효율을 증가시킬 수 있었다. 한편 배기 공기 온도를 포함하는 간단한 변환변수와 건조되는 고추의 수분함량 사이의 관계에 의하여 건조시간 종료할

제어할 수 있는 가능성도 검토되었다. 전체적으로 본 연구에서 고추 건조시 좋은 품질을 유지하면서 건조효율을 향상시키고 에너지소비를 절감할 수 있는 건조기 운전의 방향을 제시하였다.

감사의 말

이 연구는 한국과학재단 연구비 지원(과제번호: 893-1508-002-2)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

문 헌

1. 한국 농기구 협동조합: 농업기계연감, p.75(1991)
2. 고훈균, 노상하, 조용진: 농산물건조기의 수요추정에 관한 조사 연구-고추 및 엽연조를 중심으로. 한국농업기계학회지, 13, 51(1988)
3. 조용진, 고훈균: 고추의 건조특성과 건조모델에 관한 연구. 한국농업기계학회지, 11, 52(1986)
4. 조용진, 고훈균, 박재복: 고추의 범용건조모형 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회지, 16, 60(1991)
5. 김동혁, 최창현, 김수연: 고추건조기의 개발에 관한 연구-시뮬레이션 및 최적화. 한국농업기계학회지, 16, 248(1991)
6. Lee, D.S. and Kim, H.K.: Carotenoid destruction and nonenzymatic browning during red pepper drying as functions of average moisture content and temperature. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 21, 425(1989)
7. Lee, D.S. and Park, M.H.: Quality optimization in red pepper drying. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 21, 655(1989)
8. 박춘란: 고추의 건조방법에 따른 성분변화에 관한 연구: 제 1보 Carotenoids, Capsaicin, Vitamin C의 변화. 한국영양학회지, 8, 27(1975)
9. 박춘란, 이강자: 고추의 건조방법에 따른 성분변화에 관한 연구: 제 2보 Free amino acid 및 Free sugar의 변화. 한국영양학회지, 8, 33(1975)
10. 김광환, 전재근: 고추의 열풍건조가 품질에 미치는 영향. 한국식품과학회지, 7, 69(1975)
11. Lease, J.G. and Lease, E.J.: Effect of drying conditions on initial color, color retention, and pungency of red peppers. *Food Technol.*, 16, 104(1962)
12. Lee, D.S., Keum, D.H., Park, N.H. and Park, M.H.: Optimum drying conditions of on-farm red pepper dryer. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 21, 676(1989)
13. Bakker-Arkema, F.W., Lerew, L.E., Boer, S.F. and Roth, M.C.: *Grain dryer simulation*, Michigan State University (1974)
14. Ashworth, J.C.: Energy efficiency of convection solids dryers in *Energy for industry*, O'Callaghan, P.W. (ed.) Pergman Press, p.349(1979)
15. Bakshi, A.S., Singh, R.P., Wang, C.Y. and Steffe, J.F.: Energy costs of a conventional and air recycling flow rice dryer. *ASAE paper* No.78-3011(1978)
16. Bahu, R.E., Baker, C.G.J. and Reay, D.: Energy balances on industrial dryers-a route to fuel conservation. *J. Separ. Proc. Tec.*, 4, 23(1983)
17. Chow, D.K.: Conditions for minimizing energy consumption while drying paper. *Tappi J.*, 65, 130(1982)

18. Hodgett, D.L.: Efficient drying using heat pumps. *Chemical Engineer*, 4, 510(1976)
19. Leduy, A and Zajic, J.E.: A geometrical approach for differentiation of an experimental function at a point: Applied to growth and product formation, *Biotechnology and Bioengineering*, 15, 805(1973)
20. ASAE: Agricultural engineers handbook. *American Society of Agricultural Engineering*, p.341(1979)
21. Saguy, I.: Optimization of dynamic systems utilizing the maximum principle. in *Computer-aided techniques in food technology*, Saguy I. (ed.) p.321(1983)
22. Shinskey, F.G.: Energy conservation through control. Academic Press, New York, p.211(1978)
23. Fadum, O. and Shinskey, G.: Saving energy through better control of continuous and batch dryers. *Control Engineering*, 30, 69(1980)
24. Badavas, P.C.: Feedforward methods for process control systems. *Chemical Engineering*, 91, 103(1984)
25. Merritt, D.S.: Energy savings by dryer exhaust control. *American Dyestuff Reporter*, 71, 26(1982)
26. Brown, R.B., Otton, L. and Brubaker, J.E.: Automatic timer control for a batch-in-bin dryer. *Canadian Agricultural Engineering*, 29, 179(1987)

(1992년 6월 9일 접수)