

고추 乾燥機의 開發에 관한 研究*

—시뮬레이션 및 최적화—

Development of Red Pepper Dryer

—Simulation and Optimization—

금 동 혁⁺, 최 창 현⁺, 김 수 연⁺
D. H. Keum, C. H. Choi, S. Y. Kim

Summary

Simulation model was developed to analyze drying process for tray type red pepper dryer and validated by experiments.

This model could predict satisfactorily temperatures and moisture contents of red pepper and temperatures of drying air during drying.

Optimize algorithm was developed to search control variables (drying air temperature, air recycle ratio and air flow rate) of red pepper dryer based on a criterion of minimizing energy consumption under the constraint conditions that satisfied carotenoid retention of at least 210mg per 100g dry matter, the moisture content of bottom layer of 15% (d.b) and drying time of less than 35 hours. Step changes in drying air temperature and air recycle ratio were considered in the optimization.

In single step in control variables, the difference of the moisture content between top layer and bottom layer was great and more fan power was required. As the drying trays were exchanged when the moisture content of bottom layer reached to 100% (d.b), fifty percent of energy was saved and the difference of moisture content was little.

In double step changes in control variables, optimal conditions were found by changing the step when the moisture content of bottom layer reached to 100% (d.b) (about 19.8 hours from starting drying). Optimum air flow rate was 18.1cmm/m². Optimum drying air temperature and air recycle ratio in the first step was 55.8°C and 0.80, and in the second step 65.6°C and 0.88, respectively.

In triple step changes in control variables, the optimal conditions were found by changing the steps when the moisture content of bottom layer reached to 250% (d.b) and 150% (d.b). Optimal air temperatures were 66.2°C, 58.4°C and 66.9°C, and optimal air recycle ratios were 0.778, 0.785, 0.862 at each step, respectively. Optimal air flow rate was 18.9cmm/m².

The best operating mode was triple step mode considering energy consumption, drying time, fan power, and quality of dried red pepper. When the triple step mode was used to dry the red pepper, the energy consumption was about 16.5%~57.2% less than that of the single step mode and the drying time was 6.6 hours shorter than that of the double step mode.

* 본 연구는 산학협동재단의 '90년도 연구비 지원과 주식회사 중앙의 고추건조기 지원으로 수행되었음

+ 성균관대학교 농과대학 농업기계공학과

I. 서 론

고추는 수확후 대부분 건조과정을 거쳐서 乾 고추로 유통된다.

고추는 수확직후 含水率이 80% (w.b.) 이상의 高含水率일 뿐만 아니라 收穫時期인 8~9월의 잦은 일기 불순으로 天-乾燥로는 효과적인 건조를 기대하기 어려우므로 또한 품질좋은 乾 고추의 생산이 어렵다.

현재 보급되어있는 화력고추건조기는 상자형 건조기로 시료를 담은 상자를 7~10단으로 포개어 놓고 하부로부터 송풍하는 일종의 固定層 乾燥方式이다. 버너를 거쳐 압력실로 유입된 열풍은 고추상자를 통과한 후 일부는 배출되고 일부는 재순환된다.

화력고추건조기의 성능과 건조고추의 품질은 열풍온도, 송풍량 및 배기의 재순환율 등의 영향을 받는다. 건조기의 주어진 성능과 乾 고추의 품질을 적정 수준으로 유지하면서 건조 소요에너지 혹은 乾燥費用을 最少化하는 건조기의 設計 및 作動條件의 구명이 중요한 과제임에도 불구하고 아직 이에 관한 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 다음과 같다

가. 상자형 고추건조기의 건조현상을 해석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발한다.

나. 건조 실험을 통하여 시뮬레이션 모델을 검증한다.

다. 最適化 방법으로 적정 설계 및 작동조건을 결정한다.

기호의 뜻

- A_b : 고추 개체의 表面積 (cm^2)
- A_s : 고추퇴적층의 比表面積 (m^2/m^3)
- C : 카로테노이드 함량 ($mg/100g$ -dry matter)
- c_a : 건공기의 비열 ($kJ/kg.K$)
- c_{av} : 평균 카로테노이드 함량 ($mg/100g$ -dry matter)
- c_b : 최하층의 카로테노이드 함량 ($mg/100g$ -dry matter)
- c_p : 고추의 비열 ($kJ/kg.K$)

- c_v : 수증기의 비열 ($kJ/kg.K$)
- D_e : 有效水分擴散係數 (cm/hr)
- D_p : 퇴적물질의 직경 (m)
- d : 고추의 果皮두께 (cm)
- G_a : 송풍공기의 질량 유동율 ($kg/hr.m^2$)
- H : 공기의 절대습도 ($kg-H_2O/kg$ -dry air)
- H_{in} : 건조실 유입공기의 절대습도 ($kg-H_2O/kg$ -dry air)
- h : 고추퇴적층의 대류열전달계수 ($kJ/hr.m^2.K$)
- h_a : 外氣의 엔탈피 (kJ/kg -dry air)
- h_{fg} : 고추의 水分 蒸發潛熱 (kJ/kg)
- h'_{fg} : 자유수의 蒸發潛熱 (kJ/kg)
- h_{in} : 乾燥室에 유입되는 乾燥空氣의 엔탈피 (kJ/Kg -dry air)
- h_r : 배기의 엔탈피 (kJ/kg -dry air)
- L : 퇴적깊이 (m)
- M : 含水率 (dec., d.b.)
- M_c : 평형함수율 (dec., d.b.)
- M_b : 최하층의 함수율 (dec., d.b.)
- M_o : 고추의 초기함수율 (dec., d.b.)
- m_{in} : 乾燥空氣의 質量流動率 (kg -dry air/hr)
- m_b : 고추 개체의 乾物重量 (g)
- N_u : Nusselt 수
- Q : 건조 소요 에너지 (kJ)
- Q_f : 공기 가열 에너지 (kJ)
- Q_p : 송풍 에너지 (kJ)
- q_f : 버너에서의 供給熱 (kJ/hr)
- R : 排氣의 재순환율 (dec.)
- R_e : Reynolds 수
- R_g : 기체상수 (1.987 cal/mole.K)
- RH : 相對濕度 (dec.)
- T : 공기온도 ($^{\circ}C$)
- T_{in} : 건조실 유입공기의 온도($^{\circ}C$)
- t : 건조시간 (hr)
- t_m : 건조상자 교환시기 (hr)
- V : 空氣의 流速 (m/s)
- x : 고추 퇴적층의 깊이 좌표 (m)
- ΔP : 고추 퇴적층의 送風抵抗 (Pa)
- ϵ : 공극율 (0.3)
- η_f : 버너와 열교환기의 합성 효율 (0.85)

- η_p : 送風機와 전동기의 합성효율 (0.35)
- θ : 고추의 溫度 (°C)
- θ_0 : 고추의 初期溫度 (°C)
- ρ_p : 고추건물의 산물밀도 (kg/m³)

II. 시뮬레이션 모델링

1. 固定層 數學 乾燥모델

乾燥공기는 고추의 堆積層을 통과하는 동안 吸濕하여 습도는 높아지고 온도는 下降하는 반면, 고추는 수분을 잃고 온도는 상승하게 된다. 고추의 含水率(M)과 溫度(θ), 공기의 溫度(T)와 濕度(H)가 고추층의 위치에 따라 변하게 된다. 따라서 이들 4개의 변수를 결정하기 위해서는 4개의 방정식이 필요하다.

Bakker - Arkema 등 (1974)은 穀物層을 통과하는 공기에 대한 熱 및 物質平衡을 고려하여 固定層乾燥過程을 지배하는 4개의 편미분방정식을 提示 하였으며, 本 研究에서 고추의 고정층 건조의 해석에 이들 방정식을 이용 하였다. 이들 方程式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h A_s (T - \theta)}{G_a \cdot c_a + G_a \cdot c_v \cdot H} \dots\dots\dots (2-1)$$

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

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{-3 De}{d^2} \cdot (M - M_e) \dots\dots\dots (2-4)$$

상기 방정식의 初期 및 境界條件 은 다음과 같다.

- $T(x, 0) = T_{in}$
- $H(x, 0) = H_{in}$
- $\theta(x, 0) = \theta_0$
- $M(x, 0) = M$
- $T(0, t) = T_{in}$
- $H(0, t) = H_{in}$

2. 關聯 方程式

상기의 數學 乾燥모델을 분석하기 위해서는 고추의 乾燥方程式, 平衡含水率方程式 및 蒸發 潛熱方程式과 고추의 熱 및 物性값이 필요하다. 건조 모델에 이용된 방정식과 熱 및 物性값 계산에 이용된 식은 다음과 같다.

가. 乾燥方程式

고추의 乾燥特性은 品種 및 栽培條件 등에 따라서 상이하게 나타난다. 趙(1991)는 고추의 건조방정식을 열풍의 온도와 상대습도, 고추의 함수율 과 고추 개체의 乾物重量의 函數로 나타내어 品種과 栽培條件에 관계없이汎用할 수 있도록 하였다.

本 研究에서는 趙(1991)가 提示한 다음 (2-5)식의 건조방정식을 이용하였다.

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

$$D_e = AM^B$$

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

$$B = 0.295258 + 0.00738769\theta$$

$$d = 0.01898 + 0.02684M - 0.00227M^2 + 0.01186 M m_0$$

나. 平衡含水率 方程式

趙(1991)는 고추의 平衡含水率을 品種의 구분없이 공기의 溫度 및 상대습도, 고추 개체 乾物重量의 函數로 표시하였으며, 本 研究에서는 趙가 提示한 다음 (2-6)식을 이용하였다.

$$M_e = A \ln(-\ln(RH)) + C \dots\dots\dots (2-6)$$

$$A = -0.05959$$

$$C = 0.17711 - 0.000015051 T^2 - 0.0339181/m_0$$

다. 水分 蒸發 潛熱

趙(1991)는 (2-6)식의 平衡含水率 方程式을 이용하여 Othmer의 방법으로 水分蒸發 潛熱方

程式을 유도하여 다음 (2-7)식으로 提示하였으며, 이를 本 研究에 利用하였다.

$$\frac{h_{fg}}{h'_{fg}} = 1 + (4.6003 - 2.1080/m_b) \exp(-16.78M) \dots\dots\dots (2-7)$$

라. 高추의 比熱

本 研究에서는 高추의 比熱式으로 趙 (1991)가 農産物의 比熱을 그 構成成分比로 나타낸 (Heldman 과 Singh, 1981) 比熱式에 高추의 構成成分比를 代입하여 나타낸 (2-8)식을 使用하였다.

$$c_p = (1.441 + 4.187 M) / (1 + M) \dots (2-8)$$

마. 比表面積

高추 퇴적층의 比表面積은 趙 (1991)가 提示한 高추 1개의 表面積을 나타내는 식을 근거로 다음 (2-9)식으로 計算하였다.

$$A_s = \frac{0.1 \rho_p A_b}{m_b} \dots\dots\dots (2-9)$$

$$A_b = 3.74 + 23.62m_b - 1.76m_b^2$$

사. 熱傳達係數

高추층의 熱傳達係數는 Sietkei (1986)가 직경 10-16mm, 길이 15-25mm의 乾草 펠렛의 퇴적층에 대하여 발표한 다음의 對流熱傳達係數式을 使用 하였다.

$$Nu = 0.172 Re^{0.74} \dots\dots\dots (2-10)$$

일반적인 高추의 건조온도인 50°C에서의 공기 的 熱 및 物性값과 高추의 직경을 18mm로 간주하여 상기식을 정리하면 (2-11)식이 된다.

$$h = 44.93 V^{0.74} \dots\dots\dots (2-11)$$

3. 數值解析 및 시뮬레이션 프로그램

식(2-1) 식(2-4)의 固定層乾燥모델 方程式의 數值解는 Von Rosenberg (1977)의 有限差分法을 利用하였다.

식(2-1)을 점 (x + Δx/2, t + Δt)에 대한 유한차분식으로 표시하면 다음 (2-12)식이 된다.

$$\frac{T_{x+\Delta x}^{t+\Delta t} - T_x^{t+\Delta t}}{\Delta x} = \frac{-h A_s}{G_s(c_a + c_v H_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t})} (T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - \theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}) \dots (2-12)$$

여기서,

$$T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} = 1/2(T_x^{t+\Delta t} + T_{x+\Delta x}^{t+\Delta t})$$

라 두면

$$T_{x+\Delta x}^{t+\Delta t} = 2T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - T_x^{t+\Delta t}$$

이 된다.

이를 (2-12)식에 代입하여 정리하면

$$C_1 T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} + C_2 \theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} = T_x^{t+\Delta t} \dots\dots\dots (2-13)$$

여기서,

$$C_1 = 1 + \frac{h A_s \Delta x}{2 G_s(c_a + c_v H_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t})} = 1 - C_2$$

$$C_2 = - \frac{h A_s x}{2 G_s(c_a + c_v H_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t})}$$

(2-2)식을 점 $(x+\Delta x/2, t+t)$ 에 대한 유한차분식으로 표시하면 다음 (2-14)식이 된다.

$$\frac{\theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - \theta_{x+\Delta x/2}^t}{\Delta x} = \frac{\frac{h A_s}{\rho_p c_p} T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - \theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}}{h_g + c_a(T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - \theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t})} - \frac{H_{x+\Delta x}^{t+\Delta t} - H_x^t}{G_a(\frac{\Delta x}{\Delta x})} \quad (2-14)$$

이를 정리하면

$$C_5 T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} + C_6 \theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} = \theta_{x+\Delta x/2}^t - C_4 h_g \quad (2-15)$$

여기서,

$$C_3 = \frac{h A_s \Delta}{\rho_p c_p}$$

$$C_4 = \frac{G_a \Delta t}{\Delta x \rho_p c_p}$$

$$C_5 = c_a C_4 - C_3$$

$$C_6 = 1 + C_3 - c_a C_4$$

(2-13)식과 (2-15)식을 연립하여

$T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}$ 와 $\theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}$ 에 관하여 풀면

$$T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} = \frac{C_2}{C_5 C_2 - C_1 C_6}$$

$$(\theta_{x+\Delta x/2}^t - C_4 h_g - \frac{C_6}{C_2} T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}) \quad (2-16)$$

$$\theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} = \frac{1}{C_2} (T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - C_1 T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}) \quad (2-17)$$

(2-3)식을 점 $(x+\Delta x/2, t+\Delta t)$ 에 관한 유한차분식으로 나타내면,

$$\frac{H_{x+\Delta x}^{t+\Delta t} - H_x^{t+\Delta t}}{\Delta x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{M_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - M_{x+\Delta x/2}^t}{\Delta t} \quad (2-18)$$

정리하면

$$H_{x+\Delta x}^{t+\Delta t} = H_x^{t+\Delta t} - \frac{\Delta x \rho_p}{\Delta t G_a} (M_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t} - M_{x+\Delta x/2}^t) \quad (2-19)$$

단립고추건조방정식 (2-5)는 점 $(x+\Delta x/2, t)$ 에서의 溫度, 相對濕度 및 含水率값을 이용하여 4계 Runge-Kutter의 방법으로 해 $(M_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t})$ 를 구하였다.

이상의 有限差分式을 이용하여 固定層 건조모델의 數值解를 구하는 계산 순서를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 시간을 Δt 만큼 증분시킨다.
- (2) 점 $(x+\Delta x/2, t)$ 에서의 값을 이용하여 4계 Runge-Kutter 방법으로 $M_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}$ 의 값을 구한다.
- (3) (2-19)식으로부터 $H_{x+\Delta x}^{t+\Delta t}$ 의 값을 구한다.
- (4) (2-16)식으로부터 $T_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}$ 의 값을 구한다.
- (5) (2-17)식으로부터 $\theta_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t}$ 의 값을 구한다.

(6) 깊이 x 를 Δx 만큼 증분시켜 전체 퇴적층 깊이에 이를 때까지 (2)단계에서 (5)단계까지 반복 계산한다.

(7) 요구하는 건조시간에 이를 때까지 (1)단계에서 (6)단계까지 반복계산한다.

이상의 방법으로 構成한 컴퓨터 프로그램은 Fortran 언어로 작성되었고 주 프로그램, 2개의 부프로그램과 21개의 부함수로 構成되어 있으며 자세한 내용은 김(1991)의 論文에 수록되어 있다. 이 프로그램에서 $\Delta t=0.1hr$, $\Delta x=0.025m$ 를 사용하였다.

III 시뮬레이션모델의 檢證

1. 實驗裝置

實驗用 乾燥機는 그림 3-1과 같이 乾燥상자, 壓力室, 送風機, 電熱機 및 送風量測定 덕트를 構成되어 있다.

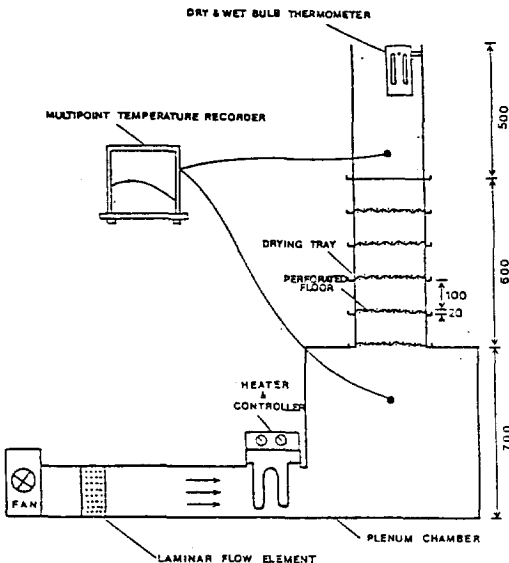


Fig 3-1. Schematic diagram of Fixed bed red pepper drying experiment arrangement

乾燥상자는 두께 14mm의 양철판으로 가로 400mm, 세로 400mm, 높이 120mm의 4각형

구조로 5개를 製作하여 이들을 組立하였으며 실험도중 개개의 건조상자의 무게를 개량할 수 있도록 쉽게 분리 결합할 수 있게 하였다. 건조상자의 외벽은 熱損失을 방지하기 위하여 두께 20mm의 스티로폼으로 斷熱하였다. 壓力室은 가로 820mm, 세로 600mm, 높이 700mm의 합판으로 製作하여 스티로폼으로 斷熱하였다. 送風機는 원심 송풍기를 설치 사용하였으며 공기 흡입구쪽에 댐퍼를 설치하여 송풍량을 調節하였다. 電熱機에는 디지털 溫度調節裝置를 부착하여 送風空氣의 온도를 일정하게 調節하였다. 送風量 測定 덕트는 송풍기의 시험 및 검사방법 (K SB 6311)에 따라 설치하였다.

2. 實驗方法

實驗에 사용된 고추는 水原地方에서 栽培된 것으로 品種은 '90년 8월 20일에 수확한 다복이었다.

냉장고에 보관한 고추를 실험전 常溫에서 24시간이상 노출시켜 고추의 溫度를 常溫과 같게 하였다.

乾燥時間에 따른 고추층의 깊이별로 含水率을 測定하기 위하여 매 2시간마다 5개 乾燥상자의 무게를 분리하여 測定하였다. 乾燥 實驗이 끝난 후 각 건조상자에서 5개의 고추를 選擇하여 오븐건조 방법으로 含水率을 測定하였다.

Thermocouple과 다점온도 記錄計를 이용하여 壓力室과 外氣 및 排出空氣의 溫度를 測定하였으며 송풍량은 송풍량측정덕트에서 피토판을 이용하여 측정하였다.

건조실험은 '90년 8월 22일부터 25일까지 1회 수행하였으며, 건조실험 조건은 표 3-1과 같다.

3. 實驗裝置와 예측치의 비교

시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 平均含水率, 層別含水率 및 排出空氣溫度의 실험치와 예측치를 비교하였다.

Table 3-1. Drying conditions of red pepper used for validation test

Variety of red pepper	Dabok
Initial moisture content (dec., d.b.)	4.010
Initial red pepper temperature (°C)	19.3
Dry bulk density (kg/m ³)	68.7
Bone dry weight of a single red pepper (g)	1.961
Specific surface area (m ² /m ³)	151.66
Bed depth	0.29
Air velocity (m/min)	11.89
Relative humidity of Ambient air (dec.)	0.523
Ambient air temperature (°C)	20.93
Drying air temperature (°C)	55

가. 平均 含水率

그림 3-2는 平均含水率의 실험치와 예측치를 비교한 것이다. 예측치를 獨立變數, 실험치를 從屬變數로 하여 線型回路分析을 한 결과 결정계수 R²은 0.996이었으며 평균제곱오차는 0.0214로 나타나므로서 예측치와 실험치가 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

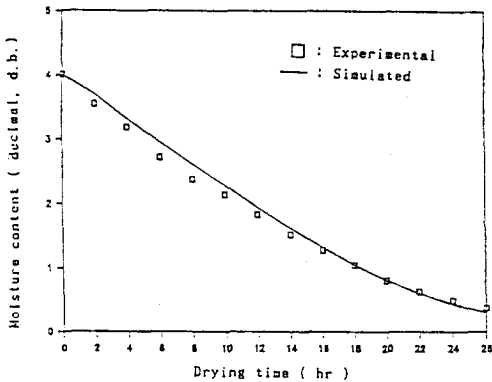


Fig 3-2. Comparison of the experimental and simulated average moisture content

나. 層別 含水率

그림 3-3은 層別 含水率의 실험치와 예측치를 비교한 것이다. 平均含水率分析에서와 같이

線型回路分析을 한 결과 결정계수 R²은 0.969이었으며 평균제곱오차는 0.0493으로 나타났다. 따라서 시뮬레이션모델은 層別含水率을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

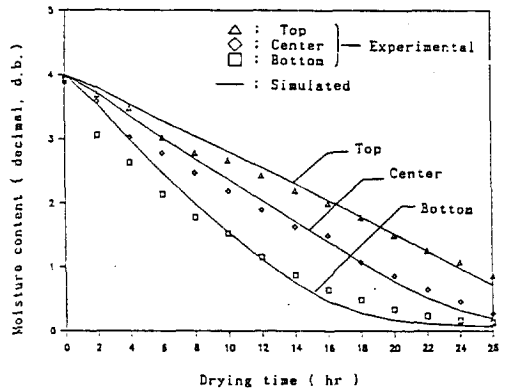


Fig 3-3. Comparison of the experimental and simulated moisture content layer

다. 排出空氣溫度

그림 3-4는 고추퇴적층의 最上層에서 排出되는 공기의 온도의 실험치와 예측치를 비교한 것이다. 含水率分析에서와 같은 방법으로 線型回路分析을 한 결과 결정계수 R²은 0.992이었으며, 평균제곱오차는 0.448로 나타나므로서 예측온도와 실험온도가 잘 일치함을 알 수 있다.

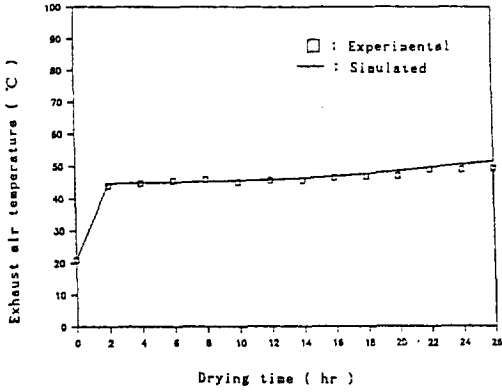


Fig 3-4. Comparison of the experimental and simulated exhaust air temperature

이상의 결과를 종합해 볼 때 고추의 固定層 乾燥過程을 解析하기 위한 시뮬레이션 모델은 平均 含水率, 層別含水率 및 排出空氣의 溫度를 만족 할만한 수준으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 이 모델은 乾燥機의 性能分析 및 最適設計에 有効하게 이용될 수 있는 것으로 판단 된다.

IV 最適化

1. 乾燥機의 기본 구조

乾燥所要 에너지를 最少化하는 건조온도, 송풍량 및 배기 재순환율을 채기 위한 最適化에 이용된 乾燥機는 현재 農家에 보급된 乾燥機와 같은

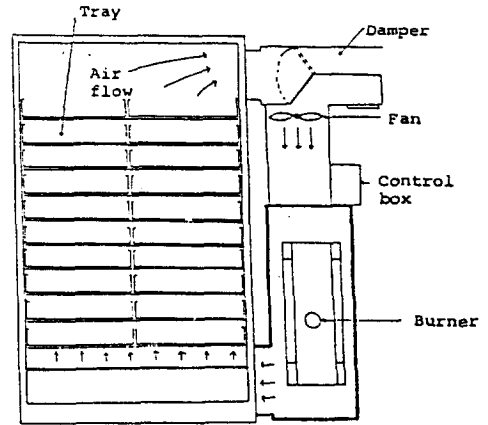


Fig 4-1. A red pepper dryer used for optimization

構造의 일종의 固定層 乾燥機로 基本 構造는 그림 4-1과 같다. 乾燥機는 送風機, 버너, 열교환기, 乾燥室 및 배기순환조절댐퍼로 구성되어 있다.

송풍기에서 유입된 공기는 열교환장치를 통과하면서 가열되어 乾燥室로 들어간다. 乾燥室은 10개의 건조상자를 쌓아올려 두께 0.8m의 고추의 후층을 형성한다. 건조실의 고추층을 통과한 乾燥空氣는 배기순환조절댐퍼에 의하여 일부는 배출되며 일부는 재순환된다.

最適化에 이용된 乾燥條件은 표 4-1과 같다.

표 4-1에서 대기의 온도 22.5°C 와 상대습도 78.9%는 청주지방의 8월과 9월의 30년간의 평균값이다.

Table 4-1. Drying conditions used for optimization

Initial moisture content (d.b., dec.)	4.00
Final moisture content of top layer (d.b., dec.)	0.25
Initial carotenoid (mg/100g dry matter)	370.0
Bone dry weight of a fruit (g)	2.0
Dry bulk density (kg/m ³)	65.0
Bed depth of dryer (m)	0.8
Ambient air temperature (°C)	22.5
Ambient relative humidity (%)	78.9

2. 目的函數와 制限條件

最適化의 目的은 고추를 初期含水率에서 最終含水率까지 乾燥하는데 必要되는 에너지의 最少化에 두고 이에 따른 制御變數로 送風量, 乾燥溫度 및 배기 재순환율을 설정하였다.

초기함수율은 400% (d.b.)로 하고 最終含水率は 0.8m 고추층의 最上層의 含水率 25% (d.b.)로 설정하였다.

乾燥所要에너지는 공기 가열에너지와 송풍에너지의 합으로 하였다.

공기가열에너지는 다음 (4-1)식으로 계산하였다.

$$q_r = \min\{h_{in} - (1-R) h_a - R h_r\} \dots (4-1)$$

컴퓨터 프로그램에서 시간 증분 Δt 시간 동안의 공기가열에너지 $q_r \Delta t$ 를 구하고 이를 전체 乾燥時間에 걸쳐서 합산하여 총공기 가열에너지 Q_f 를 구하였다.

송풍에너지는 다음 (4-2) 식으로 산출하였다.

$$Q_p = \frac{3.6 V \Delta P}{\eta_p} t \dots (4-2)$$

送風抵抗 ΔP 는 고추퇴적층의 송풍저항이다. 고추퇴적층의 送風抵抗은 퇴적층을 유체가 흐를 때의 送風抵抗에 관한 Ergun (1952)의 다음 (4-3) 식을 이용하였다.

$$\frac{\Delta P}{L} = [C_1 \frac{R_c}{1-\epsilon} + C_2] \left[\frac{(1-\epsilon)^2 \rho V^2}{D_p \epsilon^2 R_c} \right] \dots (4-3)$$

C_1 과 C_2 는 堆積物質의 형상에 따른 계수로 실린더의 경우 $C_1=1.54$, $C_2=1.083$ 이다.

50°C의 空氣의 물성값을 식 (4-3)에 대입하면 다음 (4-4) 식으로 표시된다.

$$\frac{\Delta P}{L} = (2.2R_c + 1.083) (20.07 \frac{V^2}{D_p R_c}) \dots (4-4)$$

목적함수인 건조소요에너지는 공기 가열에너지와 송풍에너지의 다음 (4-5) 식으로 표시된다

$$Q = \frac{Q_f}{\eta_f} + Q_p \dots (4-5)$$

制限條件은 명시적 제한조건과 암시적 제한조건으로 구분하여 다음과 같이 설정하였다.

1) 明示的 制限條件

$$\begin{aligned} 0.0 \leq \text{건조공기온도}(T) &\leq 80.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.0 \leq \text{송풍량}(V) &\leq 50.0 \text{ cmm/m}^2 \\ 0.0 \leq \text{배기재순환율}(R) &\leq 1.0 \end{aligned} \dots (4-6)$$

2) 暗示的 制限條件

$$\begin{aligned} \text{최소 카로테노이드 함량}(C) &\geq 210 \text{ mg/100g} \\ &\text{- dry matter} \\ \text{건조시간}(t) &\leq 35.0 \text{ hr} \\ \text{최하층의 함수율}(M_b) &\geq 15\% \text{ (d.b.)} \end{aligned} \dots (4-7)$$

암시적 制限條件중 乾燥時間은 乾燥機의 乾燥能力을 고려하여 35시간이하로 제한하였으며, 最下層의 含水率は 15% (d.b.)이상으로 제한한 것은 상하층간의 불균일 乾燥를 고려하여 설정하였다.

乾燥過程 동안의 고추의 품질변화는 카로테노이드함량變化로 나타낼 수 있다 (李동, 1989). 고추의 카로테노이드 함량은 수확시 건물 100g 당 370mg 정도이며, 건조가 진행되는 동안 점차 줄어 들게 된다. 고추의 매운 맛과 붉은 빛깔을 유지하기 위해서는 일정 수준 이상의 카로테노이드가 포함되어 있어야 하며 이는 고추의品種 및 생육환경 등에 따라 다르게 된다.

카로테노이드 함량의 하한치를 건물 100g 당 210mg으로 설정하였으며, (조, 1991), 乾燥過程 동안의 카로테노이드 함량변화는 다음 (4-8) 식으로 계산하였다(李, 1989).

$$\frac{dC}{dt} = -kC \dots (4-8)$$

$$k = k_0 \exp(-E_{ac}/RgT)$$

$$\ln(k_0) = 401879 - 1.9466M + 3.2619M^2$$

$$E_{ac} = 7698.3 - 692.58M + 1911.2M^2$$

3. 最適化 알고리즘

乾燥 소요에너지를 최소화하는 乾燥溫度, 送風量 및 배기 재순환율을 탐색하기 위한 최적화 알고리즘으로는 Box 의 Complex 방법을 사용하였다.

最適화를 위한 컴퓨터 프로그램의 흐름도는 그림 4-2와 같다.

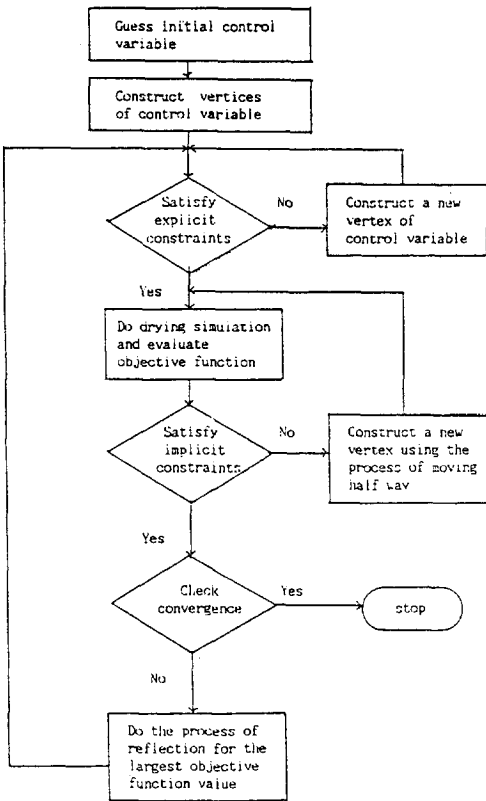


Fig 4-2. Flow chart for optimization of red pepper dryer

Complex 방법에서 꼭지점의 수는 제어변수의 갯수의 2배로 하였으며 반향계수의 값은 1.3을 사용하였다. 최적화 과정중에서 건조과정의 해석은 앞에서 개발한 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다. 乾燥溫度, 배기 재순환율 및 送風량의

제어변수를 건조초기부터 종료시까지 일정한 값을 유지하는 1단계 乾燥方法과 단계적으로 변화시키는 2단계 및 3단계 건조방법의 각각에 대하여 最適화를 수행하였으며 또한 건조진행중에 상하층간에 乾燥箱子를 1회 교환하는 방법과 교환하지 않는 방법에 대하여도 最適화를 수행하였다.

4. 結果 및 考察

가. 1단계 乾燥方法

표 4-2는 1단계 乾燥方法의 最適化結果이다.

표 4-2에서 건조상자를 교환하지 않는 경우에는 어떠한 制御變數의 조합에도 最下層의 含水率이 15% (d.b.) 이상을 유지하지 못하므로 $M_2 \geq 15\%$ (d.b.)의 制限條件을 부여하지 않았다.

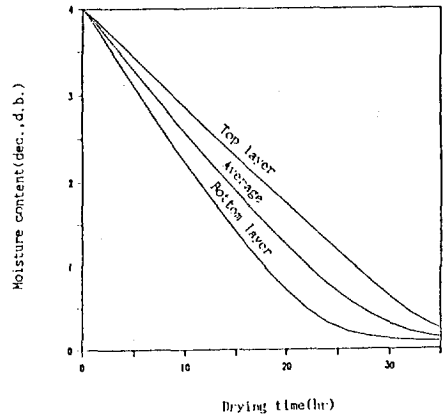


Fig. 4-3 Moisture content changes for optimal single step method (non-mixing)

건조상자를 교환하지 않는 경우 건조 소요에너지는 수분 1kg 증발에 9721kJ로 건조상자 교환방법에 비하여 1.95-2.22배 크게 나타났으며 送風機 구동동력은 건조상자 1m²당 1.27kw로 건조상자 교환방법에 비하여 3.18-7.98배 크게 나타났다.

그림 4-3은 건조상자를 교환하지 않을 경우의 最適條件으로 乾燥할 때 含水率變化를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조종료시 最下層

Table 4-2. Optimization results for the single step changes in control variables

Optimal control variables			Energy consumption	Total drying time	Carotenoid retention		Fan power	Tray exchanging time	
T ¹⁾ (°C)	V ²⁾ (cmm/m ²)	R ³⁾ (dec.)	(kJ/kg.H ₂ O)	(hr)	C _b ⁴⁾	C _{av} ⁵⁾	kw/m ²	M _b ⁶⁾ (%,d.b)	t _m ⁷⁾ (hr)
51.9	34.9	0.506	9721	34.8	210.3	236.2	1.24	non mixing	
58.4	15.5	0.629	4984	34.4	231.2	249.6	0.16	100.0	16.4
58.3	22.2	0.858	4386	34.4	210.5	216.3	0.40	150.0	14.6

Note : 1) Drying air temperature

2) Air flow rate

3) Exhaust air recycle ratio

4) Carotenoid retention of bottom layer (mg/100g dry matter)

5) Average carotenoid retention (mg/100g dry matter)

6), 7) Moisture content of bottom layer and drying time, respectively when red pepper are mixed by exchanging trays

의 습수율은 9.2% (d.b.)이고 最上層의 습수율은 25% (d.b.)로 나타남으로써 상하층간에 15.8% (d.b.)의 큰 함수율 차이를 나타내는 심한 불균일 건조를 초래하였다.

건조하는 동안 상하층간에 건조상자를 교환할 경우 교환시기의 결정이 중요하다. 本研究에서는 最下層 시료의 습수율이 각각 250, 200, 150, 100 및 50% (d.b.)에 이를 때를 상자의 교환시기로 하여 각각의 경우의 最適 制御變數를 탐색하였으나, 250, 200 및 50% (d.b.)의 경우는 制限條件을 만족시키지 못하거나 송풍기 구동동력이 과다하여 만족스러운 결과를 나타내지 못하여 양호한 결과를 나타낸 150, 100% (d.b.)의 경우만 표 4-2에 제시하였다.

표 4-2 에서와 같이 건조 소요에너지를 고려할 경우 下層의 습수율이 150% (d.b.)일 때 건조상자를 교환한 경우가 100% (d.b.)일 때의 경우보다 유리하게 나타났으나, 송풍기 구동동력 및 카로테노이드 함량 즉, 품질을 고려할 때 100% (d.b.)의 경우가 유리하다.

따라서 건조도중 上下層의 건조상자를 순서적으로 1회 교환하는 乾燥方法을 선택할 경우 그 교환시기는 最下層의 습수율이 100% (d.b.)에

이르는 16.4시간 건조 후이며, 이러한 조작을 전제로한 건조기의 最適條件은 乾燥溫度 58.4°C, 送風量 15.5cmm/m², 배기 재순환율 0.629, 송풍기 구동동력 0.16kw/m²이며 건조후 고추의 카로테노이드 함량은 231.2mg/100g-dry mater 이상을 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 이 경우의 습수율 變化를 나타낸것이 그림 4-4이다.

그림에서와 같이 건조 종료후 上下層의 습수율은 각각 15.1% (d.b.) 및 15.3% (d.b.)였으며 평

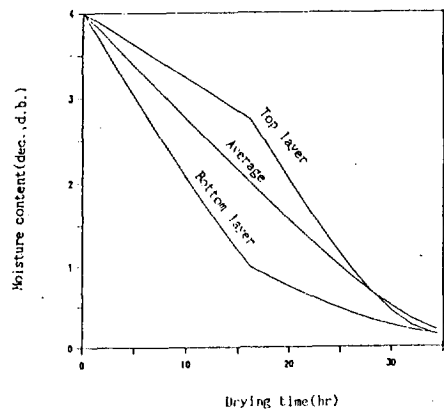


Fig. 4-4 Moisture content changes for optimal single step method(mixing)

均含水率이 21% (d.b.)로 나타났다. 平均含水率 이 最上層 含水率 보다 높은 것은 상자의 교환이 이루어지지 않은 중간층 고추의 最終含水率이 25% (d.b.)로 나타났기 때문이었다.

나. 2단계 및 3단계 乾燥方法

乾燥溫度와 배기 재순환율을 2단계로 조절하여 건조할 경우 건조 소요에너지를 最少化하는 건조온도, 배기 재순환율 및 송풍량을 결정하기 위하여 건조단계의 전환점을 최하층 고추의 함수율이 각각 100, 150, 200 및 250% (d.b.)에 이를 때인 4가지 경우에 대하여 最適化를 수행하였다.

이때 送風量은 단계별로 변하지 않는 것으로 간주하였으며, 상하층간의 건조 상자의 교환시기는 최하층 고추의 含水率이 100% (d.b.)에 이를 때로 하였다.

2단계 건조 방법의 最適化 結果는 표 4-3과 같다.

표 4-3에서와 같이 건조단계 전환점에 관계 없이 최적 배기재순환율 1단계에서는 낮은 값을, 2단계에서는 높은 값을 나타내었다.

最適 乾燥溫度는 건조단계 전환점이 100 및 150% (d.b.)일 경우 1단계에서는 온도를 낮게, 2단계에서는 높게 설정하는 것이 유리한 것으로

Table 4-3 Optimization results for the double step changes in control variables

Step changing time		Optimal control Variables				Energy consumption	Total drying time	Carotenoid retention		Fan power	Tray exchanging time	
M _b (% ,d.b)	t (hr)	step	T (°C)	V (cmm/m ²)	R (dec.)	(kJ/kg,H ₂ O)	(hr)	C _b	C _{av}	kw/m ²	M _b (% ,d.b)	t _m (hr)
100	19.8	1 st	55.8	18.1	0.800	4186	34.8	210.3	224.6	0.24	100	19.8
		2 nd	65.6		0.880							
150	13.2	1 st	58.5	17.1	0.653	4290	33.2	212.3	227.6	0.21	100	15.8
		2 nd	64.2		0.884							
200	8.0	1 st	64.2	20.3	0.695	4669	34.8	210.1	228.0	0.32	100	15.0
		2 nd	55.2		0.823							
250	5.4	1 st	67.8	17.5	0.592	4250	30.4	211.4	224.3	0.22	100	13.2
		2 nd	63.2		0.852							

Table 4-4 Optimization results for the triple step changes in control variables

Step changing time		Optimal control Variables				Energy consumption	Total drying time	Carotenoid retention		Fan power	Tray exchanging time	
M _c (% ,d.b)	t (hr)	step	T (°C)	V (cmm/m ²)	R (dec.)	(kJ/kg,H ₂ O)	(hr)	C _b	C _{av}	kw/m ²	M _b (% ,d.b)	t _m (hr)
250	6.0	1 st	66.2	18.9	0.778	4161	28.2	210.8	223.3	0.27	100	14.6
		2 nd	58.4		0.785							
		3 rd	66.9		0.862							
250	7.0	1 st	61.1	18.0	0.708	4197	32.6	211.3	223.9	0.23	100	17.8
		2 nd	57.4		0.875							
		3 rd	65.6		0.853							

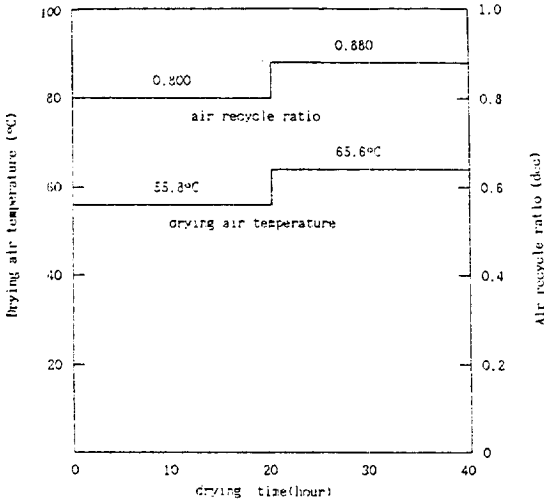


Fig. 4-5 Optimal control process of air temperature and exhaust air recycle ratio for the double step method with air flow rate of 18.9 cm^3/m^2 (Drying trays were exchanged when moisture content of bottom layer reached to 100% d.b.)

나타났으나, 건조단계 전환점이 200 및 250% (d. b.)의 경우는 그 반대 현상을 나타내었다.

2단계 乾燥方法중 소요에너지가 최소인 경우는 건조단계 전환점이 100% (d.b.)에 이르는 19.8시간 건조후인 때로 나타났다. 이 경우 첫번째 건조단계에서 乾燥溫度는 55.8°C를 유지하고 두 번째 단계에서는 65.6°C를 유지해야 하며 배기 재순환율은 각각 0.80 및 0.88을 유지해야 하는 것으로 나타났으며 그림 4-5와 같이 나타낼 수 있다.

그림 4-6은 건조단계 전환점이 100% (d.b.) 일때의 含水率 變化를 나타낸 것이다. 건조종료 후 상하층간의 含水率 차이는 1% (d.b.)이었으며 平均含水率은 21.4% (d.b.)로 나타났다.

표 4-4는 3단계 乾燥方法의 最適化 結果이다.

건조상자의 상하층간의 교환은 最下層 含水率 이 100% (d.b.)일때 시행하고 送风量은 일정한 값을 유지하도록 하였다. 最下層 含水率이 250% (d.b.)와 150% (d.b.)에서 단계를 전환하는 경우와 250% (d.b.)와 100% (d.b.)에서 단계를 전환하는 경우에 대하여 最適化를 수행하였다.

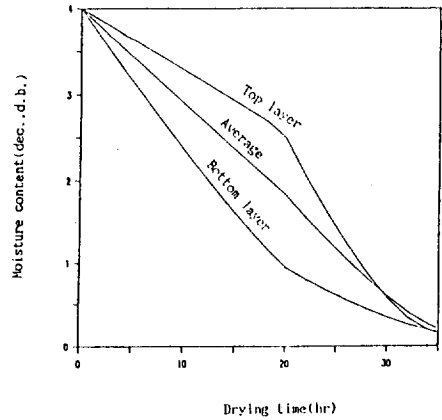


Fig. 4-6 Moisture content changes for optimal double step method

표 4-4에서와 같이 2가지의 경우 건조 소요 에너지는 전자의 경우가 약간 유리하며 乾燥時間도 4.4시간 정도 단축되었다. 이 경우의 乾燥溫度 및 배기 재순환율의 단계적 변화를 나타낸 것이 그림 4-7이다. 단계의 전환점은 건조시작 후 6시간 및 11.6시간 경과후이며 乾燥溫度는 66.2-58.4-66.9°C의 3단계로 조정하며 배기 재순

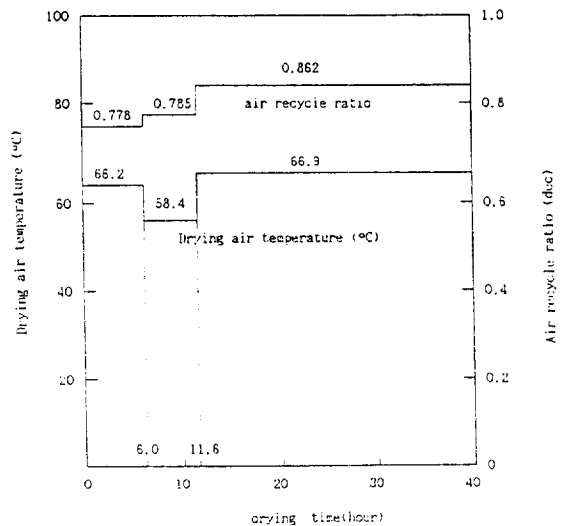


Fig. 4-7 Optimal control process of drying air temperature and exhaust air recycle ratio for triple step method with air flow rate of 18.9 cm^3/m^2

환율은 0.778-0.785 - 0.862의 3단계로 조정하는 것이 건조 소요에너지를 最少化 하는 것으로 나타났다.

3단계 건조방법의 습수率變化는 그림 4-8과 같다.

그림에서 건조 종료후 상하층간의 습수率 차이는 0.8% (d.b), 平均습수率은 21.3% (d.b)로 나타났다.

2단계 乾燥方法과 3 단계 건조방법을 비교해보면 건조 소요에너지 및 송풍기 구동동력에는 큰 차이가 없으나 乾燥所要時間은 3단계 乾燥方法이 28.2시간, 2단계 건조방법이 34.8시간 으로 나타나 전자가 6.6시간의 건조시간 단축 효과를 나타내는 것으로 나타났다.

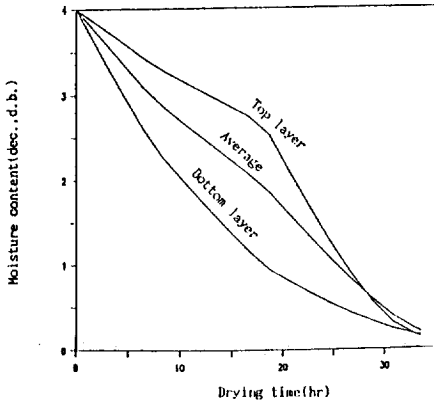


Fig. 4-8 Moisture content changes for optimal triple step method

다. 乾燥方法의 比較

표4-5는 앞에서 논한 乾燥方法중 소요에너지 및 送風動力을 고려하여 가장 유리한것으로 논의된바 있는 4가지 경우를 비교한것이다.

표에서와 같이 3단계 乾燥方法의 건조 소요에너지는 1단계 건조방법에 비하여 16.5~57.2% 절감되며 2단계 건조방법과는 별 차이가 없는것으로 나타났다. 건조 소요시간은 3단계 건조방법이 다른 방법보다 6.2~6.6시간 단축되는것으로 나타났다.

따라서 건조 소요에너지와 건조 소요시간을 고려할때 3단계 건조방법이 가장 유리한 것으로 판단된다.

V. 결론 및 요약

상자형 고추건조기의 乾燥過程 즉 습수率, 고추온도, 乾燥空氣의 溫度 및 濕度變化를 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 開發하고 이를 실험을 통하여 檢證하였다.

고추의 품질의 지표인 카로테노이드 함량을 일정수준 (210mg/100g-dry matter)이상으로 유지하면서 最下層의 습수率 15% (d.b.)이상 및 건조소요시간 35시간 이하의 制限條件을 만족하면서 건조 소요에너지를 最少化하는 送風量, 乾燥溫度 및 배기 재순환율을 탐색하는 最適化 프로그램을 開發하였다.

Table 4-5 Comparison of four different step methods.

Step changing method	Optimal control variables				Energy consumption (KJkg, H ₂ O)	Total drying time (hr)	Fan power kw/m ²
	step	T (°C)	V (cmm/m ²)	R (dec.)			
Single step (Non-mixing)	1 st	51.9	34.9	0.506	9721	34.8	1.27
Single step (mixing)	1 st	58.4	15.5	0.629	4984	34.4	0.16
Double step (mixing)	1 st	55.4	18.1	0.800	4186	34.8	0.24
	2 nd	65.6		0.880			
Triple step (mixing)	1 st	66.2	18.9	0.778	4161	28.2	0.27
	2 nd	58.4		0.785			
	3 rd	66.9		0.862			

송풍량은 건조 종료시까지 일정하게 유지하고, 건조온도와 배기 재순환율은 1단계, 2단계 및 3단계로 변화시키는 건조방법의 각각에 대하여 최적화를 수행하여 최적의 송풍량, 단계별 건조 온도 및 배기 재순환율을 제시 하였으며, 또한 이들을 비교, 분석하였다.

研究結果를 요약하면 다음과 같다.

1. 고추의 固定層 乾燥過程을 해석하기위한 시뮬레이션 모델은 平均含水率, 層別含水率 및 排出空氣의 溫度를 만족할만한 수준으로 예측할 수 있었다.

2. 전 乾燥過程을 통하여 일정한 送風量, 乾燥 溫度 및 배기 재순환율을 유지하는 1단계 건조 방법중 상하층간의 건조상자를 교환하지 않는 방법은 구동동력이 과다할 뿐만 아니라 상하층간의 극심한 불균일 건조 현상을 초래하였으며, 最下層의 含水率이 100% (d.b.)일때 건조상자를 교환할 경우 소요에너지를 약 50% 절감할 수 있었으며 불균일 건조도 해소 되었다.

3. 2段階 乾燥方法 중 가장 효과적인 방법은 最下層 고추의 含水率이 100% (d.b.) (19.8시간 건조 후) 일 때를 전환점으로 하여 乾燥溫度를 55.8°C와 65.6°C의 2단계, 배기 재순환율을 0.80과 0.88의 2단계로 변화시키는 방법으로 나타났으며, 이 경우의 最適送風量은 18.1cmm/m² 이었다.

4. 3段階 乾燥方法중 가장 효과적인 방법은 最下層 고추의 含水率이 각각 250% (d.b.) 및 150% (d.b.)에 이를 때를 전환점으로하여 乾燥 溫度는 66.6°C, 58.4°C 및 66.9°C의 3단계, 배기 재순환율은 0.778, 0.785 및 0.862의 3단계로 변화시키는 방법으로 나타났으며 이 경우의 最適 送風量은 18.9m³/min.m² 이었다.

5. 3段階 乾燥方法은 1 단계 乾燥方法에 비하여 약 16.5-57.2%의 건조소요에너지 절약효과를 나타내었으며, 2단계 건조방법에 비해서는 건조소요 에너지는 차이가 없었으나 乾燥 所要 時間을 약 6.6시간 단축 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김수연. 1991. 고추의 固定層 乾燥 시뮬레이션. 성균관 대학교 석사 학위논문.
2. 조용진. 1991. 고추의 건조과정 模型化 및 最適化에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
3. Bakker-Arkema, F.W., L.E. Lerew, S.F., De Boerland, M.G. Roth. 1974. Grain dryer simulation. Reserch report, Michigan State Univ.
4. Ergun, S. 1952. Fluid flows through packed columns. Chem. Eng. Proc., 48.
5. Heldmann, D.R. and R.P. Singh. 1981. Food process engineering. A Publishing Co.
6. Lee, D.S., D.H. Keum, N.H. Park, and M.H. Park, 1989. Optimum drying conditions of on-farm red peper dryer. Korean J. Food Sci. Technol. 21(5).
7. Sietkei, G. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publisher.
8. Von Rosenberg. 1977. Numerical solution of surface controlled fixed bed absorbtion. Institute of Engineering Chemistry Fundamentals, 16(1).