

동결건조 제어변수가 마늘의 승화건조시간에 미치는 영향

Effects of Freeze Dry Control Parameters on the Sublimation Drying Time of Garlic paste

박노현*
N. H. Park

배신철**
S. C. Bae

Summary

Effects of physical properties of garlic paste and freeze dry control parameters on the sublimation drying time were investigated to verify optimal operating method in freeze drying. A mathematical model of freeze drying by sublimation was suggested and used to estimate the drying time of garlic paste. Under various conditions, the drying time of garlic paste was calculated using the computer program for the suggested model. Among the physical properties of garlic paste, melting temperature was evaluated the most important factor in affecting the drying time. In supplying methods of the required heat energy for sublimation, it would be the best way to control the upper plate temperature and the lower plate temperature independently.

1. 서론

동결건조 (Freeze-Drying)는 건조하고자 하는 원료를 동결시킨 다음 높은 진공장치 내에서 액체 상태를 거치지 않고 기체 상태의 증기로 승화시켜 건조하는 방법으로, 일반의 건조방법에서 보다 훨씬 고품질의 제품을 얻을 수 있다. 동결된 상태에서 승화에 의하여 수분이 제거되기 때문에 건조된 제품은 가벼운 형태의 다공성 구조를 가지며, 원래상태를 유지하고 있어 물을 가하면 급속히 복원이 될 뿐 아니라 건조가 비교적 낮은 온도에서 일어나므로 열적 변성이 적고, 물 이외의 향기 성분의 손실이 적은 잇점이 있다 그러나 동결건조는 건조속도가 일반 건조방법 보다 매우 느리고, 저온과 진공의 사용으로

고가의 건조방법이므로 고품질을 요구하는 식품과 제약 그리고 미생물등의 건조에 이용되고 있으나 그 활용범위는 점점 더 확대되고 있다¹⁻³⁾.

동결건조법의 응용범위가 넓어지면서 이 건조법에 대한 건조품의 품질향상과 건조과정의 해석 및 조작변수의 영향을 고려한 공정 최적화등을 목적으로 하는 정량적 분석용의 여러가지 수학적 모델이 전개되어져 왔다. Cox등⁴⁾은 구형 및 원주형 쇠고기를 이용한 동결건조에서의 유사 정상 상태 해석 (quasi-steady state analysis)을 제안하였고 Sandall등⁵⁾은 칩면조 고기의 한쪽 방향 동결건조로 URIF (Uniformly Retreating Ice Front)의 가정을 도입하여 승화면의 위치와 온도 그리고 건조시간을 실측치와 비교하였고, Liapis⁶⁾ 와 Meo등⁷⁾은 동결건조 동안 비정상상

* 한국식품개발연구원

** 단국대학교 공과대학 기계공학과

태의 열 및 물질전달 조작을 설명하는 수학적 모델을 제시하였다. 이들은 동결층의 소멸속도와 온도분포 그리고 건조시간을 구하는데는 비교적 적합한 모델이었으나 제어변수를 고정 또는 단순화시켰거나 피건조물의 물성값을 고려하지 않았기 때문에 건조시간의 최소화 운전방법을 구하는데에는 많은 양의 실험이 수반되어야 한다.

동결건조에서 운전조건의 제어변수로는 승화에 필요한 열의 전달방법과 수증기 기력 (driving force)에 영향을 주는 건조실 압력과 응축기 온도 그리고 피건조물의 두께를 들 수 있고, 승화열 유속의 제한조건 인자로는 피건조물의 품질 열화온도와 용융온도를 들 수 있다.

본 연구에서는 동결건조시간을 최소화 할 수 있는 운전방법을 구명하기 위한 일환으로 최근 식품과 제약분야에서 건조제품으로 널리 사용되며 건강식으로도 각광을 받고 있는 마늘을 대상으로 승화모델을 설정, 수식으로 유도하고 동결건조의 제어변수와 마늘의 물성값이 승화건조시간에 미치는 영향을 수치계산에 의해 예측하였다.

2. 이론 해석

가. 열 및 물질전달 방정식

그림 1은 동결건조장치의 구성 요소를 도식화한 것으로, 플레이트는 피건조물의 동결과 승화에 필요한 열을 공급하여 주는 장치이고, 진공펌프는 피건조물의 증발온도를 낮추기 위하여 건조실 내의 공기와 비응축가스를 제거하는 것으로 건조 초기부터 종료시 까지 운전된다. 또한 진공하에서 증발된 수증기는 체적팽창이 대단히 크기 때문에 이를 열음으로 응축되도록 저온용의 응축장치가 부착되어 있다. 그림 2는 해석을 위하여 설정한 모델로, $x=0$ 의 윗면에서 Q_d 의 복사열이 전달되고, $x=L$ 인 동결층 바닥에서는 Q_f 의 전도열이 공급되며 양측면은 단열된 것으로 가정한다. 또한 수학적 모델을 세우기 위하여

다음 사항을 가정하였다. 즉, 승화면($x=X$)과 표면($x=0$)은 수직방향이고, 1차원의 열 및 물질전달이 일어나며, 승화는 표면에서 X 만큼 떨어진 거리에서 일어나고, 승화는 평행하게 발생한다. 또한 승화 경계면 두께는 대단히 얇고, 수증기와 불활성 기체는 건조층을 통하여 유동되며, 다공성 매질내의 세포질과 주위가스는 열적 평형이다. 그리고 동결층은 균일물질이고, 물성치도 동일하며, 바닥용기의 열전달 저항은 무시한다.

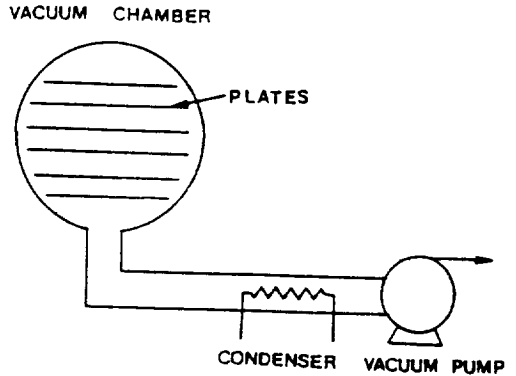


Fig. 1 Schematic of standard freeze-drying equipment

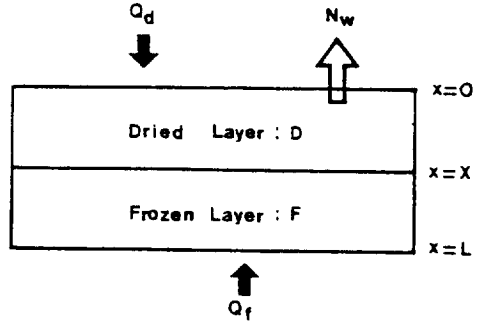


Fig. 2 Schematic of sample during freeze-drying

이상의 가정을 통하여 건조층(D)과 동결층(F)에서의 열전달 방정식을 Navier-Stokes의 에너지 보존 방정식으로 부터 유도하면 다음의 식 (1)과 (2)를 얻을 수 있다⁷⁾.

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = -N_f \frac{C_{pg}}{\rho_{de} C_{pde}} \frac{\partial T_d}{\partial x} + \alpha_{de} \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} \quad (0 \leq x \leq X) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = + a_{fc} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad (X \leq x \leq L) \dots\dots\dots (2)$$

초기와 경계조건은

$$T_d = T_f = T'' \text{ at } t=0, (0 < x < L) \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_d = -K_{dc} \frac{\partial T_d}{\partial x} \text{ at } x=0, t>0 \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_f = K_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \text{ at } x=L, t>0 \dots\dots\dots (5)$$

$$T_d = T_x = T_f \text{ at } x=X, t>0 \dots\dots\dots (6)$$

이며, 또한 건조층에서 복사 열전달이 있을 경우는

$$Q_d = \sigma S (T_{up}^4 - T_{dn}^4) \text{ at } x=0, t>0 \dots\dots\dots (7)$$

이다. 그리고 $x=L$ 에서의 경계조건은 주위 여건에 따라 달라지므로 복사만 이루어진다면

$$Q_f = \sigma S (T_{LP}^4 - T_{LL}^4) \dots\dots\dots (8)$$

이 되고, 완전 열접촉이라면

$$T_{f,LL} = T_{LP} \dots\dots\dots (9)$$

이 된다. 식(9)에서 동결층과 바닥 플레이트와의 얇은 film사이에는

$$Q_f = K_b (T_{LP} - T_{f,LL}) \dots\dots\dots (10)$$

이 된다.

또한 Interface, $x=X$ 에서의 에너지 평형관계는 그림 3으로 부터

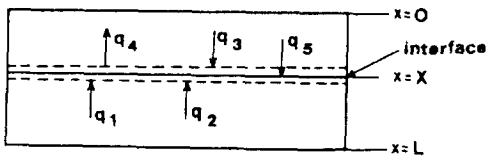


Fig. 3 Energy balance at the interface, $x=x$

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 0 \dots\dots\dots (11)$$

이 된다.

여기서,

q_1 : interface가 속도 V 로 움직임에 따라 동결층이 갖고 있는 에너지가 미소체적(cont-

rol volume) 속으로 들어 오는 열

$$= \rho_i C_{pf} T_f V$$

q_2 : 동결층에서 들어 오는 전도열 $= K_f \frac{\partial T_f}{\partial x}$

q_3 : 건조층에서 들어 오는 전도열

$$= -K_{dc} \frac{\partial T_d}{\partial x}$$

q_4 : Interface가 속도 V 로 움직임에 따라 미소체적에서 건조층으로 나가는 열 $= -\rho_d C_{pd} T_d V$

q_5 : Interface에서 승화에 의한 총 질량 N_i 가 갖는 에너지, $N_i C_{pg} T_d$ 와 상변화에 필요한 에너지, $\Delta H N_i$

이들을 대입하면

$$K_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - K_{dc} \frac{\partial T_d}{\partial x} + V(\rho_i C_{pf} T_f - \rho_d C_{pd} T_d) + N_i C_{pg} T_d = -\Delta H N_i \text{ at } x=X \dots\dots\dots (12)$$

이 되고 동결층의 소멸속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{dX(t)}{dt} = -\frac{N_i}{\rho_i - \rho_d} \dots\dots\dots (13)$$

식(1), (2) 및 식(12) 등에서 열전달 관계식의 완전해를 구하기 위하여서는 N_i 에 관한 값을 먼저 구하여야 되며, 식(13)에서 $X(t)$ 의 시간에 대한 함수가 주어지면 V 를 시간함수로 알 수 있다.

따라서 동결층의 소멸속도 V 는 식(13)에서 피건조물의 동결층과 건조층의 밀도, ρ_i 와 ρ_d 가 일정한 값으로 주어지고 건조층에서의 물질 전달량 N_i 를 구하면 계산할 수 있으며, 이를 시간에 대해 적분하므로써 $X(t)$ 를 구할 수 있다.

건조층($0 \leq x \leq X$)에서 수증기와 불활성 기체의 연속방정식은 다음과 같다. 먼저 수증기에 대한 연속방정식은

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \text{div}(\rho_w V_w) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

여기서 이상 기체식(ideal gas law)을 보면,

$$P_w = \rho_w R T_w \dots\dots\dots (15)$$

이 된다. 식(15)를 식(14)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{P_w}{R T_w} \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w V_w) = 0 \dots\dots\dots (16)$$

$$N_w = \rho_w V_w \dots\dots\dots (17)$$

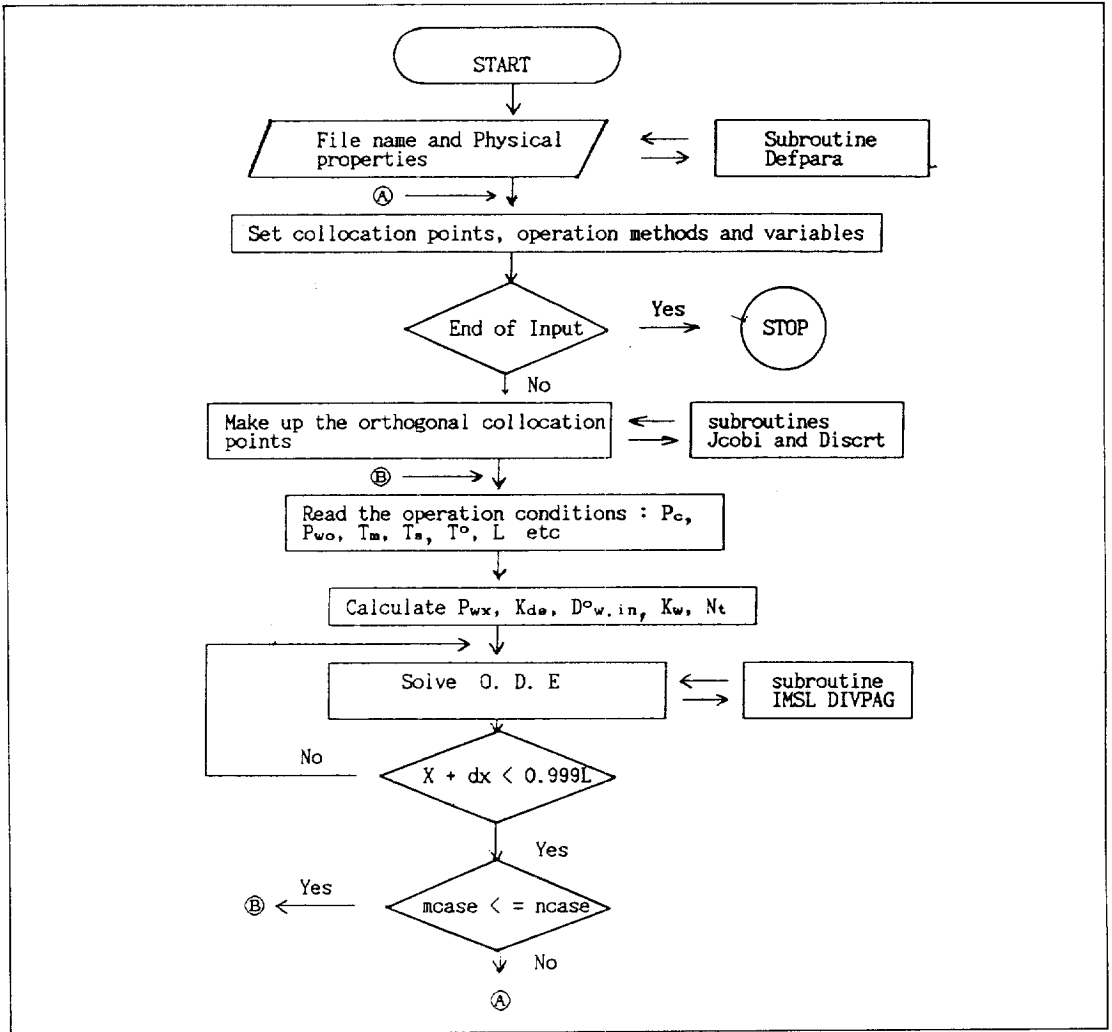


Fig. 4 Flow chart for computer solution of model equations

식(16)를 편미분하고 식(17)을 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{RT_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} - \frac{P_w}{RT_w^2} \left[\frac{\partial T_w}{\partial t} \right] + \frac{\partial N_w}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{1}{RT_{in}} \frac{\partial P_{in}}{\partial t} - \frac{P_{in}}{RT_{in}^2} \left[\frac{\partial T_{in}}{\partial t} \right] + \frac{\partial N_{in}}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

식(18), (19)에서 온도의 시간에 대한 편미분은 다른 항목에 비하여 작은 값을 갖으므로 무시할 수 있고⁸⁾, $T_w = T_{in} = T_d$ 이므로 아래식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial P_w}{\partial t} = -RT \frac{\partial N_w}{\partial x} \quad (20)$$

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial t} = -RT \frac{\partial N_{in}}{\partial x} \quad (21)$$

Evans⁹⁾의 확산식과 D'Arcy의 점성 흐름식⁶⁾에 의하여 N_w 와 N_{in} 은 아래와 같이 전개된다.

$$N_w = -\frac{1}{RT} \left[K_1 \frac{\partial P_w}{\partial x} + K_2 P_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x} + \frac{\partial P_{in}}{\partial x} \right) \right] \quad (22)$$

$$N_{in} = -\frac{1}{RT} \left[K_3 \frac{\partial P_{in}}{\partial x} + K_4 P_{in} \left(\frac{\partial P_{in}}{\partial x} + \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \right] \quad (23)$$

수학적 모델의 가정으로 부터, 수증기와 불활성 기체는 건조층을 통하여 유동하고 불활성 기체의 유동효과는 무시할 수 있으므로 식(22), (23)은 다음과 같이 간단히 만들 수 있다.

$$N_w = -\frac{1}{RT} \left[K_f \frac{\partial P_w}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (24)$$

$$N_w = -\frac{1}{RT} \left[\frac{C_2 D_{w, in} K_w}{C_2 D_{w, in} + K_w P_w} \right] \frac{dP}{dx} \dots (25)$$

따라서 전체 질량 유속 N_i 는

$$N_i = N_w = -\frac{C_2 D_{w, in} K_w M_w}{RTX(C_2 D_{w, in} + K_w P_w)} (P_{wx} - P_w) \dots\dots\dots (26)$$

여기서 P_{wx} 는 경계면 온도의 함수로 표시할 수 있고, 표면온도와 경계면 온도의 산술 평균값은 확산계수 $D_{w, in}$ 와 Knudsen coefficient K_w 를 계산하는데 사용되고 있다⁶⁾.

나. 방정식의 변환

식(1)의 경계조건을 항시 1이 되도록 고정시키면 직교좌표(orthogonal collocation)의 수치해는 간단한 방법으로 얻을 수 있으므로⁶⁾ 경계면 $X(t)$ 를

$$\xi = \frac{x}{X(t)} \quad 0 \leq x \leq X \dots\dots\dots (27)$$

와 같이 변형시킨다. 또한 식(2)를 시간 미분이 0이 되도록 나타내면 식(5)는 다음과 같이 된다.

$$Q_i = K_f \left[\frac{T_{f, L} - T_x}{L - X} \right] \dots\dots\dots (28)$$

식 (27)로 부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\left[\frac{\partial T_d}{\partial x} \right]_i = \frac{1}{X} \left[\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right]_i \dots\dots\dots (29)$$

$$\left[\frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2} \right]_i = \frac{1}{X^2} \left[\frac{\partial^2 T_d}{\partial \xi^2} \right]_i \dots\dots\dots (30)$$

$$\left[\frac{\partial T_d}{\partial t} \right]_x = \left[\frac{\partial T_d}{\partial t} \right]_i - \frac{\dot{X}}{X} \frac{dX}{dt} \left[\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right]_i \dots\dots\dots (31)$$

식(1)과 (4)를 위식에 대입하여 정리하면

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{\alpha_{de}}{X^2} \left[\frac{\partial^2 T_d}{\partial \xi^2} \right] + \frac{1}{X} \left[\xi \frac{dX}{dt} - \frac{N_i C_{pg}}{\rho_{dc} C_{pde}} \right] \left[\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right] \quad 0 \leq \xi \leq 1 \dots\dots\dots (32)$$

$$Q_d = -\frac{K_{de}}{X} \left[\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right] \text{ at } \xi=0, t < 0 \dots (33)$$

이 되고, 식(12)은

$$K_f \left[\frac{T_{f, L} - T_x}{L - X} \right] - \frac{K_{de}}{X} \frac{\partial T_d}{\partial \xi} + V(\rho_i C_{pi} - \rho_d C_{pd}) T_x + N_i C_{pg} T_x = -\Delta H N_t \text{ at } \xi=1, t \leq 0 \dots\dots\dots (34)$$

으로 변형시킬 수 있다.

3. 수치 계산

가. 프로그램 소개

앞에서 정리된 승화모델의 기본 수식 (32)는 미분방정식의 여러가지 유형중 초기 조건에 관한 문제로 이런 형태의 문제를 상미분 방정식으로 해석하는데는 Adams-Moulton이 사용되고 있으며, 이는 IMSL/MATH의 IVPAG 에 수록되어 있어 double precision의 DIVPAG를 이용할 수 있었다¹⁰⁾. 프로그램의 언어는 포트란으로 구성하였고, 계산을 위한 프로그램의 흐름도는 그림 4와 같다. 프로그램 가운데에는 재료의 물성값과 건조조건등을 입력할 수 있도록 Defpara 부프로그램과 직교 배열점을 행렬로 바꾸고 각 배열점의 1차 및 2차 미분값을 계산하기 위하여 Jacobi와 Discrt 부프로그램을 사용하였다. 앞의 수학적 모델의 가정에서 승화건조는 표면층 $x=0$ 에서 승화면 $x=X$ 로 수직방향으로 일어나며 1차원의 열 및 물질전달이였으므로, 이에 승화건조시간의 계산은 $x=0$ 에서 부터 시작하여 시간 증분 dt 를 0.03초로 두고 dt 증가에 따른 승화면의 이동거리 dx 를 반복계산하면서 $X+dx$ 가 재료의 두께 L 의 99.9%에 이르렀을때 종료되도록 구성하였다.

나. 열전달 방법별 플레이트 제어조건

동결건조장치에서 승화열 공급방법으로는 표 1과 같이 4가지의 경우를 고려할 수 있다. 즉, 재료를 플레이트와 플레이트 사이에 두고 양면복사에 의해 건조하는 case 1의 경우와 플레이트 위에 재료를 올려 놓고 아랫면 플레이트(T_{lp})에

서 전도열과 윗면 플레이트(T_{up})에서 복사열이 공급되는 case 2와 case 3의 경우 그리고 플레이트 위에 올려 놓은 상태에서 전도열만이 공급되

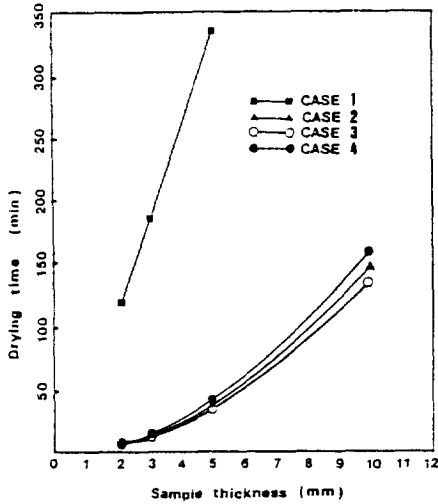


Fig. 5 The effect of sample thickness on sublimation drying time of garlic ($P_0=0.6$ mmHg, $T_0=-60^\circ\text{C}$)

는 case 4의 경우이다. 그리고 플레이트 온도 제어의 필요충분조건으로는 마늘의 열화온도(T_s)와 용융온도(T_m)를 제한조건으로 놓고 재료의 표면온도(T_0)가 T_s 보다 낮고($T_0 \leq T_s$), 경계면 온도(T_x)가 T_m 보다 낮도록($T_x \leq T_m$) 플레이트 온도($T_p = T_{lp}, T_{up}$)를 제어하였다. case 1은 T_{lp} 와 T_{up} 를 동일온도로 하면서 T_s 를 T_p 의 최대온도로 설정하고, 필요충분조건에 따라 제어하였고, case 2는 case 1과 같이 T_p 의 제어방식은 같으나,

아랫면의 열전달 방식이 다르며, case 3은 case 2와 동일한 열전달 방식에서 T_{lp} 와 T_{up} 를 별도로 제어한 경우이다. 그리고 case 4는 T_{up} 가 없는 경우로 T_{lp} 만을 제어한 경우이다.

다. 제어변수별 계산방법

피건조물의 특성치를 프로그램에 입력함으로써 승화건조시간을 계산, 예측할 수 있었기에 본 연구에서는 착즙한 마늘을 건조 대상으로 선정하고 열전달 방법 4가지 경우에서 건조실의 압력(P_c)과 응축기 온도(T_c) 그리고 마늘층 두께(L)를 달리하면서 승화건조시간을 계산하였다. 계산에 사용된 마늘의 물성값과 변수값은 표 2와 같으며 이는 계산 또는 문헌에서 인용¹¹⁻¹³⁾하였다.

4. 계산결과 및 고찰

가. 물성값이 승화건조시간에 미치는 영향

수치계산에 사용된 물성값들이 승화건조시간에 미치는 영향을 알아보기 위하여 마늘의 승화건조에 사용된 물성값과 칠면조 또는 탈지분유 등의 일반 식품류 건조에 적용되고 있는 수치¹⁴⁾를 적용하여 건조시간을 계산하였다. 계산은 case 4에서 $P_c=0.1\text{mmHg}$ 와 $T_c=-60^\circ\text{C}$ 그리고 $L=10\text{mm}$ 의 동일조건에서 각각의 수치를 다르게 넣고 계산하여 표 3의 결과를 얻었다.

Table 1 Heat transfer methods and plate conditions

Case	Heat transfer methods	Plate conditions
1	Radiation only to both upper and bottom surfaces	Upper and lower plates at the same temperature and constrained to 30°C
2	Conduction through a film layer at $x=L$: Radiation to upper dried surface	Upper and lower plates at the same temperature, but temperature limited by material constraints T_s and T_m
3	Same as in 2	Upper and lower plates operate at different temperatures limited by material constraints T_s and T_m
4	No radiation to upper dried surface. Otherwise, as 2	Lower plate temperature limited by material melting constraint T_m

Table 2 Parameters values of sublimation drying calculation

Parameter	Garlic
C_{pd} (kJ/kg k)	2.93
C_{pg} (kJ/kg k)	1.6747
C_{pi} (kJ/kg k)	1.9678
C_2	0.5
K_b (kW/m ² k)	0.03
K_r (kW/m k)	0.0021
T^o (°C)	-40.0
T_m (°C)	-10.0
T_s (°C)	30.0
ΔH (kJ/kg)	2791.2
ρ_d (kg/m ³)	333.0
ρ_l (kg/m ³)	1107.0
$D_{w.in}^o$ (kg m/s ³)	$8.729 \times 10^{-7}(T_o + T_s)^{2.334}$
K_w (m ² /s)	$1.4298 \times 10^{-4}(T_o + T_s)^{0.5}$
K_{de} (kW/m k)	$0.68(12.98 \times 10^{-8}P_o + 39.806 \times 10^{-6})$
$P_{wx} = f(T_s)$ (N/m ²)	$133.32 \exp(23.9936 - 2.19\Delta H/T_s)$
P_{wo} (N/m ²)	f(T condenser)
X^o (m)	6×10^{-5}

Table 3 Effect of parameters on sublimation drying time of garlic
(Case 4, $P_c = 0.1\text{mmHg}$, $T_c = -60\text{C}$, $L = 10\text{mm}$)

Parameters	Input values	Sublimation drying time(min)
C_{pd} (KJ/kg K)	2.93	138.63
	2.595	138.04
C_{pg} (KJ/kg K)	1.6747	138.63
	1.5	137.93
C_{pi} (KJ/kg K)	1.9678	138.63
	1.8	139.55
C_2	0.5	138.63
	0.6	137.91
K_b (KW/m ² K)	0.03	138.63
	0.04	138.63
T^o (°C)	-40.0	138.63
	-20.0	138.54
T_m (°C)	-5.0	103.39
	-10.0	138.63
	-15.0	192.91
T_s (°C)	10.0	138.63
	30.0	138.63
$D_{w.in}^o$ (kg m/s ³)	$8.729 \times 10^{-7}(T_o + T_s)^{2.334}$	138.63
	$1.729 \times 10^{-7}(T_o + T_s)^{2.334}$	138.63
K_w (m ² /s)	$1.4298 \times 10^{-4}(T_o + T_s)^{0.5}$	138.63
	$1.6395 \times 10^{-4}(T_o + T_s)^{0.5}$	138.63
K_{de} (KW/m K)	$0.68(12.98 \times 10^{-8}P_o + 39.806 \times 10^{-6})$	138.63
	$1.335(12.98 \times 10^{-8}P_o + 39.806 \times 10^{-6})$	138.63

즉, C_{pd} 와 C_{pr} 그리고 C_{pv} 의 비열을 일반 식품류의 동결건조 적용값으로 계산한 경우와 마늘에 적용된 값과의 건조시간 차이는 매우 적게 나타났고, 온도의 함수로 계산되어지는 $D''_{w,in}$ 와 K_w 는 동일 건조시간으로 계산되었다. 그리고 K_{de} 도 승화건조시간에 미치는 영향이 없으므로 보여 건조층의 열확산계수가 동결건조에서 승화시간에 미치는 영향이 대단히 낮았음을 알 수 있었다. 또한 T^* 와 T_s 는 승화시간에 영향을 주지않았고 T_m 에 따른 승화시간 차이는 크게 나타났음을 알 수 있어 $T_x \leq T_m$ 의 제한조건에 따라 T_p 가 제어되면서 열유속이 변하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 식품산업체에서 주어진 피건조물의 동결건조시간을 단축하는데에는 건조기구에 관련되는 모든 물성값 가운데 용융온도의 영향이 가장 크므로 피건조물의 농도를 낮추는 방안이 건조공정 중에 검토되어야 한다.

나. 제어변수별 승화건조시간의 계산

4가지의 열전달 방법에서 건조실의 압력(P_c)과 응축기 온도(T_c), 그리고 마늘층의 두께별(L)로 승화건조시간을 예측하기 위하여 표 2의 변수값을 적용시켜 건조시간을 계산한 바 표 4와 같았다.

즉, case 1은 다른 어떤 case에서 보다 건조시간이 가장 긴 case로 나타났으며 P_c 와 T_c 가 높을수록 길게 계산되었다. case 2는 열전달 방법 가운데 두번째로 좋은 경우로 나타났고, 두께별로는 L=2mm 와 3mm는 P_c 가 높고, L=10mm에서는 P_c 가 낮을수록 그리고 L=5mm는 $P_c=0.4$ mmHg에서 건조시간이 짧은것으로 계산되었다. case 3은 4가지의 case가운데 건조시간이 가장 짧은 경우로 계산되어 바람직한 열전달 방법으로 나타났다. case 3을 T_p 의 제어방법만을 달리

Table 4 Sublimation drying times on various operational conditions of garlic

(units : min)

Case	Chamber pressure (mmHg)	Condenser temperature (°C)	Sample thickness			
			2mm	3mm	5mm	10mm
1	0.1	-60	120.83	187.39	336.81	773.25
		-50	123.00	191.27	342.40	782.84
		-40	129.32	200.69	356.88	808.67
	0.6	-60	121.93	188.62	337.21	770.19
		-50	123.78	191.89	342.11	778.26
		-40	130.07	200.81	355.27	801.32
	1.0	-60	123.06	190.25	338.04	769.34
		-50	125.27	192.75	342.15	776.58
		-40	130.77	201.16	354.79	797.95
2	0.1	-60	8.69	16.42	36.92	129.36
		-50	8.70	16.51	37.13	131.19
		-40	8.82	16.73	37.82	137.12
	0.25	-60	8.50	16.06	36.43	134.97
		-50	8.51	16.13	36.64	136.85
		-40	8.64	16.37	37.34	142.99
	0.4	-60	8.30	15.75	36.06	140.65
		-50	8.31	15.83	36.32	142.59
		-40	8.43	16.05	37.19	148.91
	0.6	-60	8.08	15.38	36.14	148.26
		-50	8.11	15.45	36.50	150.30
		-40	8.19	15.66	37.87	156.89
	0.8	-60	7.86	15.04	37.62	155.95
		-50	7.89	15.13	38.15	158.06
		-40	7.96	15.36	39.88	164.91
	1.0	-60	7.67	14.81	39.55	163.67
		-50	7.70	14.87	40.12	165.88
		-40	7.78	15.11	41.90	172.98

한 case 2와 비교할 때 P_c 가 낮고, L 이 얇을수록 건조시간 감소율은 증가되어 $L=2\text{mm}$ 에서 74.1%의 감소효과를 보였으나, L 이 두꺼워지면서 그 비율은 낮아져 $L=10\text{mm}$ 에서는 3.3%인 것으로 나타났다. case 4는 복사 열전달이 없는 경우의 건조방법으로 가장 짧게 계산된 case 3와 비교할 때 11~17%의 건조시간 증가율을 보였으며 이는 3~5mm의 두께 범위에서 두꺼울수록 비율은 증가하였지만 10mm에서는 가장 낮은 증가율로 계산되었다.

그림 5는 열전달 방법에서 마늘즙의 두께가 승화건조시간에 미치는 관계를 알아 보기 위하여 표 4의 결과 가운데 $P_c=0.6\text{mmHg}$ 와 $T_c=-$

60°C 조건에서의 계산결과를 그림으로 표시한 것이다. case 1은 두께가 두꺼울수록 건조시간이 일률적으로 증가하였고 건조시간도 가장 긴 case이었다. case 2와 case 3 그리고 case 4에서는 $L=2\text{mm}$ 와 3mm 에서 건조시간의 차이가 매우 적게 계산되었으나 $L=10\text{mm}$ 에서는 case 3 > case 2 > case 4의 순으로 짧게 계산되어 다소의 차이를 보였다. 이는 열전달 방법과 T_p 의 제어방식을 고려할 때 위의 계산 순서가 예측되었으나 같은 내용으로 나타났으며, 또한 T_p 의 제어방식을 동일시하고 열전달 방법을 달리한 case 2와 case 4에서 건조시간의 차이가 적게 나타났음은 복사에 의한 승화열 유속이 낮았음을 시사하고

Table 4 (cont)

Case	Chamber pressure (mmHg)	Condenser temperature ($^\circ\text{C}$)	Sample thickness			
			2mm	3mm	5mm	10mm
3	0.1	-60	4.99	11.25	31.29	125.24
		-50	5.05	11.39	31.69	126.81
		-40	5.25	11.84	32.94	131.87
	0.25	-60	5.17	11.65	32.41	129.73
		-50	5.23	11.79	32.81	131.32
		-40	5.44	12.25	34.09	136.16
	0.4	-60	5.33	12.05	33.52	134.16
		-50	5.42	12.19	33.94	135.79
		-40	5.62	12.67	35.25	141.08
	0.6	-60	5.57	12.56	34.99	140.02
		-50	5.64	12.72	35.41	141.69
		-40	5.85	13.20	36.75	147.14
	0.8	-60	5.81	13.08	36.43	145.81
		-50	5.87	13.24	36.86	147.54
		-40	6.09	13.74	38.26	153.12
	1.0	-60	6.03	13.60	37.86	151.54
		-50	6.10	13.76	38.29	153.32
		-40	6.32	14.27	39.73	159.04
4	0.1	-60	5.53	12.49	34.86	138.63
		-50	5.59	12.65	35.34	140.53
		-40	5.84	13.20	36.94	146.81
	0.25	-60	5.77	13.06	36.25	144.91
		-50	5.88	13.23	36.95	146.91
		-40	6.13	13.80	38.35	153.36
	0.4	-60	6.06	13.63	38.02	151.18
		-50	6.13	13.81	38.34	153.23
		-40	6.39	14.39	39.97	159.89
	0.6	-60	6.40	14.39	39.91	159.47
		-50	6.46	14.57	40.44	161.59
		-40	6.75	15.19	42.14	168.50
	0.8	-60	6.72	15.13	41.97	167.69
		-50	6.81	15.34	42.52	169.87
		-40	7.08	15.95	44.29	177.07
	1.0	-60	7.06	15.86	44.25	175.83
		-50	7.14	16.07	44.58	178.10
		-40	7.42	16.73	46.41	185.56

있고, 이는 복사 열전달에 의한 case 1의 건조시간이 다른 경우에 비하여 매우 길게 계산되었음과 동일한 결과를 얻어 본 프로그램의 모델해석이 적합함을 확인할 수 있었다. 그리고 T_p 의 제어방식을 달리한 case 2 와 case 3와의 관계에서는 두께가 두꺼울수록 case 3의 건조시간이 짧게 나타나 $L=10\text{mm}$ 의 경우 8.24분 빨리 건조되는 것으로 계산되었다. 그러나 일반 식품업체에서 10~15mm의 두께로 적재하여 건조하고 있는 점을 고려할 때 상, 하 플레이트의 별도제어 방식인 case 3이 이론적인 면에서는 바람직스럽지 만 현실적으로는 case 2의 방식이 대량생산용에 좋은 것으로 사료되었다.

5. 결론

동결건조에서 최적의 건조방법을 구명하기 위하여 피건조물의 물성값과 건조 제어변수가 승화건조시간에 미치는 영향을 알아 보았다. 마늘을 승화건조모델로 선정하고 이에 몇 가지의 가정을 통해 건조시간을 예측할 수 있도록 프로그램을 만든 후 여러조건에서 건조시간을 계산한 바, 물성값 가운데 피건조물의 용융온도가 건조시간에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 계산되었고 승화열의 공급 및 제어방식으로는 전도 및 복사열전달 방법에서 상, 하 플레이트를 별도 제어하는 방식이 가장 좋은 것으로 나타났다.

6. 기호설명

- C_p : 비 열(kJ/kg K)
- C_2 : 다공 매질의 구조상수
- $D_{w,in}$: 수증기와 불활성 가스와의 상호확산 계수(kg m/s^3)
- $f(T_s)$: 승화면의 압력(N/m^2)
- K : 열전도 계수(kW/m K)
- K_1, K_2, K_3, K_4 : 확산 상수

- K_b : 접촉면의 열전달 계수($\text{kW/m}^2 \text{K}$)
 - K_w : Knudsen 확산계수(m^2/s)
 - L : 시료 두께(m)
 - M : 분자량
 - N_i : 총 유속($\text{kg/m}^2 \text{sec}$)
 - $N_{s,i}, N_{m,i}$: 수증기와 불활성 가스의 유속($\text{kg/m}^2 \text{sec}$)
 - P : 압력(N/m^2)
 - P_c : 건조실 압력
 - Q : 열 유속(kW/m^2)
 - R : 가스 상수
 - S : 형상 계수
 - T : 온도
 - t : 시간(min)
 - $T_{L,p}, T_{U,p}$: 아랫면과 윗면의 플레이트 온도($^{\circ}\text{C}$)
 - V : 경계면의 속도
 - X : 경계면의 위치
 - α : 열확산 계수
 - ΔH : 승화 엔탈피(kJ/kg)
 - ρ : 밀도(kg/m^3)
 - σ : Stefan-Boltzmann 상수
- 상 첨 자
- o : 초기값
- 하 첨 자
- b : 바닥면
 - c : 응축기
 - d : 건조층
 - e : 유효 계수
 - f : 동결층
 - g : 가스
 - in : 불활성 가스
 - L : $x = L$ 의 값
 - m : 녹는점
 - o : 표면에서의 값
 - p : 플레이트
 - s : 열화점
 - w : 수증기
 - x : 경계면의 값

참고 문헌

1. King, C. J. 1971. Freeze Drying of Foods. CRC Press. Ohio.
2. 小林正和. 1988. 凍結乾燥による食品の開発. 食品と開発. 23(9) : 32-37.
3. 小林正和. 1980. 醫藥品製造と凍結乾燥技術. 製劑と機械 17 : 16-19.
4. Cox, C. C. and D. F. Dyer. 1972. Freeze-drying of spheres and cylinders. J. of Heat Transfer. ASME. Feb : 57-63.
5. Sandall, O. C., King, C. J. and C. R. Wilke. 1967. The relationship between transport properties and rates of freeze drying of poultry meat. AIChE J. 13(3) : 428-438.
6. Liapis, A. I. and R. J. Litchfield. 1979. Optimal control of a freeze dryer-I : Theoretical development and quasi steady state analysis. Chemical Engineering Science. 34 : 975-981.
7. Meo, D. and J. C. Friedly. 1973. Optimal control of a radiant heat freeze drying process. AIChE symposium series. 69(132)
8. Gunn, R. D. 1967. Mass transport in porous media as applied to freeze-drying. ph. D. thesis. University of California. Berkeley.
9. Evans III, R. B., Waston, G. M. and E. A. Mason. 1962. Gaseous diffusion in porous media. II. Effect of pressure gradients. J. of Chemical Physics. 36(7) : 1894-1902.
10. International Mathematics and Statics Library(IMSL). 1989. Math/Library. IMSL Inc. U. S. A.
11. 이희명. 1989. 마늘의 동결건조 특성. 충북대학교 박사학위논문.
12. Okos. M. R. 1986. Physical and Chemical Properties of Food. ASAE : 43-83.
13. Siebel. J. E. 1982. Specific Heat of Various Products. Ice Refrig. 2 : 256-257.
14. Liapis. A. I. and R. J. Litchfield. 1979. Numerical solution of moving boundary transport problems in finite media by orthogonal collocation. Computers and Chemical Engineering. 3 : 615-621.



學位取得

姓 名 : 金基鐵
 生 年 月 日 : 1956年 3月 4日
 取得學位名 : 農學博士
 學位授與大學 : 日本, 鳥取大學(돗토리 대학)
 學位取得年月日 : 1993年 3月 26日
 學位論文 : Studies on the optimization of mechanized farming system and the mechanized planting of Baker's garlic on sand dune field.

