

당근의 동결건조에서 승화건조시간 예측연구

박노현·김병삼·배신철*

한국식품개발연구원, *단국대학교

Prediction of Sublimation Drying Time for Carrot in Freeze-Drying

Noh-Hyun Park, Byung-Sam Kim and Sin-Chul Bae

Korea Food Research Institute

*Department of Mechanical Engineering, Dankook University

Abstract

A sublimation model of the freeze drying process, which accounted for the removal of free water, was presented and used to study the operation conditions of freeze driers for carrot juice. It was found that the shortest drying time was obtained when the condenser temperature and chamber pressure were kept at their lowest values and the plate temperature was controlled independently so that the scorch and melting constraints were both held throughout the drying period. The effect of sample thickness on the drying time was significant. Optimal policies were investigated experimentally in laboratory freeze dryer.

Key words: freeze drying, sublimation model, dried layer, frozen layer, carrot

서 론

동결건조(Freeze-Drying)는 식품, 의약 그리고 제약 등의 원료를 동결된 상태에서 승화와 탈수에 의해 불이나 용매류가 증기로 바뀌게 하는 건조기법으로, 저온과 진공이 사용되고 있다. 동결상태에서 건조가 이루어지므로 건조 후에도 품질의 열화현상이 적고, 향기성분의 손실이 적으며, 다공성 구조로 남기 때문에 복원성도 우수하다. 반면에 건조속도가 늦고, 건조비용이 타 건조기법에 비해 고가인 점이 큰 문제로 대두되고 있다. 건조속도가 늦은 이유는 낮은 열과 물질 전달속도 그리고 다른 인자들에 의한 저항증가에 기인된 것으로 많은 사람들에 의해 연구되어 왔다^(1,2). 건조초기에는 피건조물의 열전달 저항과 응축기로의 물질 유속저항이 적기 때문에 건조속도가 빠르지만 건조가 진행되면서 건조층(dried region)이 다공성으로 되어, 열유속에 단열효과를 형성하며 주위에 높은 물질저항을 갖게 된다.

동결건조 공정에는 예비동결(pre-freezing)과 승화건조(sublimation drying) 그리고 탈습건조(desorption drying)로 구분짓고 있고, 건조시간을 최소화 하기 위한 제어변수로는 열전달 방법과 수증기 기력(driving force)에 영향을 주는 건조실 압력과 응축기 온도, 그리고 피건조물의 무게를 들 수 있고, 운전 제한조건으로는 품질

열화온도와 용융온도를 들 수 있다. 승화와 탈습 건조 시간은 피건조물에 따라 다르게 나타나고 있으며, 승화의 경우는 피건조물내에 함유된 수분 가운데 유리수(free water)를 제거하는 구간으로 보통 총 수분의 65~90%를 제거하게 되며, 탈습건조는 결합수(bound water)를 제거하는 구간이다.

동결건조는 경계조건이 경계층이 이동하고 제어변수가 많으며, 피건조물의 물성치 측정이 어렵기 때문에 최적의 건조방법과 소요시간을 예측하는 데는 어려움이 따르기 때문에 많은 실험을 통하여 건조적정 조건이 구명되어 왔다. 이에 Cox 등⁽³⁾과 Sandall 등⁽⁴⁾은 쇠고기와 칠면조고기를 유사 정상상태 모델로 해석하고, 승화면의 위치와 온도 그리고 건조시간을 실측치와 비교하였고, Liapis 등⁽⁵⁾과 Meo 등⁽⁶⁾은 동결건조 동안 비정상상태의 열 및 물질전달을 수학적 모델화 하였으며, Cho 등⁽⁷⁾은 복사열전달에 의한 동결층 소멸속도와 온도분포를 수식으로 전개하는 등 제어변수와 물성치 그리고 열전달 방법 등을 단순화시킨 방법에서 연구가 되어 왔다.

따라서 본 연구는 동결건조에서 건조시간을 최소화하기 위하여 증발 수분량이 많고, 건조실의 제어로 건조속도를 증대시킬 수 있는 승화 건조시간에 대하여 건조모델을 설정하고 모든 제어변수, 즉 열전달 방식, 진공도와 응축기 온도 그리고 시료두께 등을 적용할 수 있는 수식으로 전개하고 당근을 건조 대상으로 선정하고, 이를 소형 컴퓨터에서 계산, 예측하였다. 또한 실험용 동결건조기에서 당근을 여러가지 조건으로 건조하여 승화건조 특성을 구명하고, 실험값과 수치해석값과를 비

Corresponding author: Noh-Hyun Park, Korea Food Research Institute, San 46-1, Baek Hyun Dong, Bundang-Gu, Seongnam-Si, Kyonggi-Do, Republic of Korea

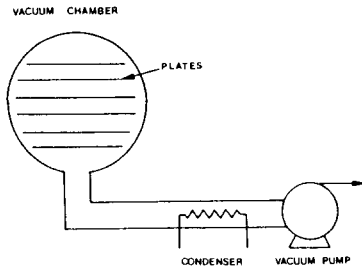


Fig. 1. Schematic of standard freeze-drying equipment

교하여 예측모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

재료 및 방법

열 및 물질전달 방정식

Fig. 1은 동결건조기를 구성하고 있는 요소들 도식화한 것으로, 건조실내의 플레이트는 피건조물을 올려놓고 동결과 승화에 필요한 열을 공급하여 주는 장치이고, 진공펌프는 피건조물의 증발온도를 낮추기 위하여 건조실내의 공기를 제거하는 것으로 건조 초기부터 종료시까지 운전된다. 또한 진공하에서 증발된 수증기는 체적 팽창이 대단히 크기 때문에 이를 열음으로 응축되도록 저온용의 응축장치가 부착되어 있다. Fig. 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, 수증기는 건조층을 통하여 유동되며, 다공성 매질내의 세포질과 주위가스는 열적평형이다. 그리고 동결층은 균일물질이고, 물성치도 동일하며, 바닥용기의 열전달 저항은 무시한다.

이상의 가정을 통하여 건조층(D)과 동결층(F)에서의 에너지 및 물질 평형관계를 유도하면 다음의 식 (1)과 (2)의 열전달 방정식을 얻을 수 있다⁽⁶⁾.

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = -N_i \frac{C_{pg}}{\rho_{dg} C_{pdr}} \frac{\partial T_d}{\partial x} + \alpha_{dc} \frac{\partial^2 T_d}{\partial x^2}, \quad (0 \leq x \leq X) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \alpha_{fc} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}, \quad (X \leq x \leq L) \quad (2)$$

초기와 경계조건은

$$T_d = T_f = T^0 \quad \text{at } t=0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3)$$

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

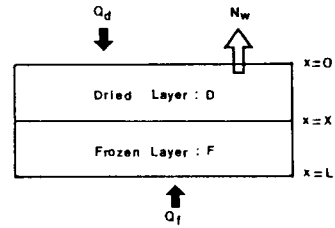


Fig. 2. Schematic of sample during freeze-drying

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

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

이며, 또한 건조층에서 복사 열전달이 있을 경우는

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

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

$$Q_f = \sigma S(T_{lf}^4 - T_{ll}^4) \quad (8)$$

이 되고, 완전 열접촉이라면

$$T_{lf} = T_{lf} \quad (9)$$

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

$$Q_f = K_b(T_{lp} - T_{ll}) \quad (10)$$

이 된다.

또한 Interface에서의 에너지 평형관계는

$$K_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - K_{dc} \frac{\partial T_d}{\partial x} + V(\rho_i C_{pi} T_i - \rho_d C_{pd} T_d) + N_i C_{pg} T_d = -\Delta H N_i \quad \text{at } x=X \quad (11)$$

이 되고 동결층의 소멸속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{dX(t)}{dt} = - \frac{N_i}{\rho_i - \rho_d} \quad (12)$$

식 (1), (2) 및 (11) 등에서 열전달 관계식의 완전해를 구하기 위하여서는 N_i 에 관한 값을 먼저 구하여야 되며, 식 (12)에서 $X(t)$ 의 시간에 대한 함수가 주어지면 V 를 시간함수로 알 수 있다.

따라서 동결층의 소멸속도 V 는 식 (12)에서 ρ_i 와 ρ_d 가 일정한 값으로 주어지므로 건조층에서의 물질전달량 N_i 를 구하면 계산할 수 있고, 이를 시간에 대해 적분하므로써 $X(t)$ 를 찾을 수 있다.

건조층에서 수증기와 불활성 기체에 대한 방정식을 연속방정식과 이상 기체식으로부터 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{RT_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} - \frac{P_w}{RT_w^2} \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} \right) + \frac{\partial N_w}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{1}{RT_{in}} \frac{\partial P_{in}}{\partial t} - \frac{P_{in}}{RT_{in}^2} \left(\frac{\partial T_{in}}{\partial t} \right) + \frac{\partial N_{in}}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

식 (13), (14)에서 온도의 시간에 대한 편미분은 다른 항목에 비하여 작은 값을 갖으므로 무시할 수 있고, $T_w = T_{in} = T_d$ 이므로 아래 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial P_w}{\partial t} = -RT \frac{\partial N_w}{\partial x} \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial t} = -RT \frac{\partial N_{in}}{\partial x} \quad (16)$$

Evans 등⁽⁸⁾의 확산식과 D'Arcy의 점성 흐름식⁽⁹⁾에 의하여 N_w 와 N_{in} 은 아래와 같이 전개된다.

$$N_w = -\frac{1}{RT} \left[K_1 \frac{\partial P_w}{\partial x} + K_2 P_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x} + \frac{\partial P_{in}}{\partial x} \right) \right] \quad (17)$$

$$N_{in} = -\frac{1}{RT} \left[K_3 \frac{\partial P_{in}}{\partial x} + K_4 P_{in} \left(\frac{\partial P_{in}}{\partial x} + \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \right] \quad (18)$$

수학적 모델의 가정으로부터, 수증기와 불활성 기체는 건조층을 통하여 유동하고 불활성 기체의 유동 효과는 무시할 수 있으므로⁽⁶⁾ 식 (17), (18)은 다음과 같이 간단히 만들 수 있다.

$$N_w = -\frac{1}{RT} \left(K_1 \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \quad (19)$$

$$N_w = -\frac{1}{RT} \left(\frac{C_2 D_{w,in}^0 K_w}{C_2 D_{w,in}^0 + K_w P_w} \right) \frac{dP}{dx} \quad (20)$$

따라서 전체 질량유속 N_t 는

$$N_t = N_w = -\frac{C_2 D_{w,in}^0 K_w M_w}{RTX(C_2 D_{w,in}^0 + K_w P_w)} (P_{wx} - P_{wn}) \quad (21)$$

여기서 P_{wx} 는 경계면 온도의 함수로 표시할 수 있고, 표면온도와 경계면 온도의 산술 평균값은 확산계수 $D_{w,in}^0$ 와 Knudsen coefficient K_w 를 계산하는데 사용되고 있다⁽⁶⁾.

방정식의 변환

식 (1)의 경계조건을 항시 1이 되도록 고정시키면 직교좌표(orthogonal collocation)의 수치해는 간단한 방법으로 얻을 수 있으므로⁽¹⁰⁾ 경계면 $X(t)$ 를

$$\xi = \frac{x}{X(t)} \quad 0 \leq x \leq X \quad (22)$$

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

$$Q_t = K_L \left(\frac{T_{it} - T_X}{L - X} \right) \quad (23)$$

식 (22)로부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial T_d}{\partial x} \right)_t = \frac{1}{X} \left(\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right)_t \quad (24)$$

$$\left(\frac{\partial T_d}{\partial x^2} \right)_t = \frac{1}{X^2} \left(\frac{\partial^2 T_d}{\partial \xi^2} \right)_t \quad (25)$$

$$\left(\frac{\partial T_d}{\partial t} \right)_x = \left(\frac{\partial T_d}{\partial t} \right)_\xi - \frac{\xi}{X} \frac{dX}{dt} \left(\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right)_t \quad (26)$$

식 (1)과 (4)를 위식에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_d}{\partial t} = & \frac{\alpha_{in}}{X^2} \left(\frac{\partial^2 T_d}{\partial \xi^2} \right) \\ & + \frac{1}{X} \left(\xi \frac{dX}{dt} - \frac{N_t C_{p,c}}{\rho_{ic} C_{p,dre}} \right) \left(\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right) \quad 0 \leq \xi \leq 1 \end{aligned} \quad (27)$$

$$Q_d = -\frac{K_{dr}}{X} \left(\frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right) \quad \text{at } \xi=0, t > 0 \quad (28)$$

이 되고, 식 (11)은

$$\begin{aligned} K_L \left(\frac{T_{it} - T_X}{L - X} \right) - \frac{K_{dr}}{X} \frac{\partial T_d}{\partial \xi} + V(\rho_i C_{p,i} - \rho_o C_{p,o}) T_X \\ + N_t C_{p,c} T_X = -\Delta H N_t \quad \text{at } \xi=1, t \geq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

으로 변형시킬 수 있다.

수치 계산

앞에서 정리된 승화모델의 기본 수식 (27)은 미분방정식의 여러가지 유형중 초기 조건에 관한 문제로, Jacobi polynomials의 stiff differential equations이다. 이런 형태의 문제를 해석하는 데는 Gear method가 사용되고 있으며, 이는 IMSL/MATH의 IVPAG routine에 수록되어 있어 이를 이용할 수 있었다⁽¹¹⁾. 프로그램의 언어는 포트란으로 구성하였고, 모델해석의 흐름도는 Fig. 3과 같으며, 프로그램 가운데에는 재료의 물성값과 건조방법 등을 입력할 수 있도록 Defpara 부 프로그램과 직교배열점을 행렬로 바꾸고 각 배열점의 1차 및 2차 미분값을 계산하기 위하여 Jcobi와 Discrt 부 프로그램을 사용하였다. 따라서 Table 1과 Table 2의 열전달 방법과 재료에 대해 특성치를 입력함으로써 건조시간을 계산, 예측할 수 있도록 작성하였다. 즉, Table 1의 4가지 열전달 방식에 따라 진공도와 응축기 온도 그리고 재료 두께별로 각각의 승화 건조시간을 해석하였다. 수치계산에 사용된 변수값은 계산 또는 문헌에서 인용^(1,12, 14) 하였다.

실험재료 및 장치

건조실험에 사용된 재료는 수분함량 87.5%(wet basis

기준)의 당근(Daucus carota L., var. sativa)이었으며, 이는 물 세척 후 절단하여 만능분쇄기(GFM-350B, 금성 Co.)에서 착즙한 후, 30 mesh의 체를 통과시켜 얻은 즙을 사용하였다. 건조장치로는 마이크로 처리장치가 부착된 연구개발용 동결건조기(CD-6, Denmark Heto Co. 91년형)로 예비동결과 건조를 일괄 처리할 수 있었으며 건조중에 시료 무게를 연속적으로 측정할 수 있었다. 또한

진공은 10^{-3} torr까지 얻을 수 있었고, 진공도는 정확히 조절할 수 있는 제어시스템이 부착되었으며, 상, 하의 플레이트는 동일온도로 제어되었고 온도범위는 -60°C 에서 $+90^{\circ}\text{C}$ 까지 조절이 가능하였다. 온도의 측정은 $0.3\text{ mm}\Phi$ 의 동-콘스탄탄의 열전대를 16 channels의 온도기록장치(Grant 1200 series)에 연결 사용하였다. 그리고 샘플 용기는 $\text{Al}(60\text{ mm}\Phi)$ 으로 제작하고 6개의 열전대를 부착시켜 두께별 온도변화를 측정할 수 있었고, 용기의 측면은 열전달이 없도록 단열재 처리를 하였다.

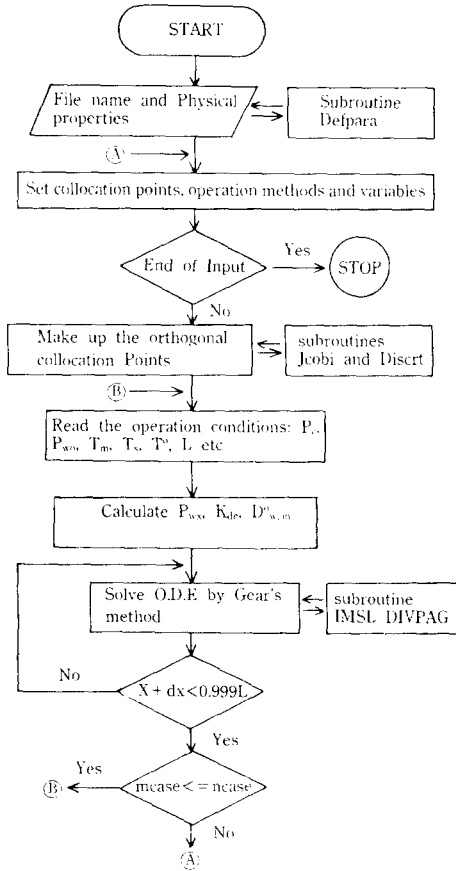


Fig. 3. Flow chart for computer solution of model equations

승화 건조시간과 승화량의 측정

승화 건조시간은 당근을 용기에 담아 -40°C 로 고루 동결시킨 후, 건조실의 진공도(P)가 설정치에 이르렀을 때 플레이트 온도(T_0)를 가열하기 시작하여 당근의 바닥 온도(T_1)가 0°C 되는 기간까지를 측정하였고⁽¹⁵⁾, 승화량은 당근의 T_1 가 초기 동결온도에서 0°C 까지의 중량감소량을 측정하여 단위 면적당으로 환산하였다.

Table 2. Parameters values of freeze-drying calculation

Parameter	Carrot
$C_{pd}(\text{kJ/kg K})$	2.597
$C_{pw}(\text{kJ/kg K})$	1.6747
$C_{pi}(\text{kJ/kg K})$	1.936
C_2	0.5
$K_{11}(\text{kW/m}^2 \text{K})$	0.03
$K_1(\text{kW/m K})$	0.0021
$T^o(\text{K})$	233.15
$T_m(\text{K})$	268.15
$T_c(\text{K})$	323.15
$\Delta H(\text{kJ/kg})$	2791.2
$\rho_a(\text{kg/m}^3)$	131.7
$\rho_i(\text{kg/m}^3)$	1035
$D_{m,m}(\text{kg m/s}^2)$	$8.729 \times 10^{-7}(T_c + T_m)^{2.334}$
$K_w(\text{m}^2\text{s})$	$1.4298 \times 10^{-4}(T_c + T_m)^{0.5}$
$K_{dc}(\text{kW/m K})$	$0.68(12.98 \times 10^{-8} P_c + 39.806 \times 10^{-6})$
$P_{w,s} = f(T_c)(\text{N/m}^2)$	$133.32 \exp(23.9936 - 2.19\Delta H/T_c)$
$P_{w,i}(\text{N/m}^2)$	$f(T \text{ condenser})$
$P_c(\text{N/m}^2)$	$f(P \text{ chamber})$
$X^o(\text{m})$	6×10^{-5}

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 50°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_c and T_m
3	Same as in 2	Upper and lower plates operate at different temperatures limited by material constraints T_c and T_m
4	No Radiation to upper dried surface. Otherwise, as 2	Lower plate temperature limited by material melting constraint T_m

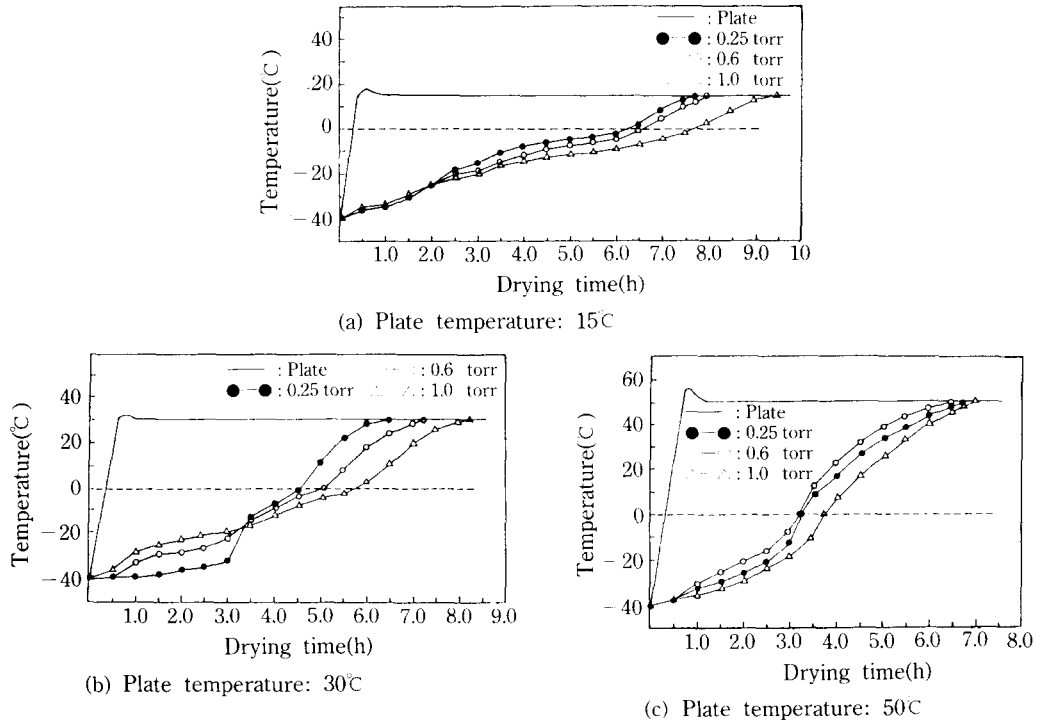


Fig. 4. Profiles of bottom temperature during freeze-drying of carrot for various pressures and plate temperatures (L=10 mm)

결과 및 고찰

당근의 승화건조 특성

착습된 당근의 승화건조 특성을 규명하기 위하여 10 mm 두께(L)의 당근칩을 플레이트 위에 올려놓고 -40℃로 동결한 후, 응축기 온도(T)를 -60℃로 설정하고 P_c와 T_p를 변화하면서 T_b의 온도를 측정하여 Fig. 4의 (a)와 (b) 그리고 (c)와 같았다.

T_b가 초기 동결온도 -40℃에서 0℃까지 상승되는 승화 건조구간을 T_b별로 보면 T_p=15℃인 (a)에서는 승화시간이 0.25 torr에서 378 min, 0.6 torr는 388 min, 그리고 1.0 torr는 462 min이 소요되었고, T_p=30℃인 (b)에서는 0.25 torr에서 265 min, 0.6 torr는 301 min, 그리고 1.0 torr는 352 min이 걸렸다. 또한 T_p=50℃인 (c)에서는 0.25 torr에서 190 min, 0.6 torr는 192 min, 그리고 1.0 torr에서는 225 min으로 나타나 P_c가 낮고, T_p가 높을수록 승화 건조시간이 짧았음을 알 수 있었고, 특히 0.25 torr와 0.6 torr와의 승화 건조시간 차이는 적었으나, 1.0 torr와는 큰 차이를 보였다. 이는 Dyer 등⁽¹⁶⁾이 건조실 압력을 낮을수록 단위시간당 승화 건조량을 증가시킬 수 있고, Saravacos⁽¹⁷⁾는 피건조물의 제한온도 범위내에서 열 공급량을 많이 할수록 건조시간을 단축할 수 있다고 보고한 것과 동일한 결과를 얻었다.

Table 3은 P_c와 T_p 그리고 당근칩의 두께(L)를 서로

Table 3. Comparison of sublimation drying time for carrot between experimental results and predicted ones in case 2 (at T_c= -60℃) (unit : min)

Chamber pressure (Torr)	Plate temperature (C)	Sample thickness			Predicted values at L=10 mm, T _c = -60℃
		3 mm	5 mm	10 mm	
0.25	15	95	158	378	252
	30	83	113	265	
	50	52	78	190	
0.4	15	95	171	382	273
	30	85	117	278	
	50	54	83	191	
0.6	15	96	174	388	303
	30	86	122	301	
	50	55	85	192	
0.8	15	96	189	410	333
	30	88	125	339	
	50	57	93	214	
1.0	15	98	190	462	365
	30	89	138	352	
	50	57	100	225	

다르게 변화하면서 Fig. 4와 같은 방식으로 건조하여 얻은 승화 건조시간이었고, 또한 실험방법과 열전달 방식이

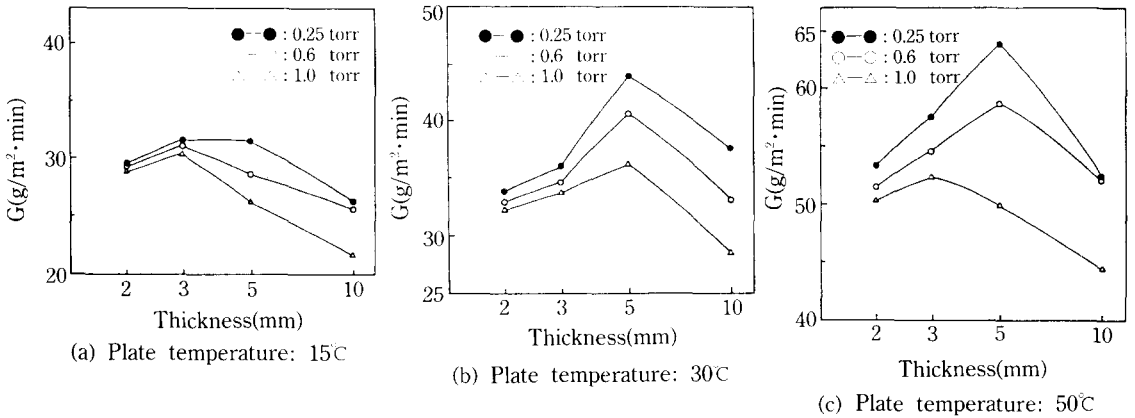


Fig. 5. Sublimation drying rate of carrot for various pressures, thicknesses and plate temperature (at $T_c = -60^\circ\text{C}$)

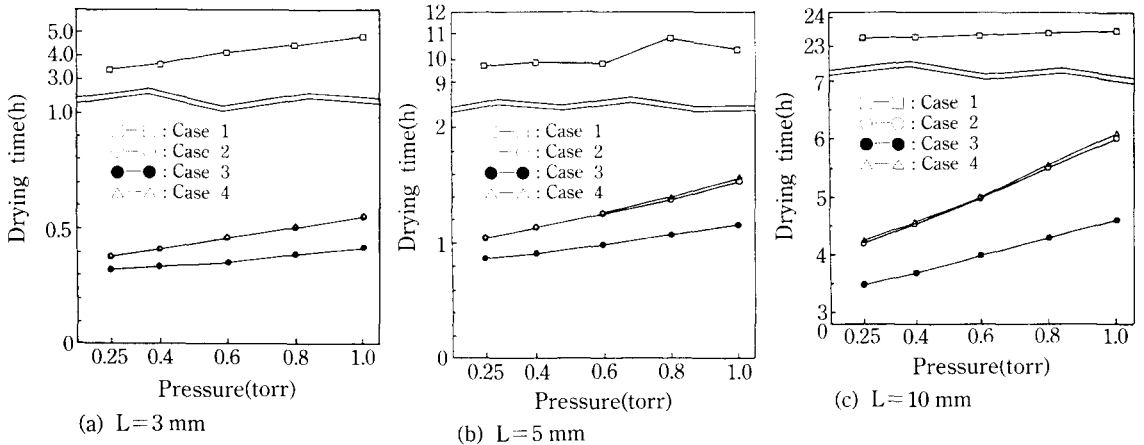


Fig. 6. Sublimation drying time of carrot for heat transfer methods (at $T_c = -60^\circ\text{C}$)

유사한 case 2에 $L=10\text{ mm}$ 를 $T_c = -60^\circ\text{C}$ 에서 당근즙의 변수값인 Table 2를 적용시켜 예측한 결과이었다. 즉, 동일한 두께에서 P_p 가 낮고 T_p 가 높을수록 승화 건조시간은 짧았고, 수치계산에서도 P_p 가 낮을수록 짧은 것으로 나타났다. 수치계산에서 T_{up} 와 T_{lp} 그리고 T_s 의 최대온도를 50°C 로 주었지만 실험값의 $T_p=50^\circ\text{C}$ 에서 운전된 값과 일치하지 않고 $T_p=30^\circ\text{C}$ 의 값과 유사한 것은 예측값이 승화 경계면 온도가 녹는 점보다 낮고($T_s \leq T_m$), 표면온도가 품질 열화온도 보다 낮도록($T_s \leq T_s$) 제한조건을 T_{up} 와 T_{lp} 에 부여한 반면 실험값은 일정한 승화열($T_p = \text{const}$)을 공급하도록 운전되었기 때문이고, 또한 $x=0$ 에서 $x=L$ 까지 건조가 진행되면서 건조층의 생성으로 건조층에서의 물질전달 저항이 발생되므로 T_{up} 와 T_{lp} 의 최대온도 50°C 가 승화열에 사용되지 않고, 30°C 의 부근에서 건조가 된 것으로 사료된다.

Fig. 5의 (a)와 (b) 그리고 (c)는 T_p 와 P_p 그리고 L 에서의 단위면적당 당근즙의 승화량(G)을 측정된 것으로, 동일 조건에서 T_p 가 높고, P_p 가 높고, P_p 가 낮을수록 G 는

높은 값을 얻었으며, $T_p=15^\circ\text{C}$ 에서는 $L=3\text{ mm}$, 그리고 $T_p=30^\circ\text{C}$ 와 50°C 에서는 $L=5\text{ mm}$ 의 경우에서 G 값이 가장 높은 경향을 보였다.

당근의 승화건조시간 예측

Fig. 6의 (a)와 (b) 그리고 (c)는 열전달 방법 4가지의 경우에 대하여 $T_c = -60^\circ\text{C}$ 에서 P 와 L 를 여러가지로 설정하고 $T_s \leq T_m$ 와 $T_s \leq T_s$ 그리고 T_{up} 와 T_{lp} 를 운전온도 50°C 이하 조건에서 Table 2의 변수를 이용하여 당근즙의 승화 건조시간을 수치계산한 것으로, $L=3\text{ mm}$ 인 (a)에서 case 1으로 운전할 때 3.4~4.7시간이 예측되었고, case 2와 case 4는 0.38~0.6시간 그리고 case 3에서는 0.33~0.42시간으로 계산되었으며, $L=5\text{ mm}$ 인 (b)에서는 case 1이 9.7~10.5시간이, case 2와 case 4는 1~1.5시간 그리고 case 3은 0.9~1.2시간이 예측되었다. 또한 $L=10\text{ mm}$ 인 (c)에서는 case 1이 23시간, case 2와 case 4는 4.2~6.1시간 그리고 case 3은 3.5~4.6시간이 예측되어 모든 P 와 L 에서 case 3의 경우가 가장 짧은

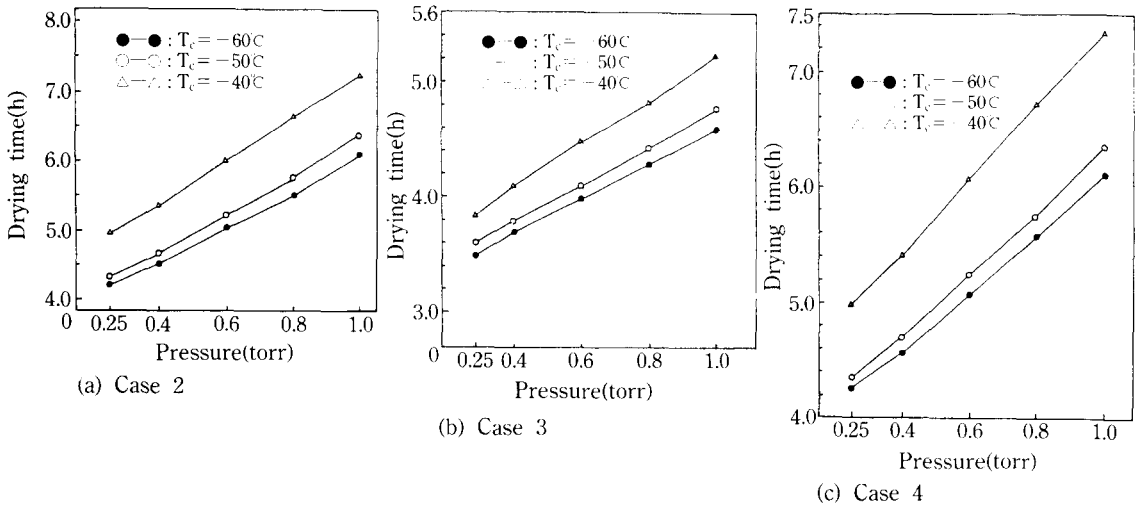


Fig. 7. Predicted time of sublimation drying for carrot on various pressures and condenser temperatures (at L=10 mm)

승화시간을 얻을 수 있었고, 그 다음이 case 2, case 4 그리고 case 1의 순으로 나타났다. 특히 case 1은 다른 어느 경우보다 승화시간이 대단히 길게 보였고, case 2와 case 4는 비슷한 시간을 보였다. 이는 양면 복사방식인 case 1이 플레이트 온도를 50℃ 까지로 제한, 설정되었기 때문에 열전달량이 너무 낮았던 것으로 사료되었고, case 2와 case 4의 경우가 비슷한 값을 얻은 것은 전도와 복사 열전달 방식의 case 2에서 복사 열전달 효과가 낮았음에 case 1의 결과를 고려할 때 case 4와 같이 전도열에 의하여 승화가 주로 이루어졌기 때문이다. 또한 $T_c \leq T_m$ 와 $T_c \leq T_s$ 의 제한조건하에서 플레이트 상, 하 온도를 동일 온도로 제어하는 case 2와 온도를 다르게 제어한 case 3과는 별도 제어방식인 case 3의 경우가 좋았음을 알 수 있다. 따라서 승화건조 효율이 가장 좋은 열전달 방식으로는 전도 및 복사 방식으로 상, 하 플레이트를 별도 제어하여 운전하는 경우이다.

Fig. 7의 (a)와 (b) 그리고 (c)는 T_c 가 승화건조에 미치는 영향을 알아보기 위하여 L=10 mm의 당근즙을 5가지의 P_c 에서 T_c 를 변화하면서 case 2와 case 3 그리고 case 4로 운전하여 승화 건조시간을 예측한 것으로 동일한 P_c 에서 T_c 가 낮을수록 승화 건조시간은 짧은 것으로 나타났고, P_c 가 높아짐에 따라 승화 건조시간은 각각의 case에서 일률적으로 증가되는 경향을 보였다. 이는 T_c 가 낮아짐에 따라 물질전달을 위한 기력 즉, P_c 와 P_0 의 차가 증가하기 때문에 승화량이 증가되는 것으로 판단된다. 특히 $T_c = -60^\circ\text{C}$ 와 $T_c = -50^\circ\text{C}$ 는 동일 P_c 에서 승화시간의 차이가 적게 나타났으나 $T_c = -40^\circ\text{C}$ 와는 큰 차이를 보여 당근의 경우 $T_c = -50^\circ\text{C}$ 에서 건조함이 효율적이다.

동결건조에서 승화 건조시간을 예측하기 위하여 수학적 모델링과 지배방정식을 설정하고, 당근즙을 대상으로 수치계산하여 실험값과 비교한 바, 수분함량이 많은 동결건조품에서 단위면적당 승화량을 높일 수 있는 재료의 두께는 전도 열전달 방식에서 5 mm이었으며, 양면 복사방식에서는 10 mm이었다. 또한 동일한 압력에서 응축기 온도가 낮을수록 당근즙의 승화시간은 짧았고, 압력이 높을수록 승화시간은 선형적으로 증가하였다. 그리고 동결건조 효율이 가장 좋은 열전달 방법으로는 전도 및 복사방식으로 상, 하의 플레이트 온도를 $T_c \leq T_m$ 와 $T_c \leq T_s$ 의 제한 조건하에서 별도 제어하는 방식이었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 특정연구개발 사업의 일환으로 (주)일신 엔지니어링과 공동으로 수행된 것입니다.

기호설명

- C_p : 비열(kJ/kg K)
- C_2 : 다공 매질의 구조상수
- $D^*, D_{v,m}$: 수증기의 불활성 가스의 상호 확산계수 (kg m/s³)
- $f(T_c)$: 수증기압과 온도와의 함수(Table 2) (N/m²)
- G : 승화량
- K : 열전도계수(kW/m K)
- K_1, K_2, K_3, K_4 : 확산 상수
- K_b : 접촉면의 열전달 계수(kW/m² K)
- K_{ns} : Knudsen 확산계수(m²/s)
- L : 시료 두께

요 약

- M : 분자량
- N_r, N_w : 총 질량과 수증기 유속($\text{kg/m}^2 \text{ sec}$)
- P : 압력
- P_c : 건조실 압력
- Q : 열 유속(kW/m^2)
- R : 가스 상수
- S : 형상 계수
- T : 온도
- t : 시간
- $T_{\text{tip}}, T_{\text{up}}$: 아랫면과 윗면의 플레이트 온도
- V : 경계면의 속도
- X : 경계면의 위치
- α : 열확산 계수
- ΔH : 승화 엔탈피(kJ/kg)
- ρ : 밀도(kg/m^3)
- σ : Stefan-Boltzmann 상수

상첨자

- o : 초기값

하첨자

- e : 유효 계수
- g : 가스
- d : 건조층
- f : 동결층
- L : $x=L$ 의 값
- c : 응축기
- p : 플레이트
- w : 수증기
- in : 불활성 가스
- m : 녹는점
- s : 열화점
- b : 바닥면
- o : 표면에서의 값
- x : 경계면의 값

문 헌

1. Kang, C.J.: Freeze drying of foods. CRC Press, Cleveland, Ohio (1971)
2. Harper, J.C. and Tappel, A.L.: Freeze drying of foods-

- tuffs. *Advances in Food Research Academic Press, New York*, 7, p.171(1957)
3. Cox, C.C. and Dyer, D.F.: Freeze-drying of spheres and cylinders. *J. Heat Transfer, Transactions of the ASME*, Feb, **94**, 57(1972)
4. Sandall, O.C., King, C.J. and Wilke, C.R.: The relationship between transport properties and rates of freeze-drying of poultry meat. *AIChE J.*, **13**(3), 428(1967)
5. Liapis, A.I. and Litchfield, R.J.: Optimal control of a freeze dryer. I. Theoretical development and quasi steady state analysis. *Chemical Engineering Science*, **34**, 975(1979)
6. Meo, D. and Friedly, J.C.: Optimal control of a radiant heat freeze drying process. *AIChE symposium series*, **69**(132), 55(1973)
7. Cho, S.H. and Sunderland, J.E.: Approximate solution for rate of sublimation-dehydration of foods. *Transactions of the ASAE*, **13**(5), 559(1970)
8. Evans III, R.B., Waston, G.M. and Mason, E.A.: Gaseous diffusion in porous media. II. Effect of pressure gradients. *J. Chemical Physics*, **36**(7), 1894(1962)
9. Gunn, R.D. and King, C.J.: Mass transport in porous materials under combined gradients of composition and pressure. *AIChE J.*, **15**(4), 507(1969)
10. Liapis, A.I. and Litchfield, R.J.: Numerical Solution of moving boundary transport problems in finite media by orthogonal collocation. *Computers and Chemical Engineering*, **3**, 615(1979)
11. International Mathematics and Statics Library(IMSL): Math/Library IMSL, Inc. U.S.A (1989)
12. Millman, M.J., Liapis, A.I. and Marchello, J.M.: Guidelines for desirable operation of batch freeze driers during the removal of free water. *J. Food Technology*, **19**, 725(1984)
13. Okos, M.R.: Physical and chemical properties of food. *ASAE*, p.56(1986)
14. Siebel, J.E.: Specific heat of various product. *Ice Refrig.*, **2**, 256(1982)
15. Mellor, J.D.: Fundamentals of freeze-drying, Academic Press, New York, p.11(1978)
16. Dyer, D.F. and Sunderland, J.E.: Heat and mass transfer mechanisms in sublimation dehydration. *J. Heat Transfer, Transaction of the ASME*, **90**, 379(1968)
17. Saravacos, G.D.: Freeze-drying rates and water sorption of model food gels. *Food Technology*, **19**, 625 (1965)

(1992년 11월 25일 접수)