

(論 文)

## 승화 건조모델에 대한 운전방법별 건조시간의 예측

박노현\* · 배신철\*\*

(1992년 11월 24일 접수)

### Prediction of the Drying Time under the Various Operational Conditions using a Sublimation Model

Noh Hyun Park and Sin Chul Bae

**Key Words :** Freeze-Drying(동결건조), Sublimation Model(승화모델), Free Water(유리수) Dried Layer(건조층), Frozen Layer(동결층)

#### Abstract

A mathematical model of freeze drying by sublimation was suggested and used to estimate the drying time. Under the various conditions, the drying time of pure water and carrot was numerically calculated for the suggested model. Optimal policies of freeze drying were investigated experimentally in a laboratory freeze dryer. It was found that the shortest drying times could be obtained when the chamber pressure and condenser temperature were kept at their lowest values and the best method of heat transfer for sublimation was the conduction involving radiation. The sublimation drying period was finished when the bottom temperature of material could be reached at near 0°C from frozen temperature.

#### 기 호 설 명

$C_p$ : 비열 (kJ/kg K)	$P_o$ : 건조실 압력
$C_2$ : 다공 매질의 구조상수	$Q$ : 열유속 (kW/m <sup>2</sup> )
$D_w, in$ : 수증기와 불활성가스와의 상호확산계수 (kg m/s <sup>3</sup> )	$R$ : 가스상수
$f(T_x)$ : 승화면의 압력 (N/m <sup>2</sup> )	$S$ : 형상계수
$K$ : 열전도계수 (kW/m K)	$T$ : 온도
$K_1, K_2, K_3, K_4$ : 확산상수	$t$ : 시간 (min)
$K_b$ : 접촉면의 열전달계수 (kW/m <sup>2</sup> K)	$t_e$ : 실험에 의한 승화시간 (min)
$K_w$ : Knudsen 확산계수 (m <sup>2</sup> /s)	$t_n$ : 수치계산에 의한 승화시간 (min)
$L$ : 시료두께 (m)	$T_{Lp}$ : 아래면의 플레이트 온도
$M$ : 분자량	$T_{up}$ : 위면의 플레이트 온도
$N_t$ : 총 유속 (kg/m <sup>2</sup> sec)	$V$ : 경계면의 속도
$N_w$ : 수증기 유속 (kg/m <sup>2</sup> sec)	$X$ : 경계면의 위치
	$\alpha$ : 열확산계수
	$\Delta H$ : 승화 엔탈피 (kJ/kg)
	$\rho$ : 밀도 (kg/m <sup>3</sup> )
	$\sigma$ : Stefan-Boltzmann 상수

\*정회원, 단국대학교 기계공학과 대학원

\*\*정회원, 단국대학교 기계공학과

상첨자

$o$  : 초기값

하첨자

$b$  : 바닥면

$c$  : 응축기

$d$  : 건조층

$e$  : 유효계수

$f$  : 동결층

$g$  : 가스

$in$  : 불활성가스

$L$  :  $x=L$ 의 값

$m$  : 녹는점

$o$  : 표면에서의 값

$p$  : 플레이트

$s$  : 열화점

$w$  : 수증기

$x$  : 경계면의 값

### 1. 서 론

동결건조(freeze-drying)는 식품, 의약 그리고 제약 등의 원료를 동결된 상태에서 승화와 탈습에 의해 물이나 용매류가 증기로 바뀌는 건조기법으로, 저온과 진공이 사용되고 있다. 동결상태에서 건조가 이루어지므로 건조 후에도 품질의 열화현상이 적고, 향기성분의 증발이 적으며, 다공성 구조로 남기 때문에 복원성도 우수하다. 반면에 건조속도가 늦고, 건조비용이 타 건조기법에 비해 고가인 점이 큰 문제로 대두되고 있다. 건조속도가 늦은 이유는 열과 물질전달 그리고 다른 인자들에 의한 저항증가에 기인된 것으로 많은 사람들에 의해 연구되어 왔다.<sup>(1,2)</sup> 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 구분되어 있고, 건조시간을 최소화하기 위한 제어변수로는 열전달방법과 수증기 기력(driving force)에 영향을 주는 건조실 압력과

응축기 온도 그리고 피건조물의 두께를 들 수 있고, 운전 제한조건으로는 품질 열화온도와 용융온도를 들 수 있다. 승화와 탈습건조기간은 피건조물에 따라 다르게 나타나고 있으며, 승화의 경우는 피건조물내에 함유된 수분 가운데 유리수(free water)를 제거하는 구간으로 보통 총 수분의 65~95%를 제거하게 되며, 탈습건조는 결합수(bound water)를 제거하는 구간이다.

동결건조는 경계조건이 경계이동(moving boundary)이고, 제어변수가 많으며, 피건조물의 물성치 측정이 어렵기 때문에 최적의 건조방법과 소요시간을 예측하는데는 어려움이 따르기 때문에 많은 실험을 통하여 건조 적정조건이 구명되어 왔다. 이에 Cox 등<sup>(3)</sup>과 Sandall 등<sup>(4)</sup>은 쇠고기 와 칠면조고기를 유사 정상상태 모델로 해석하고, 승화면의 위치와 온도 그리고 건조시간을 실측치와 비교하였고, Lipis 등<sup>(5)</sup>과 Meo 등<sup>(6)</sup>은 동결건조동안 비정상상태의 열 및 물질전달을 수학적으로 모델화 하였으며, 이<sup>(7)</sup>는 전도 열전달방식에서 마늘즙에 대한 동결층의 소멸속도와 건조시간을 예측하는 등 제어변수와 물성치 그리고 열전달방법 등을 단순화시켜 연구가 진행되어 왔다.

본 연구는 동결건조에서 건조시간을 최소화하기 위하여 건조실의 제어로 건조속도를 증대시킬 수 있고 수분증발량이 많은 승화 건조기간에 대하여 건조모델을 설정하고, 건조장치에서의 모든 제어변수인 열전달방식과 건조실의 압력 그리고 응축기 온도와 시료두께 등이 적용될 수 있도록 수식으로 전개하고 이를 소형 컴퓨터에서 건조시간을 계산, 예측할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. 또한 실험용 동결건조기에서 순수물과 당근을 여러가지 조건으로 건조하여 승화건조 특성을 구명하고, 실험값과 예측값과를 비교하여 최적의 건조조건을 구명하였다.

### 2. 이론 해석

#### 2.1 열 및 물질전달 방정식

Fig. 1은 해석을 위하여 설정한 모델로,  $x=0$ 의 위면에서  $Q_d$ 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

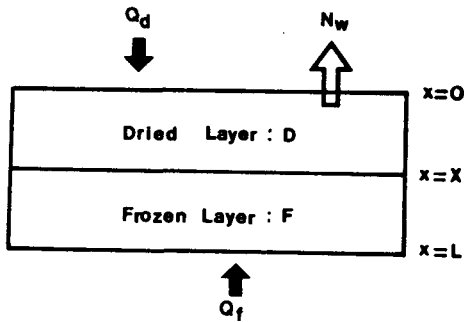


Fig. 1 Schematic of sample during freeze-drying

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 열적 평형이다. 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.

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

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

초기와 경계조건은

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

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

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

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

이며, 또한 건조층에서 복사 열전달이 있을 경우는

$$Q_d = \sigma S (T_{wp}^4 - T_{d,o}^4) \quad \text{at } X=0, t > 0 \quad (7)$$

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

$$Q_f = \sigma S (T_{LP}^4 - T_{f,L}^4) \quad (8)$$

이 되고, 완전 열접촉이라면

$$T_{f,L} = T_{LP} \quad (9)$$

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

$$Q_f = K_b (T_{LP} - T_{f,L}) \quad (10)$$

이 된다. 여기서 열전달계수  $K_b$ 의 값은 Carslaw와 Jaeger<sup>(8)</sup>가 제시한 식을 추정하면 저압조건에서 적절하게 사용될 수 있다.

또한 승화경계면에서의 에너지 평형관계는

$$K_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - K_{de} \frac{\partial T_d}{\partial x} + V (\rho_f C_{pf} T_f - \rho_a C_{pa} T_d) + N_t C_{pg} T_d = -\Delta H N_t \quad \text{at } x=X \quad (11)$$

이 되고 동결층의 소멸속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{dX(t)}{dt} = -\frac{N_t}{\rho_f - \rho_a} \quad (12)$$

식(1), (2) 및 식(11) 등에서 열전달 관계식의 완전해를 구하기 위하여서는  $N_t$ 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  $\rho_f$ 와  $\rho_a$ 가 일정한 값으로 주어지므로 건조층에서의 물질전달량  $N_t$ 를 구하면 계산할 수 있고, 이를 시간에 대해 적분하므로써  $X(t)$ 를 찾을 수 있다.

건조층에서 수증기와 불활성 기체에 대한 방정식을 연속방정식과 이상기체식으로부터 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 가지므로 무시할 수 있고,<sup>(9)</sup>  $T_w = T_{in} = T_d$ 이므로 아래식과 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<sup>(10)</sup>의 확산식과 D'Arcy의 점성흐름식<sup>(11)</sup>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 유동효과는 무시할 수 있으므로<sup>(5)</sup> 식(17), (18)은 다음과 같이 간단히 만들 수 있다.

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

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

따라서 전체질량 유속  $N_t$ 는

$$\begin{aligned} N_t &= N_w \\ &= -\frac{C_2 D_{w,in}^0 K_w M_w}{RT X (C_2 D_{w,in}^0 + K_w P_o)} (P_{wx} - P_{wo}) \end{aligned} \quad (21)$$

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.<sup>(5)</sup>

### 2.2 방정식의 변환

식(1)의 경계조건을 항상 1이 되도록 고정시키면 직교좌표(orthogonal collocation)의 수치해는 간단한 방법으로 얻을 수 있으므로<sup>(12)</sup> 경계면  $X(t)$ 를

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

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

$$Q_f = K_f \left( \frac{T_{f,L} - T_x}{L - X} \right) \quad (23)$$

식(22)로부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

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

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

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

식(1)과 (4)를 위식에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_d}{\partial t} &= \frac{\alpha_{de}}{X^2} \left( \frac{\partial^2 T_d}{\partial \xi^2} \right) + \frac{1}{X} \left( \xi \frac{dX}{dt} - \frac{N_t C_{pg}}{\rho_{de} C_{pde}} \right) \left( \frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right) \\ & \quad 0 \leq \xi \leq 1 \end{aligned} \quad (27)$$

$$Q_d = -\frac{K_{de}}{X} \left( \frac{\partial T_d}{\partial \xi} \right) \quad \text{at } \xi=0, T < 0 \quad (28)$$

이 되고, 식(11)은

$$\begin{aligned} K_f \left( \frac{T_{f,L} - T_x}{L - X} \right) - \frac{K_{de}}{X} \frac{\partial T_d}{\partial \xi} + V(\rho_f C_{pf} - \rho_d C_{pd}) T_x \\ + N_t C_{pg} T_x = -\Delta H \quad N_t \quad \text{at } \xi=1, t \geq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

으로 변형시킬 수 있다.

### 2.3 수치계산

앞에서 정리된 승화모델의 기본수식은 미분방정식의 여러가지 유형중 초기 조건에 관한 문제로, Jacobi polynomials의 stiff differential equations이다. 이런 형태의 문제를 해석하는데는 Gear method가 사용되고 있으며, 이는 IMSL/MATH의 IVPAG routine에 수록되어 있어 이를 이용할 수 있었다.<sup>(13)</sup> 프로그램의 언어는 포트란으로 구성하였고, 계산을 위한 프로그램의 흐름도는 Fig. 2

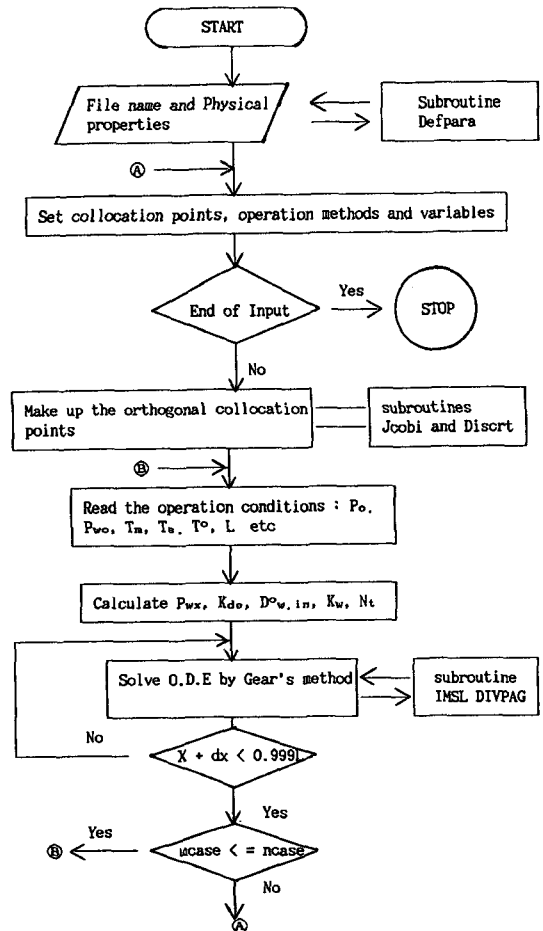


Fig. 2 Flow chart for computer solution of model equations

와 같으며, 프로그램 가운데에는 재료의 물성값과 건조조건 등을 입력할 수 있도록 Defpara 부 프로그램과 직교 배열점을 행렬로 바꾸고 각 배열점의

1차 및 2차 미분값을 계산하기 위하여 Jcobi와 Discrt 부 프로그램을 사용하였다. 승화 건조시간의 계산은  $x=0$ 에서부터 시작하여 시간증분  $dt$ 를

**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 $T_s$ and $T_m$
3	Same as case 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 case 2	Lower plate temperature limited by material melting constraint $T_m$

**Table 2** Parameters values of sublimation drying calculation

Parameter	Ice	Carrot
$C_{pd}$ (kJ/kg K)	0	2.597
$C_{pg}$ (kJ/kg K)	1.6747	1.6747
$C_{pf}$ (kJ/kg K)	1.93	1.936
$C_z$	0.5	0.5
$K_o$ (kW/m <sup>2</sup> K)	0.03	0.03
$K_f$ (kW/m <sup>2</sup> K)	0.00188	0.0021
$T^o$ (K)	228.15	228.15
$T_m$ (K)	273.15	268.15
$T_s$ (K)	323.15	323.15
$\Delta H$ (kJ/kg)	2838	2791.2
$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.0	131.7
$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	920	1035
$D_{w,in}^o$ (kg m/s <sup>3</sup> )	$8.729 \times 10^{-7} (T_o + T_x)^{2.334}$	$8.729 \times 10^{-7} (T_o + T_x)^{2.334}$
$K_w$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.4298 \times 10^{-4} (T_o + T_x)^{0.5}$	$1.4298 \times 10^{-4} (T_o + T_x)^{0.5}$
$K_{de}$ (kW/m K)	$0.68 (12.98 \times 10^{-8} P_o + 39.806 \times 10^{-6})$	$0.68 (12.98 \times 10^{-8} P_o + 39.806 \times 10^{-6})$
$P_{wx} = f(T_x)$ (N/m <sup>2</sup> )	$133.32 \exp(23.9936 - 2.19 \Delta H / T_x)$	$133.32 \exp(23.9936 - 2.19 \Delta H / T_x)$
$P_{wo}$ (N/m <sup>2</sup> )	$f(T \text{ condenser})$	$f(T \text{ condenser})$
$X^o$ (m)	$6 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$

0.03초로 두고  $dt$ 증가에 따른 승화면의 이동거리  $dx$ 를 반복계산하면서  $X+dx$ 가 재료의 두께  $L$ 의 99.9%에 이르렀을때 종료되도록 구성하였다. 따라서 Table 1의 4가지 열전달방법과 Table 2의 물과 당근에 대한 변수값 그리고 건조실의 압력, 응축기 온도 및 재료의 두께를 입력함으로서 각각의 건조시간이 계산, 예측될 수 있도록 작성하였다. 수치 계산에 사용된 Table 2의 변수값은 계산 또는 인용<sup>(8,14~16)</sup>하였다.

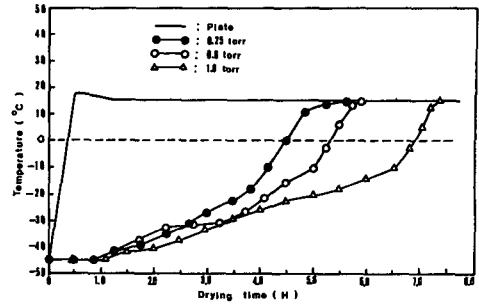
### 3. 실험

건조실험에 사용된 재료는 순수물과 당근(수분함량 : 87.5%)이었으며, 당근은 착즙후 30 mesh 체를 통과시켜 사용하였다. 건조장치로는 마이크로 처리장치가 부착된 연구 개발용 동결건조기(CD-6, Denmark Heto Co. 91년형)로 예비동결과 건조를 일괄 처리할 수 있었으며 건조중에 시료 무게를 연속적으로 측정할 수 있었다. 또한 진공은  $10^{-3}$ torr 까지 얻을 수 있었고, 진공도는 정확히 조절할 수 있는 제어시스템이 부착되었다. 온도의 측정은 0.3 mm $\phi$ 의 동-콘스탄탄의 열전대를 16 channels의 온도기록장치(Grant 1200 series)에 연결 사용하였다.

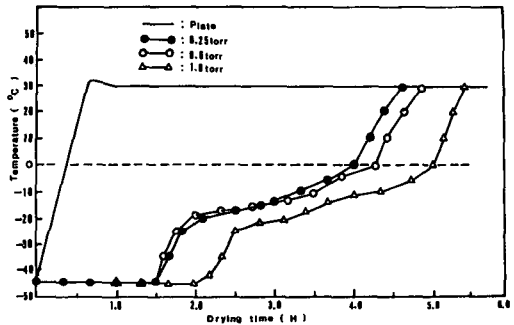
### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 물의 승화건조 특성

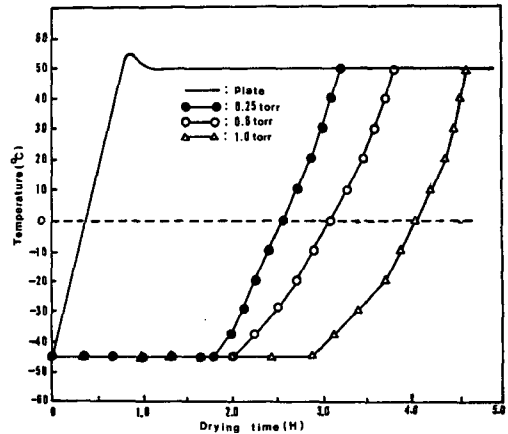
Fig. 3의 (a), (b) 및 (c)는 건조층이 발생되지 않는 순수물에 대하여 승화건조 특성을 알기 위하여 응축기 온도( $T_c$ )를  $-60^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, 건조실 압력( $P_0$ )과 플레이트 온도( $T_p$ )를 서로 다르게 변화하면서 10 mm 두께( $L$ )의 물을 건조하면서 바닥층 온도( $T_b$ )를 측정하였다. 물은 일반 건조재료와는 달리 탈습건조 구간이 없고 승화건조 구간만을 갖고 있으며, 건조과정중에 승화 경계면의 변화를 쉽게 확인할 수 있어 승화건조 실험에 적합한 재료였다. 즉, 물을  $-45^{\circ}\text{C}$ 로 동결시킨 후  $T_p$ 를  $15^{\circ}\text{C}$ 와  $30^{\circ}\text{C}$  그리고  $50^{\circ}\text{C}$ 로 각각 상승시켜 시료의 승화열로 이용하였다. 승화는 얼음의 표면으로부터 일어나기 시작하여 바닥층까지 선형적으로 동결층이 소멸되었고, 승화가 끝나는 시점은  $T_b$ 가  $0^{\circ}\text{C}$  부근에 이르렀을 때 완료되었음을 알 수 있었다. 승화건조시간을  $T_p$ 별로 살펴보면  $T_p=15^{\circ}\text{C}$ 인(a)



(a) Plate temperature :  $15^{\circ}\text{C}$



(b) Plate temperature :  $30^{\circ}\text{C}$



(c) Plate temperature :  $50^{\circ}\text{C}$

Fig. 3 Profiles of bottom temperature during freeze-drying of pure water (at  $L=10$  mm)

의 경우는  $P=0.25$  torr에서 4시간 30분이었고, 0.6torr는 5시간 20분 그리고 1.0 torr에서는 6시간 55분이 소요되었다.  $T_p=30^{\circ}\text{C}$ 인 (b)에서는 4시간, 4시간 10분 그리고 5시간이 각각 걸렸으며,  $T_p=$

**Table 3** Comparison of sublimation drying time for pure water between experimental results and predicted ones in case 2 (at  $T_c = -60^\circ\text{C}$ ) (unit : min)

Chamber pressure (Torr)	Plate temperature ( $^\circ\text{C}$ )	Sample thickness			Predicted values at $L=10\text{ mm}$ $T_c = -60^\circ\text{C}$
		3 mm	5 mm	10 mm	
0.25	15	81	129	270	149
	30	65	106	240	
	50	46	72	152	
0.4	15	84	131	310	164
	30	66	108	245	
	50	49	78	172	
0.6	15	85	135	320	182
	30	66	109	250	
	50	51	81	185	
0.8	15	92	148	390	216
	30	68	117	290	
	50	56	90	220	
1.0	15	95	155	415	256
	30	69	120	300	
	50	58	93	245	

50 $^\circ\text{C}$ 인 (c)에서는 2시간 32분과 3시간 5분 그리고 4시간 5분이 각각 소요되어 플레이트 온도가 높고 건조실 압력이 낮을수록 승화시간은 짧게 나타났다.

Table 3은  $P_0$ 와  $T_p$  그리고 물의 두께( $L$ )를 서로 다르게 변화하면서 Fig. 3과 같은 방식으로 건조하여 얻은 승화 건조시간이었고, 또한 실험방법과 열전달 방식이 유사한 case 2에  $L=10\text{ mm}$ 를  $T_c = -60^\circ\text{C}$ 에서 물의 변수 값인 Table 2를 적용시켜 계산, 예측한 것이다. 즉, 동일한 두께에서  $P_0$ 가 낮고  $T_p$ 가 높을수록 승화 건조시간이 짧았음을 실험값에서 알 수 있었고, 수치계산에서도  $P_0$ 가 낮을수록 짧은 것으로 나타났다. 이는 Dyer 등<sup>(17)</sup>이 건조실 압력을 낮게 할수록 단위 시간당 승화 건조량을 증가시킬 수 있고, Saravacos<sup>(18)</sup>가 피건조물의 제한온도 범위내에서 열 공급량을 많이 할수록 승화 건조시간을 단축할 수 있다고 보고한 것

과 동일한 결과를 얻었다.

#### 4.2 당근의 동결건조 특성

Table 4는  $P_0$ 와  $T_p$  그리고 당근의 두께( $L$ )를 서로 다르게 변화하면서 Fig. 3과 같은 방식으로 건조하여 얻은 승화 건조시간이었으며, 또한 실험방법과 열전달 방식이 유사한 case 2에서  $L=10\text{ mm}$ 의 건조시간을 계산, 예측한 것이다.

즉, 동일한 건조조건에서 당근의 승화 건조시간은 모든 경우에서 물의 승화 건조시간보다 길게 나타났다. 그러나  $P_0$ 가 낮고  $T_p$ 가 높을수록 승화 건조시간은 짧게 나타나  $P_0$ 와  $T_p$ 가 당근의 승화 건조시간에 미치는 영향은 물과 같은 경향을 보였다. 실험에 의한 승화시간( $t_e$ )과 수치계산에 의한 승화시간( $t_n$ )이 가장 근사하였던 플레이트 온도는  $T_p = 30^\circ\text{C}$ 로 건조한 경우로 0.25 torr에서  $t_e = 265\text{ min}$ ,  $t_n = 252\text{ min}$ , 0.6 torr에서는  $t_e = 301\text{ min}$ ,  $t_n = 303$

**Table 4** Comparison of sublimation drying time for carrot between experimental results and predicted ones in case 2 (at  $T_c = -60^\circ\text{C}$ ) (unit : min)

Chamber pressure (Torr)	Plate temperature ( $^\circ\text{C}$ )	Sample thickness			Predicted values at $L=10\text{ mm}$ $T_c = -60^\circ\text{C}$
		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	

min 그리고 1.0 torr에서는  $t_e=352\text{ min}$ ,  $t_n=365\text{ min}$ 이었다. 이들  $t_e$ 와  $t_n$ 과의 오차는 열공급량이 승화시간에 미치는 영향이 지대함을 고려할 때, 실험값은 당근의 제한조건을 고려하지 않고 일정한 승화열( $T_p=\text{const}$ )을 공급한 반면에, 계산값은 승화경계면 온도가 녹는점 보다 낮고( $T_x \leq T_m$ ), 표면온도가 품질 열화온도 보다 낮도록( $T_o \leq T_s$ ) 제한조건을  $T_{up}$ 와  $T_{lp}$ 에 부여하였기 때문으로 사료된다. 또한 물의 경우는 수치계산에서 부여한  $T_{up}$ 와  $T_{lp}$  그리고  $T_s$ 의 최대온도  $50^\circ\text{C}$ 와 동일한 온도( $T_p=50^\circ\text{C}$ )에서 건조된 값과 유사함을 얻었으나, 당근은  $T_p=30^\circ\text{C}$ 에서 건조한 값과 유사함을 보였다. 이는 승화가  $x=0$ 에서  $x=L$ 까지 진행되면서, 물은 건조층이 생성되지 않지만 당근은 시간이 지남에 따라 건조층의 두께가 두껍게 생성되므로 건조층으로부터의 물질전달 저항이 최대온도  $50^\circ\text{C}$ 를 승화열로 사용하지 못하고  $30^\circ\text{C}$ 의 부근에서 건조가 된 것으로 보인다.

**4.3 수치계산에 의한 당근의 동결 건조**

Fig. 4의 (a)와 (b) 그리고 (c)는 열전달 방법 4 가지 경우에서  $P_o$ 와  $L$ 을 여러가지로 선정하고  $T_x \leq T_m$ 와  $T_o \leq T_s$  그리고  $T_p \leq 50^\circ\text{C}$ 의 제한조건하에서 Table 2의 변수값를 이용하여 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  $P_o$ 와  $L$ 에서 case 3의 경우가 가장 짧은 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



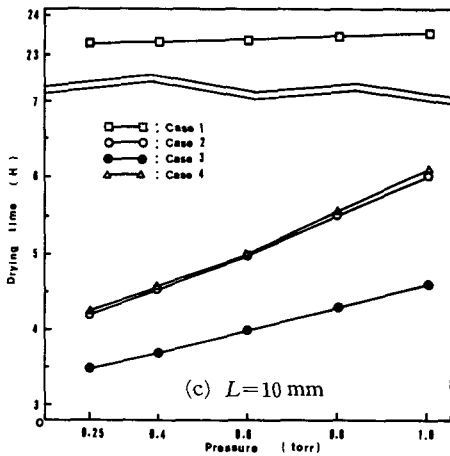
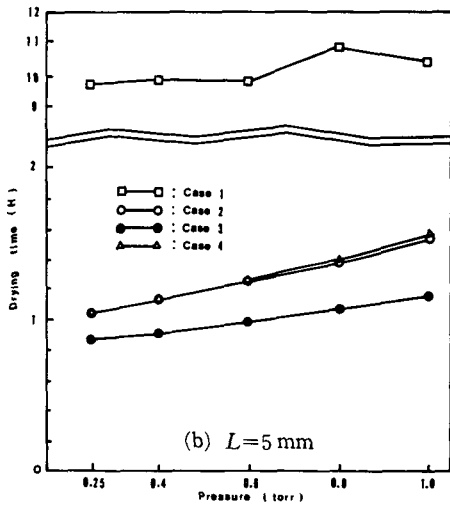
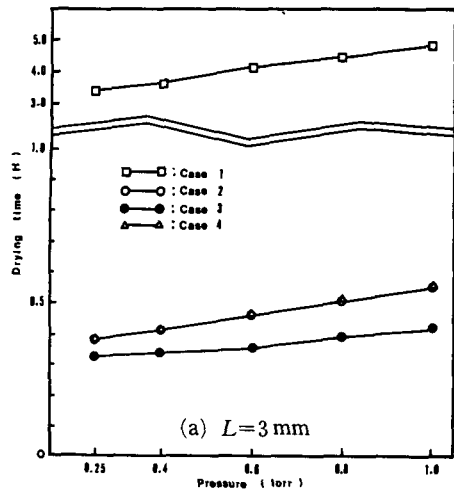


Fig. 4 Comparison of sublimation drying time for carrot with heat transfer methods (at  $T_c = -60^\circ\text{C}$ )

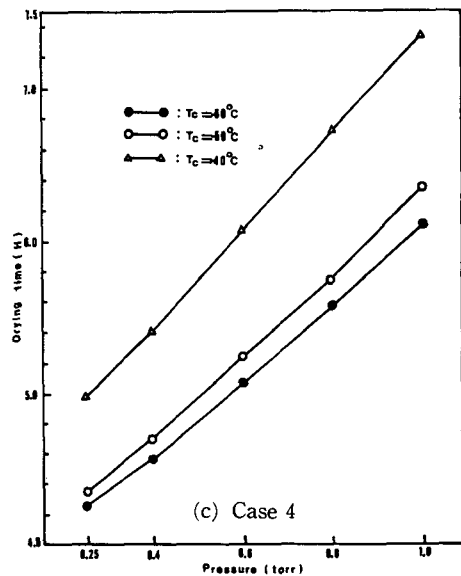
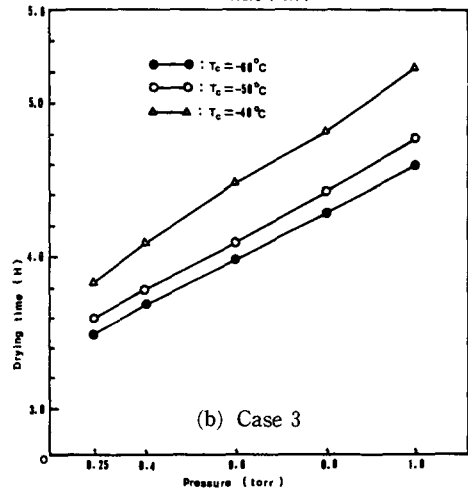
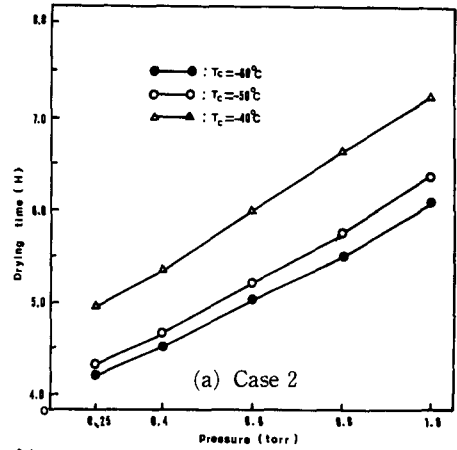


Fig. 5 Predicted time of sublimation drying for carrot on various pressures and condenser temperatures (at  $L=10\text{ mm}$ )

4는 비슷한 시간을 보였다. 이는 양면 복사방식인 case 1이  $T_b \leq 50^\circ\text{C}$ 의 제한조건으로 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 낮았음이 case 1의 결과를 고려할 때 case 4와 같이 전도열에 의하여 승화가 주로 이루어졌기 때문이다. 또한  $T_x \leq T_m$ 와  $T_o \leq T_s$ 의 제한 조건하에서 플레이트 상·하 온도를 동일온도로 제어하는 case 2와 온도를 다르게 제어한 case 3과는 별도 제어방식인 case 3인 경우가 좋았음을 알 수 있다. 따라서 승화건조 효율이 가장 좋은 열전달 방식으로는 전도 및 복사방식으로 상·하 플레이트를 별도 제어하여 운전하는 경우이다.

Fig. 5의 (a)와 (b) 그리고 (c)는  $T_c$ 가 승화건조에 미치는 영향을 알아보기 위하여  $L=10\text{ mm}$ 의 당근을 5가지의  $P_0$ 에서  $T_c$ 를 변화하면서 case 2와 case 3 그리고 case 4로 운전할 경우 승화시간을 예측한 것으로, 동일한  $P_0$ 에서  $T_c$ 가 낮을수록 승화시간은 짧은 것으로 나타났고,  $P_0$ 가 높아짐에 따라 승화시간은 각각의 case에서 일률적으로 증가되는 경향을 보였다. 이는  $T_c$ 가 낮아짐에 따라 물질전달을 위한 기력 즉,  $P_x$ 와  $P_c$ 의 차가 증가하기 때문에 승화량이 증가되는 것으로 판단된다. 특히  $T_c = -60^\circ\text{C}$ 와  $T_c = -50^\circ\text{C}$ 는 동일  $P_0$ 에서 승화시간의 차이가 적게 나타났으나  $T_c = -40^\circ\text{C}$ 와는 큰 차이를 보여 건조장치의 응축기 온도를 낮추는데 소요되는 에너지를 고려할 때  $T_c = -50^\circ\text{C}$ 에서의 당근건조가 효율적이다.

### 5. 결 론

동결건조에서 최적의 건조조건과 승화 건조시간을 예측하기 위하여 수학적 모델링과 지배방정식을 설정하고 순수물과 당근을 대상으로 건조시간을 수치계산한 후, 이를 실험값과 비교하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 얼음의 동결층 소멸은 표면( $x=0$ )에서 바닥층( $x=L$ )으로 평행하게 일어났고, 승화 종료점은  $T_b$ 가  $0^\circ\text{C}$ 부근임을 알 수 있었으며, 승화 건조시간은  $T_b$ 가 높고,  $P_0$ 가 낮을수록 짧았다.

(2) 승화 건조시간이 짧게 계산된 순서는 case 3 > case 2 > case 4 > case 1의 순이었으며 가장 좋은 열전달 방법으로는 상, 하 플레이트 온도를  $T_x \leq$

$T_m$ 와  $T_o \leq T_s$ 의 제한조건에서 별도 제어한 전도 및 복사방식이었다.

(3) 당근의 승화 건조시간은  $P_0$ 와  $T_c$ 를 낮출수록 짧게 나타났고, 동일한  $P_0$ 에서는  $T_c$ 가 높을수록 승화시간은 선형적으로 증가하였다.

### 참고문헌

- (1) King, C. J., 1971, "Freeze Drying of Foods," CRC Press, Cleveland, Ohio.
- (2) Harper, J.C. and Tappel, A.L., 1957, "Freeze Drying of Foodstuffs," Advances in Food Research, Academic Press, New York, Vol. 7, pp. 171~234.
- (3) Cox, C. C. and Dyer, D. F., 1972, "Freeze-Drying of Spheres and Cylinders," J. of Heat Transfer, ASME, Feb, pp. 57~63.
- (4) Sandall, O. C., King, C. J. and Wilke, C. R., 1967, "The Relationship Between Transport Properties and Rates of Freeze-Drying of Poultry Meat," AIChE J., Vol. 13, No. 3, pp. 428~438.
- (5) Liapis, A. I. and Litchfield, R. J., 1979, "Optimal Control of a Freeze Dryer-I: Theoretical Development and Quasi Steady State Analysis," Chemical Engineering Science, Vol. 34, pp. 975~981.
- (6) Meo, D. and Friedly, J. C., 1973, "Optimal Control of a Radiant Heat Freeze Drying Process," AIChE Symposium Series, Vol. 69, No. 132.
- (7) 이희명, 1989, "마늘의 동결건조 특성," 충북대학교 박사학위논문.
- (8) Carslaw, M.S. and Jaeger, J.C., 1989, "Conduction of Heat in Solids," Clarendon Press, Oxford.
- (9) Gunn, R. D., 1967, "Mass Transport in Porous Media as Applied to Freeze-Drying," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- (10) Evans III, R. B., Waston, G.M. and Mason, E. A., 1962, "Gaseous Diffusion in Porous Media. II. Effect of Pressure Gradients," J. of Chemical Physics, Vol. 36, No. 7, pp. 1894~1902.
- (11) D'Arcy, H.P.G., 1856, "Les Fontains Publiques de la Ville de Dijon," Victor Dalmont, Paris.
- (12) Holland, C. D. and Liapis, A. I., 1983, "Computer Method for Solving Dynamic Separation

- Problems," McGraw-Hill Book Company, New York.
- (13) International Mathematics and Statics Library(IMSL), 1989, Math/Library, IMSL, Inc, U. S. A.
- (14) Liapis, A.I. and Litchfield, R. J., 1979, "Numerical Solution of Moving Boundary Transport Problems in Finite Media by Orthogonal Collocation," Computers and Chemical Engineering, Vol. 3, pp. 615~621.
- (15) Okos, M. R., 1986, "Physical and Chemical Properties of Food," ASAE.
- (16) Siebel, J. E., 1982, "Specific Heat of Various Products," Ice Refring., Vol. 2, pp. 256~257.
- (17) Dyer, D. F. and Sunderland, J. E., 1968, "Heat and Mass Tranfer Mechanisms in Sublimation Dehydration," J. Heat Transfer, ASME, Vol. 90, pp. 379~384.
- (18) Saravacos, G. D., 1965, "Freeze-Drying Rates and Water Sorption of Model Food Gels," Food Technology, Vol. 19, pp. 625~629.