

球型物質의 마이크로파 冷凍乾燥에 관한 數値解析

李重樂 · 李壽庚 · 崔 雄

서울대학교 化學工學科

(1983년 2월 22일 접수)

A Numerical Study on Microwave Freeze-Drying of spherical Material

Jung-Lag Lee, Su-Kyung Lee and Ung Choi

Department of Chemical Engineering,

Seoul National University, Seoul 151, Korea

(Received; February 22, 1983)

요 약

마이크로파를 열원으로 하는 냉동건조의 이론적 해석을 위하여 구형물질을 모델로 수치해석을 행하였다. 건조층과 냉동층의 비정상상태 열 및 물질 수지식의 해를 Crank-Nicolson 방법으로 구하였으며 쇠고기의 물성치를 수치해석에 사용하였다.

수치실험의 결과 건조시간은 전기장력(electric field strength)의 증가에 따라서 감소하였으며 진공조의 압력이 5~10 mmHg 일 때 최소 건조시간을 나타내었다. 이와 아울러 진공조의 온도, 수증기의 분압 및 시료의 반지름등도 건조시간에 직접 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

ABSTRACT

Microwave is used as the heat source for freeze-drying process and the unsteady-state behavior of spherical model is analysed numerically. The Crank-Nicolson method is used to solve the transient energy and mass transfer equations in both ice core and dried layer. A mathematical model is used to simulate the freeze-drying of beef meat.

The drying time decreases as the electric field strength increases. The drying time decreases as the pressure of vacuum chamber increases to 5—10 mmHg, at which the minimum drying time occurs. And further increase of the vacuum chamber pressure results in the increase of the drying time. It has also been found that ambient temperature, partial pressure of water vapor in the vacuum chamber, and sample radius directly affect the drying time.

1. 서 론

대부분의 식품 및 유기물을 보존하는 데 있어서 공통적으로 요구되는 것은 물질이 본래 가지고 있던 성질을 변하지 않게 하는 것이다. 냉동 건조는 보존 방법 중에서 가장 우수한 방법으로 특히 열에 민감한 물질을 건조시키는 데 있어서 상업적으로 중요한 건조 공정이며 물질이 건조되는 동안 낮은 온도로 유지되기 때문에 단백질 변성과 같은 비가역적 변화를 최소화할 수 있고 성분과 원형, 특히 맛과 향기 까지도 비교적 그대로 보존된다. 냉동건조는 건조시키려는 물질을 냉동시킨 후 형성된 얼음을 진공하에서 가열 승화시켜, 응축기나 펌프로 제거하는 공정들로 구성되며, 그 현상은 발생한 수증기의 전달과정과 공급되는 열의 열전달 과정으로 해석할 수 있다.

마이크로파를 이용하여 승화열을 공급하는 냉동건조 방식은 1956년 D.A. Copson¹⁾이 실험 방식과 장치를 개발한 이래 Jackson²⁾, Hoover³⁾, Peltre⁴⁾, Ang⁵⁾등이 전도나 복사를 이용하는 냉동건조 방식에 비하여 건조시간을 단축시킬 수 있음을 보였다. 마이크로파 냉동건조에 대한 이론적 연구는 냉동건조 현상에 대한 방정식이 복잡하기 때문에 그 해법으로 수치해석이 시도되어 왔다. 비정상상태에 대한 최초의 연구는 1973년에 1차원 평판 모델을 이용한 Peltre⁴⁾에 의해 도시되었고, 1977년에 T.K. Ang⁵⁾은 anisotropic 물질에 대하여 직교좌표에서의 2차원 모델에 대한 해석을 발표하였다.

본 연구에서는 고가의 냉동건조하려는 물질이 대부분 구형의 입자 형태를 취하는 데도 아직 연구가 미흡하기 때문에 시료의 형태를 중심 대칭인 구형 모델을 사용하였다. 시료 내부의 온도 및 농도 분포를 구하여 냉동건조의 조업조건의 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 이론적 해석

냉동건조하려는 물질은 Fig. 1에서와 같이 중

심 대칭인 구형의 구조로 외부 표면은 온도가 T_{amb} 이고 농도가 C_{amb} 인 진공조에 노출되어 있다. 건조가 진행됨에 따라 동결층과 건조층간의 경계면은 구면(spherical surface)의 형태로 유지되면서 안으로 축소되어 들어가며 경계면에서 승화된 수증기는 다공성 건조층을 통해 확산되어 진공조로 이동된다. 건조층에서 발생한 열은 전도와 대류에 의해 전달되며 동결층에서 발생한 열은 전도에 의해 경계면으로 전달된다. 본 모델의 비정상상태의 열 및 물질수지식은 다음과 같다.

1) 건조층

(i) 열 전달

$$\frac{\partial^2 T_D}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} + \frac{C_{PW} D}{k_D} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \frac{\partial T_D}{\partial r} + \frac{C_{PW} D}{k_D} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) T_D + \frac{w_D}{k_D} = \frac{1}{\alpha_D} \frac{\partial T_D}{\partial t} \quad (1)$$

(엔탈피의 기준온도는 0°C)

(ii) 물질 전달

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{\sigma}{D} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

2) 동결층

i) 열전달

$$\frac{\partial^2 T_F}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_F}{\partial r} + \frac{w_F}{k_F} = \frac{1}{\alpha_F} \frac{\partial T_F}{\partial t} \quad (3)$$

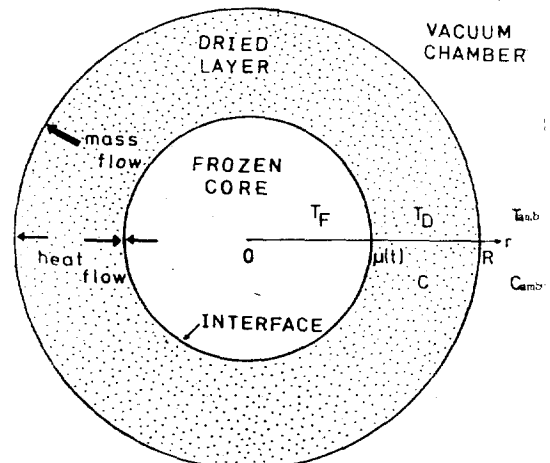


Fig. 1. Diagram of model

여기서 w 는 물질 내에서 발생하는 열로

$$w = K(T)E^2 = (IT + m)E^2 \quad (4)$$

로 표현되며 경계면의 이동은 승화속도에 의해서

$$J_{\text{int}} = -\rho\sigma \frac{d\mu}{dt} \quad (5)$$

로 표현된다.

$r = 0, \mu, R$ 에서의 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 구의 중심에서는 온도 분포가 대칭이므로

$$\frac{\partial T_F}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r = 0 \quad (6a)$$

로 표현되며, 경계면에서는 얼음과 수증기 사이에 열역학적 평형이 유지되기 때문에 수증기의 농도는 그 계면온도에서의 얼음의 증기압(mm-Hg)을 RT ($R = 3464.38 \text{ mmHg cm}^3/\text{g}^\circ\text{K}$)로 나눈 값으로 Dyer⁶⁾의 수치를 인용하였다. 경계면에서 요구되는 승화열은 양쪽 층에서 발생한 열로 공급되기 때문에 경계면을 heat sink로 간주하면,

$$C_{\text{int}} = f(T_{\text{int}}) \quad (6b)$$

$$\Delta H_s J_{\text{int}} = -k_F \left(\frac{\partial T_F}{\partial r} \right)_{\text{int}} + k_D \left(\frac{\partial T_D}{\partial r} \right)_{\text{int}} \quad (6c)$$

$$T_D = T_F = T_{\text{int}} \quad \text{at } r = \mu \quad (6d)$$

로 표현된다.

승화된 수증기는 건조층을 통해 확산되어 나가고 응축기에서 응축되는데 시료 외부 표면에서의 물질전달 저항은 응축기의 응축속도가 빠르기 때문에 무시할 수 있다. 즉

$$C = C_{\text{amb}} \quad (6e)$$

$$h(T_{\text{amb}} - T_s) = k_D \left(\frac{\partial T_D}{\partial r} \right)_s \quad \text{at } r = R \quad (6f)$$

그리고 동결층과 건조층에서의 온도와 농도에 대한 초기조건은 다음과 같다.

$$T_F = T_0 \quad \text{for } 0 \leq r \leq k - \delta, t = 0 \quad (7a)$$

$$\Delta H_s J_{\text{int}} = \frac{k_D}{\delta} (T_s - T_0) = h(T_{\text{amb}} - T_s) \quad \text{for } r = R - \delta, t = 0 \quad (7b)$$

$$\frac{T_s - T_D}{T_s - T_0} = \frac{R - r}{\delta} \quad \text{for } R - \delta \leq r \leq R, t = 0 \quad (7c)$$

$$C = C_{\text{amb}} - \left(\frac{\partial c}{\partial r} \right)_{\text{int}} (R - r)$$

$$\text{for } R - \delta \leq r \leq R, t = 0 \quad (7d)$$

여기서 δ 는 마이크로파 에너지가 공급되기 전에 진공조를 원하는 압력까지 도달시키는 동안 시료가 건조되는 두께로서 수치해석을 위하여 δ 를 임의로 정하는데 본 연구에서는 $\delta = 0.03R$ 을 사용하였다. 따라서 승화열이 주위로 부터 공급되는 상태인 건조층의 온도와 농도분포는 직선으로 가정하였고 동결층 속의 온도는 초기 냉동온도와 같다고 가정하였다.

3. 해 법

방정식 (1), (2), (3)은 이동 경계면에서 상변화를 동반하는 열 및 물질전달을 묘사하는 Parabolic differential equation이다. 이와 같은 이동 경계면을 고정 경계면으로 변환하기 위해 다음과 같은 Londau 변환⁸⁾을 사용한다.

$$y = \frac{r}{\mu}, \quad z = \frac{R - r}{R - \mu}$$

여기서 y 는 변환된 냉동층의 좌표이고 z 는 변환된 건조층의 좌표이다. 그밖에

$$\tau = \frac{\alpha_F t}{R^2}, \quad \phi = \frac{\mu}{R}, \quad \Gamma = \frac{C - C_{\text{amb}}}{C_{TP} - C_{\text{amb}}}$$

$$\theta = \frac{T_D - T_0}{T_{\text{amb}} - T_0}, \quad \bar{\theta} = \frac{T_F - T_0}{T_{\text{amb}} - T_0} \quad (9)$$

와 같은 무차원 변수들과 식 (4), (5), (8)과 (9)를 방정식 (1), (2), (3)에 대입하면 건조층에서는

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \left[\frac{2(1 - \phi)}{1 - z(1 - \phi)} - \frac{C_{PW} D (C_{TP} C_{\text{amb}})}{k_D} \frac{\partial \Gamma}{\partial z} + \frac{\alpha_F z (1 - \phi)}{\alpha_D} \right. \\ \left. \frac{d\phi}{d\tau} \right] \frac{\partial \theta}{\partial z} + \left[\frac{C_{PW} D (C_{TP} - C_{\text{amb}})}{k_D} \right. \\ \left. \left\{ \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} - \frac{2(1 - \phi)}{1 - z(1 - \phi)} \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \right\} + \frac{l_D R^2 (1 - \phi)^2 E^2}{k_D} \right] \theta \\ + \frac{C_{PW} D (C_{TP} - C_{\text{amb}}) T_0}{k_D (T_{\text{amb}} - T_0)} \left[\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} - \frac{2(1 - \phi)}{1 - z(1 - \phi)} \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \right] \\ + \frac{R^2 (1 - \phi)^2 E^2 (l_D T_0 + m_D)}{k_D (T_{\text{amb}} - T_0)}$$

$$= \frac{\alpha_F(1-\phi)^2}{\alpha_D} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} - \left[\frac{2}{1-z(1-\phi)} + \frac{\sigma \alpha_F z}{D} \frac{d\phi}{d\tau} \right] (1-\phi) \frac{\partial \Gamma}{\partial z} = \frac{\sigma \alpha_F (1-\phi)^2}{D} \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} \quad (11)$$

로 표현되고 등결층에서는

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} + \left(\frac{2}{y} + \phi y \frac{d\phi}{d\tau} \right) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \frac{l_F R^2 E^2 \phi^2}{k_F} \bar{\theta} + \frac{(l_F T_o + m_F) R^2 E^2 \phi^2}{k_F (T_{amb} T_o)} = \phi^2 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} \quad (12)$$

로 표현된다. 마찬가지로 경계조건은

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = 0 \quad \text{for } y = 0, \tau \geq 0 \quad (13a)$$

$$\Delta H_s J_{int} = \frac{T_{amb} - T_o}{R} \left(\frac{k_F}{\phi} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \frac{k_D}{(1-\phi)} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad \text{for } y = z = 1, \tau \geq 0 \quad (13b)$$

$$\theta = \bar{\theta} = \theta_{int} \quad \text{for } y = z = 1, \tau \geq 0 \quad (13c)$$

$$\Gamma = f(\theta_{int}) \quad \text{for } y = z = 1, \tau \geq 0 \quad (13d)$$

$$\theta - \frac{k_D}{hR(1-\phi)} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 1 \quad \text{for } z = 0, \tau \geq 0 \quad (13e)$$

$$\Gamma = 0 \quad \text{for } z = 0, \tau \geq 0 \quad (13f)$$

로 표현되고 초기조건은

$$\bar{\theta} = 0 \quad \text{for } 0 \leq y \leq 1, \tau = 0 \quad (13g)$$

$$\theta_s = \frac{hR(1-\phi)}{hR(1-\phi) + k_D} \quad \text{for } z = 0, \tau = 0 \quad (13h)$$

$$\theta = (1-z)\theta_s \quad \text{for } 0 \leq z \leq 1, \tau = 0 \quad (13i)$$

$$\Gamma = \frac{k_D(T_{amb} - T_o)\theta_s}{D(C_{TP} - C_{amb})\Delta H_s} \quad \text{for } 0 \leq z \leq 1, \tau = 0 \quad (13j)$$

로 표현된다. 방정식 (10), (11), (12)을 초기조건과 경계조건 (13)을 사용하여 풀기 위해서 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 유한 차분화 한다. 이렇게 유한 차분화 된 방정식은 tridiagonal matrix를 형성하게 되며 Thomas algorithm⁹⁾을 사용하여 해를 구하게 된다. 두개의 에너지 수지식과 한개의 물질 수지식이 경계면에서 연

립되어 있기 때문에 경계면의 온도 T_{int}^{*j} 을 가정한다. 이때 해로부터 얻어진 경계면의 온도 T_{int}^{*j} 와 가정한 온도 T_{int}^{*j} 를 비교하여 수렴치에 도달할 때까지 다음의 식

$$T_{int}^{*j+1} = \xi T_{int}^{*j} + (1-\xi)T_{int}^j$$

으로 반복하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 $\xi = 0.9$ 로 사용하였고 수렴하기 위한 기준치는 0.01°C 로 하였다. 대부분의 경우 수렴하려면 2번 내지 3번의 반복이 필요하였다. $\Delta z = \Delta y = 0.05$ 로 같은 크기의 40개의 격자점으로 나누었고 계산하는 동안 시간증분을 변화시켰다. 시행 오차법(trial and error method)에 의해서 처음 100의 시간증분에 대해서는 $\Delta \tau$ 를 0.0006으로 사용하였고 그 다음 400 시간증분에 대해서는 $\Delta \tau$ 를 0.06으로 사용하였다. 그 결과 cpu time은 약 25분이 걸렸다. 위의 제시한 time step과 반복과정으로는 해의 불안정성은 나타나지 않았다.

본 연구에서 기지물성치로 도입한 최고기의 수치는 Table 1과 같다. 그외에 건조층에서의 열전도도는 Harper¹⁰⁾의 실험 결과를 사용하였고 유효확산계수는 압력의 함수인 $D = 78.5/(3.4 + P_{amb})^{11)}$ 로 나타냈다. 여기서 P_{amb} 의 단위는 mmHg이다. 아울러 등결층 및 건조층의 $K(T)$ 는 Yeaston¹²⁾의 실험 결과를 사용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1. 전형적인 온도 및 농도 분포

전형적인 분포를 Table 2에 있는 조작 조건 하에서 계산하였다. 건조가 진행됨에 따른 시료 내에서의 온도 분포를 Fig. 2에 표시하였다. 건조 초기에는 물질전달 저항이 작고 승화 속도가 커서 흡수된 마이크로파 에너지가 승화 에너지를 공급하기에 불충분하여 온도가 오히려 떨어지게 된다. 건조층의 두께가 점차 증가함에 따라 물질전달 저항이 커지고 승화에 의해 소비되는 에너지가 줄기 때문에 온도는 서서히 증가하게 된다. 건조가 거의 끝나갈 무렵에는 건조층에서 최고온도를 나타내는 지점이 점차로 표면에서부터 건조층 내부로 이동하게 된다. 그리

Table 1. Physical properties used in simulation.

property	assumed operating conditions	Numerical value used	Origin
h	0.5mmHg ; air	$5 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$	assumed
e	—	0.92g/cm ³	Ma and Peltre ⁷⁾
ρ_D	—	0.32g/cm ³	Ma and Peltre
ρ_F	—	0.96g/cm ³	Ma and Peltre
C_{PW}	-15°C ; 5mmHg	0.5 cal/g-°C	assumed
C_{PD}	0°C	0.36cal/g-°C	Awberry et al. ¹³⁾
C_{PF}	-15°C	0.43cal/g-°C	Rey ¹⁴⁾
ΔH_S	—	675 cal/g	Hohner ¹⁵⁾
σ	—	0.75	Hohner
h_F	-15°C	$3.4 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$	Lentz ¹⁶⁾

Table 2. Assumed operating condition for the typical outcome.

Frequency	2450	MHz
Electric field strength(E)	110	volt/cm
Total pressure(P _{amb})	1.0	mmHg
Partial pressure of water vapor(P _{w,amb})	0.075	mmHg
Ambient temperature(T _{amb})	20	°C
Initial sample temperature(T _o)	-25	°C
Radius(R)	1.0	cm

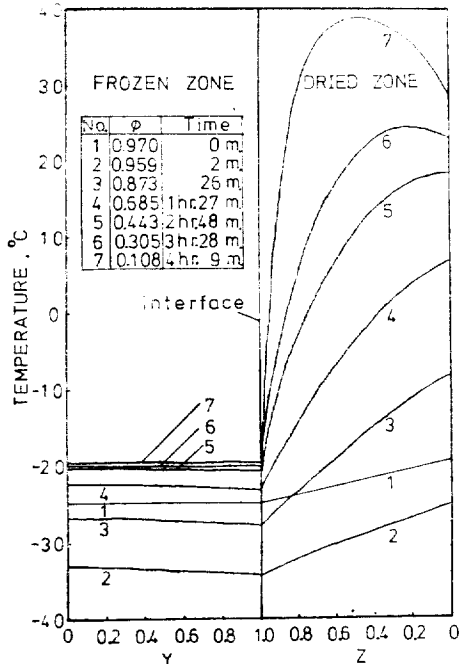


Fig. 2. Typical temperature profiles

고 동결층에서의 온도는 시간에 따라 거의 일정하게 된다.

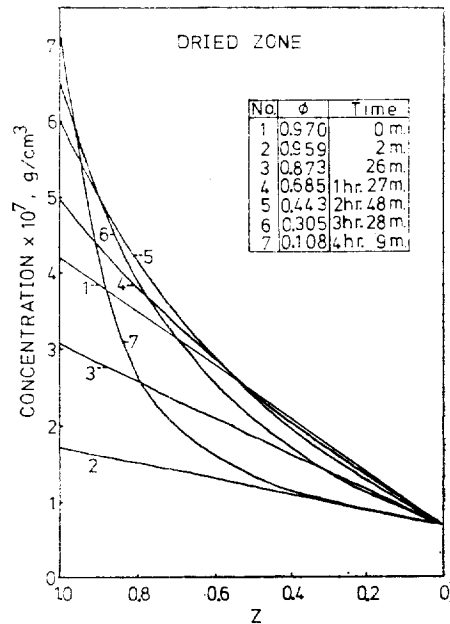


Fig. 3. Typical concentration profiles

건조층에서의 농도 분포는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 처음에는 기울기가 완만하게 떨어지다가 건조가 진행됨에 따라서 서서히 증가한다.

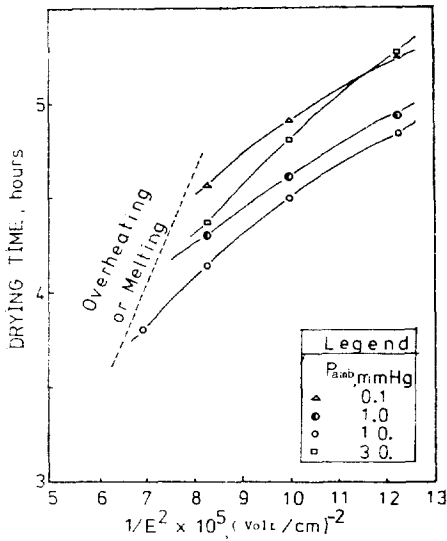


Fig. 4. Total drying time as a function of the electric field strength. $R = 1\text{cm}$, $P_{w,amb} = 0.075\text{mmHg}$, $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$, $T_o = -25^\circ\text{C}$

4.2. 조작변수가 건조시간에 미치는 영향

4.2.1. 전기장의 세기의 영향

마이크로파 가열은 직접 물질 내부에서 열이 발생하기 때문에 건조시간은 전기장의 세기에 상당히 영향을 받고 있음을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 건조시간은 전기장의 세기에 따라 감소하였

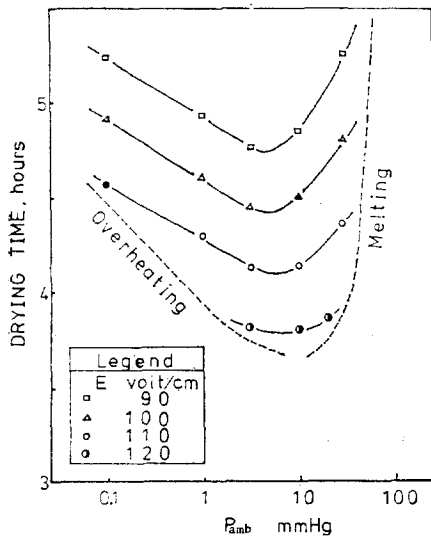


Fig. 5. Effects of total ambient pressure upon the drying time. $R = 1\text{cm}$, $P_{w,amb} = 0.075\text{mmHg}$, $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$, $T_o = -25^\circ\text{C}$

으나 전기장의 세기를 계속 증가시키면 과열이나 융해 현상이 발생한다.

4.2.2. P_{amb} 및 $P_{w,amb}$ 의 영향

진공조의 P_{amb} 와 $P_{w,amb}$ 는 건조되는 동안 시료의 온도에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 0.1mmHg 부터 $5\sim 10\text{mmHg}$ 이하의 P_{amb} 에서는 P_{amb} 가 증가함에 따라서 건조시간이 감소하다가 그 이상의 압력에서는 다시 증가하는 현상을 보인다. 그 이유는 $P_{amb} < 5\sim 10\text{mmHg}$ 인 범위에서는 물질전달 저항은 큰 변화가 없으나 열전달 저항은 급격히 감소하여 결국 건조시간이 감소하지만 P_{amb} 가 $5\sim 10\text{mmHg}$ 이상으로 커지면 압력의 증가로 물질전달 저항은 증가하는데 비해 열전달 저항은 크게 감소하지 않으므로 전체적으로 건조시간은 다시 증가하게 된다.

수증기의 분압($P_{w,amb}$)이 증가하면 진공조 내의 수증기의 농도가 높기 때문에 건조층에서의 물질전달에 대한 압력차를 작게하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 건조시간이 길어진다.

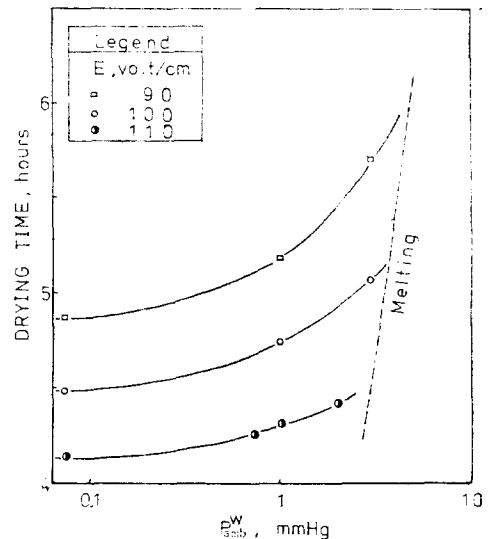


Fig. 6. Effects of water vapor pressure in vacuum chamber upon the drying time. $P_{amb} = 10\text{mmHg}$, $R = 1\text{cm}$, $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$, $T_o = 25^\circ\text{C}$

4.2.3. 초기 온도(T_o) 및 진공조 온도(T_{amb})의 영향

초기 냉동온도와 진공조 온도가 건조시간에 미

치는 영향은 Table 3 과 같다. B 를 기준으로 하여 A 는 초기 냉동온도를 낮춘 것이고 C 는 진공조 온도(T_{amb})를 낮춘 것으로 건조 초기에는

Table 3. Effects of initial sample temperature & ambient temperature & ambient temperature upon the drying time. $P_{amb} = 1.0$ mmHg, $P_{w_{amb}} = 0.075$ mmHg, $E = 110$ volt/cm, $R = 1.0$ cm.

	A	B	C
$T_{amb}, ^\circ C$	20	20	5
$T_o, ^\circ C$	-40	-25	-25
Time	$V_D/V_T \times 100, \%$		
2min.	10.7	11.8	11.5
87min.	75.1	75.6	66.9
188min.	94.5	94.6	87.2
Total Drying time, min.			
	260	259	331

V : volume of sample

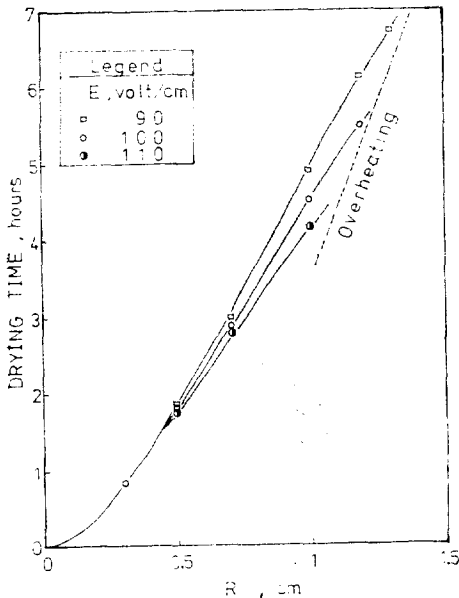


Fig. 7. Effects of the sample radius on drying time for variogs electric field strength. $P_{amb} = 1$ mmHu, $P_{w_{amb}} = 0.075$ mmHg, $T_{amb} = 20^\circ C$, $T_o = -25^\circ C$

A 가 가장 건조 속도가 느렸으나 시간이 경과함에 따라 점차적으로 C 의 건조 속도가 느리게 된다. A 와 B 의 건조 시간을 비교하여 볼 때 마이크로파 냉동건조에서는 초기 냉동온도가 건조 시간에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 마이크로파 가열에 의한 냉동건조가 상당히 빠른 건조 방식임을 말한다. 낮은 진공조 온도의 경우 건조 초기에는 거의 영향이 없으나 건조가 진행됨에 따라 발생한 열이 진공조로 전달되어 시료의 온도가 A 나 B 의 경우보다 낮기 때문에 마이크로파에 의한 열 발생도 적어져서 건조시간이 길어지게 된 것으로 생각된다.

Fig. 7 은 시료의 반경이 증가함에 따라 건조시간이 급격히 증가함을 보여 주며 반경이 매우 작은 영역에서는 전기장의 세기에 무관함을 보여주고 있다.

5. 결 과

구형 물질의 마이크로파 냉동건조에 대하여 수학적 모델을 전개하였으며 이것에 쇠고기의 물성치를 적용하여 Crank Nicolson 방법을 써서 수치모사하였다. 그 결과는

1. 건조시간은 전도나 복사의 방법 보다 빠르며 전기장의 세기가 증가함에 따라서 감소한다.
2. 진공조의 압력이 0.1 mmHg 로 부터 증가함에 따라서 건조시간은 점점 작아지며 압력이 5~10 mmHg 에서 최소가 되었다가 다시 증가한다.
3. 진공조에서 수증기의 부분압의 증가는 건조시간을 증가시킨다.
4. 시료의 초기 온도는 건조시간에 별로 영향을 미치지 않는다.
5. 진공조의 온도가 낮으면 건조시간은 길어진다.
6. 시료의 반지름의 감소는 건조시간을 짧게 한다.

Nomenclature

C	concentration of water vapor, g/cm ³
C_p	effective specific heat, cal/g °C
C_{pw}	specific heat of constant pressure of water vapor, cal/g °C
C_{TP}	concentration at triple point
D	effective diffusivity, cm ² /sec
E	electric field strength, Volt/cm
h	heat transfer coefficient, cal/sec cm ² °C
ΔH_s	heat of sublimation of ice, cal/g
J	effective mass flux of water vapor, g/cm ² sec
k	thermal conductivity, cal/cm sec °C
K	dissipation coefficient, cal/sec cm ² (Volt/cm ²)
l	constant of linearization
m	constant of linearization
P	pressure, mmHg
P^w	partial pressure of water vapor, mmHg
r	radial coordinate
R	radius, cm
t	time, sec
T	temperature, °C
V	volume of sample, cm ³
y	normalized coordinate in frozen layer
z	normalized coordinate in dried layer
ρ	density of ice, g/cm ³
ρ_D	density of the dried material, g/cm ³
ρ_F	density of the frozen material, g/cm ³
σ	porosity
w	density of microwave absorbed, cal/cm ³ -sec
μ	interface position, cm
ϕ	normalized interface position
θ	normalized temperature in the dried layer
$\bar{\theta}$	normalized temperature in the frozen layer
τ	normalized time
α	thermal diffusivity, cm ² /sec
δ	initial thickness of dried layer, cm

ξ iteration parameter

Subscript

amb	ambient(in the vacuum chamber)
D	dried layer
F	frozen layer
int	interface
o	initial value
s	outer surface
T	total value

REFERENCES

1. D.A. Copson, Food Technol., **12**(1958), 270.
2. S. Jackson, Food Technol., **11**(1957), 468.
3. M.W. Hoover, Food Technol., **20**(1966), 103.
4. Y.H. Ma and P. Peltre, AIChE J., **21**(1975), 435.
5. T.K. Ang, Chem. Eng. Sci., **32**(1977), 1477.
6. D.F. Dyer, D.K. Carpenter, and J.E. Sunderland, J. Food Sci., **31**(1966), 196.
7. Y.H. Ma and P. Peltre, AIChE Symp. Ser. No. 132, **69**(1973), 47.
8. H.G. Landau, Quarterly J. of Applied Math., **8**(1950), 81.
9. B. Carnahan, H.A. Luther, and J.O. Wilkes, "Applied Numerical Methods," Wiley, New York, 1969.
10. J.C. Harper, AIChE J., **8**(1962), 298.
11. C.C. Sandall, C.J. King, and C.R. Wilke, AIChE J., **13**(1967), 428.
12. R.A. Yeaston and B. Kon, Q.M. Contract Report, DA19-129-QM-1546(1961).
13. J.H. Awberry and E. Griffiths, J. Soc. Chem. Ind., **52**(1964), 75.
14. L. Rey, "Aspects Theoriques et Industriels de la Lyophilisation," Herman, Paris 1964.
15. G.A. Hohner, Ph.D. thesis, Mich. St. Univ., East Lansing, 1970.
16. C.P. Lentz, Food. Technol., **15**(1961), 243.