

근채류의 수축 및 건조속도식

조덕제 · 허종화* · 이민규**

경남전문대학 식품영양과, *경상대학교 식품공학과,
**제주대학교 화학공학과

Drying and Shrinking Rate Equation of Root Vegetables

Duck-Jae Cho, *Jong-Wha Hur and **Min-Kyu Lee

Department of Food and Nutrition, Kyung Nam Junior College, Pusan,

**Department of Food Science and Technology, Gyeong Sang National University, Jinju,*

***Department of Chemical Engineering, Cheju National University, Cheju*

Abstract

The shrinking and overall drying rate equations which can accommodate experimental data and the rate of initial drying ratio were investigated. The results obtained from hot air drying experiments of radish and sweet potatoes were as follows. The drying rate constant and the order were affected by the thickness of sample and temperature. The empirical drying rate and shrinking equations at constant drying conditions ($d=4\text{mm}$, $T_a=50^\circ\text{C}$, $\text{RH}=10\%$, $U=0.8\text{m/s}$) for radish and sweet potatoes were found to $dx/dt=0.112 \times 10^{-2} A(1-x)^{0.43}$, $A=A_0(-0.480x+1)$ and rates of initial drying ratio were expressed of sample thickness, relative humidity and air velocity; for radish $dx/dt=0.0648(\text{RH})^{-0.31} (d)^{-0.75} (U)^{0.39}$ and for sweet potatoes $dx/dt=0.0547(\text{RH})^{-0.28} (d)^{-0.63} (U)^{0.37}$

Key words: shrinking rate equation, drying rate equation, radish, sweet potatoes

서 론

대부분의 식품은 많은 양의 수분을 함유하고 있기 때문에 수분을 제거하여 미생물에 대한 부패를 적게 하고, 식품의 보존성을 높이고, 저장 및 수송을 간편하게 하기 위해서 건조법이 많이 이용되고 있다⁽¹⁾. 그러나 식품의 건조시에 일어나는 변화의 하나가 수축현상이며 식품은 완전한 탄성체가 아니므로 균일한 수축양상을 보기가 어렵고 식품의 종류나 건조방법 등에 따라서 다른 수축양상을 보인다^(2,3). 특히 진공동결 건조에서는 수분의 방출이 열음의 승화에 의해서 일어나기 때문에 표면적 수축은 무시할 수 있으나 열풍건조에서는 표면적 수축이 현저하게 일어난다⁽⁴⁾. Kilpartrick 등⁽²⁾은 야채의 표면적 수축은 초기 건조단계에서는 거의 증발한 수분의 양과 같으나 건조가 진행되면 표면적 수축은 적어지고 함수율 15% 내지 20% 이하에서는 표면적 수축은 일어나지 않는다고 하였

으며 Kishimoto⁽⁴⁾은 수축을 동반한 건조의 연구에서 목재, 점토 등은 수 %의 표면적 감소가 일어나지만 어육의 경우에는 약 50%의 수축을 일으키고 있기 때문에 수축이 건조에 미치는 영향은 무시할 수 없다고 하였다. 이와 같은 건조중 표면적의 변화는 건조속도에 영향을 미치므로⁽⁵⁾ 향틀건조기 및 감틀건조기로 나누어 건조속도 식을 설정하는 종래의 방법보다 표면적항을 함유한 총괄식 건조속도 식과 여러가지 형태의 건조수축식의 설정이 필요하다⁽⁶⁾. Suzuki 등⁽⁸⁾은 표면적 변화와 수분함량과의 사이에 관계되는 식을 가정하는데 3가지의 수축 model을 설정하였고, Kubota 등⁽⁷⁾은 건조속도 식의 설정에 있어서 건조의 진행에 따라 표면적 변화의 측정을 행하고 건조속도 식은 n차 속도식과 여기에 표면적항을 포함한 속도식으로 표현하는 것이 좋다고 하였으며, 木村⁽¹¹⁾도 건조중 표면적 수축이 현저히 일어날 경우 건조속도 식에 표면적항을 가하는 것이 필요하다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 무우 및 고구마를 제1보와 같은 방법으로 건조하고 건조가 진행됨에 따라 표면적 변화를 측정하여 건조수축 식중 어느 것이 적합한가를 검토하고

Corresponding author: Duck-Jae Cho, Department of Food and Nutrition, Kyung Nan Junior College, Pusan 616-012, Korea

그에 따라 건조속도 식에 표면적항을 가하여 총괄적 건조속도 식을 구하였다. 또한 $t=0$ 에서부터 구한 초기 건조속도를 시료의 두께, 상대습도 및 풍속의 함수로 표현하고 실험치들을 이용하여 parameter 값들을 구하였다.

재료 및 방법

실험방법

제 1보에서와 같은 방법으로 행하였다.

수축 및 건조속도식

식품은 여러가지의 고분자 성분으로 구성되어 있기 때문에 건조속도가 복잡하고 다종다양하며 건조에 따라 표면적 수축이 현저하게 일어나고 표면상태도 여러가지로 변하기 때문에 건조곡선의 해석이 곤란하여 다음과 같이 선형 및 비선형으로 건조수축 식을 나타낼 수 있다(6,7).

$$A/A_0 = -a_1 x + 1 \tag{1}$$

$$a_1 = 1 - (A_e/A_0) \tag{2}$$

$$A/A_0 = (-a_2 x + 1)^{2/3} \tag{3}$$

$$a_2 = 1 - (V_e/V_0) \tag{4}$$

식 (1)과 (2)에서 parameter a_1 과 a_2 의 값은 시료의 종류나 건조조건 등에 따라서 정해지는 특정치이다. 여기서 x 는 건조율로서 다음과 같이 정의된다(6,7).

$$x = (W_0 - W)/(W_0 - W_e) \tag{5}$$

또한, 건조속도 식을 이용할 경우 표면적항을 첨가하여 식 (6)과 같이 총괄적 건조속도 식으로 표현하는 방법이 편리하다(1,6,7).

$$dx/dt = Kn \cdot A \cdot (1-x)^n \tag{6}$$

따라서 건조수축 식에서 parameter(a_1, a_2) 값을 실험치와 계산치를 비교하여 어느 식이 적합한 가를 검토하였다. 그리고 식 (6)에서의 표면적항에 식 (1)과 (3)을 사용하여 parameter(Kn, n) 값을 구하였다.

또한 $t=0$ 에서부터 구한 초기 건조속도의 변화를 시료의 두께, 상대습도 및 풍속의 함수로 식 (7)과 같이 표현하고 실험치들을 이용하여 각 parameter 값들을 구하였다.

$$(dx/dt)_{t=0} = \alpha_1 (RH)^{\alpha_2} \cdot (d)^{\alpha_3} (U)^{\alpha_4} \tag{7}$$

체적축정

초기 및 건조말기의 체적은 시료의 크기를 모눈종이 위에 정사각형으로 그려서 모눈종이의 면적과 시료의 두께에서부터 체적을 측정하였다.

계산방법

건조수축 식의 parameter 들을 비선형 최소자승법(8,9)을 사용하여 구하였으며 건조속도 식의 parameter 들을 Runge-Kuttel-Gill 법으로 수치적분하여 최소자승법에 의해 구하였다. 사용한 컴퓨터는 IBM-PC-AT였다.

결과 및 고찰

건조수축식

건조수축 식은 시료의 두께, 공기의 온도, 상대습도 및 풍속 등에 영향을 받을 것으로 생각되나 본 실험에서는 우선 시료의 두께와 온도에 대해서만 조사하였다. 따라서 건조수축 식의 parameter(a_1, a_2) 값을 실험치(식 (2), (4))와 계산치(식 (1), (3))를 비교하여 시료의 두께에 대해서는 Table 1 및 2에, 건조공기의 온도에 대해서는 Table 3 및 4에 나타내었다. Table 1과 2에서 보는 바와 같이 parameter a_1, a_2 값은 시료의 두께가 얇을 수록 큰 값을 나타내었으며, 무우가 고구마보다 약간 높았다. 그리고 Table 3과 4에서 보면 a_1, a_2 값은 온도에는

Table 1. a_1 -Value and standard deviation of shrinking equation(eq. 1) of radish and sweet potatoes with various thicknesses

sample	Thickness (mm)	Experimental (a_1)	Calculated	
			a_1	σ
Radish	2	0.504	0.484	0.066
	4	0.480	0.434	0.043
	6	0.452	0.413	0.053
Sweet potato	2	0.415	0.373	0.080
	4	0.368	0.309	0.062
	6	0.308	0.280	0.045

($T_a = 50^\circ C, RH = 10\%, U = 0.8m/s$)

Table 2. a_2 -Value and standard deviation of shrinking equation(eq. 3) of radish and sweet potatoes with various thicknesses

Sample	Thickness (mm)	Experimental (a_2)	Calculated	
			a_2	σ
Radish	2	0.923	0.639	0.051
	4	0.886	0.585	0.043
	6	0.875	0.525	0.043
Sweet potato	2	0.678	0.589	0.062
	4	0.610	0.434	0.058
	6	0.598	0.394	0.049

($T_a = 50^\circ C, RH = 10\%, U = 0.8m/s$)

Table 3. a_1 -Value and standard deviation of shrinking equation (eq. 1) of radish and sweet potatoes with various air temperatures

Sample	Temperature (°C)	Experimental (a_1)	Calculated	
			a_1	σ
Radish	35	0.474	0.429	0.034
	50	0.480	0.434	0.043
	65	0.492	0.442	0.082
Sweet potato	35	0.355	0.307	0.037
	50	0.368	0.309	0.062
	65	0.378	0.321	0.057

($d=4\text{mm}$, $\text{RH}=10\%$, $U=0.8\text{m/s}$)

Table 4. a_2 -Value and standard deviation of shrinking equation (eq. 3) of radish and sweet potatoes with various air temperatures

Sample	Temperature (°C)	Experimental (a_2)	Calculated	
			a_2	σ
Radish	35	0.882	0.583	0.062
	50	0.886	0.585	0.043
	65	0.867	0.597	0.072
Sweet potato	35	0.608	0.427	0.032
	50	0.610	0.434	0.058
	65	0.625	0.454	0.051

($d=4\text{mm}$, $\text{RH}=10\%$, $U=0.8\text{m/s}$)

큰 영향을 받지 않았으나 무우 및 고구마 모두 온도가 낮을수록 다소 작은 값을 나타내었다. 따라서 a_1 , a_2 값은 시료의 종류와 건조조건 등에 의해서 변화하였고 수축의 정도가 클수록 높은 값을 나타내었다.

Table 1과 3에서 보면 선형적 표현식인 식 (1)을 사용한 경우에는 a_1 값은 실험치와 계산치가 잘 일치하였으며 두께 4mm의 것을 온도 50°C, 상대습도 10% 풍속 0.8 m/s인 조건하에서 건조하였을 때 a_1 값은 무우 및 고구마 각각 0.480 및 0.368이었다. 그러나 비선형적 표현식인 식 (3)을 사용하였을 경우 (Table 2, 4)의 a_2 값은 실험치와 계산치가 다소의 차이를 보였다. 이와같은 현상은 평형상태에서의 수축시료의 체적 (V_e) 측정에 대한 실험적 오차의 발생 때문에 기인된 것으로 생각된다. 또한 건조율 (x)과 상대적 수축 (A/A_0)과의 관계를 Fig. 1 및 2에 도시한 결과 실험치와 계산치 (식 (1))는 잘 일치하였다. 그러나 무우에 비해 고구마는 약간의 편차를 보였는데 이것은 무우는 섬유질계의 식품으로서 탈수현상이 단순하기 때문이고 고구마는 전분질계의 식품으로서 표면경화현상이 일어나기 때문인 것으로 생각된다⁽⁶⁾. 따라서 식 (6)의 건조속도 식에서 표면적 A 는 간단한 선형적 건

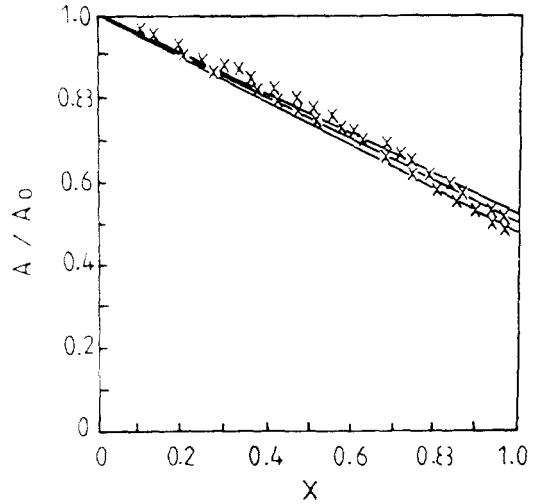


Fig. 1. Relation between the surface area ratio (A/A_0) and the drying ratio (X) on drying of radish. ($d=4\text{mm}$, $T_a=50^\circ\text{C}$, $\text{RH}=10\%$, $U=0.8\text{m/s}$)
 x: Experimental, —: Theoretical (eq. 1)

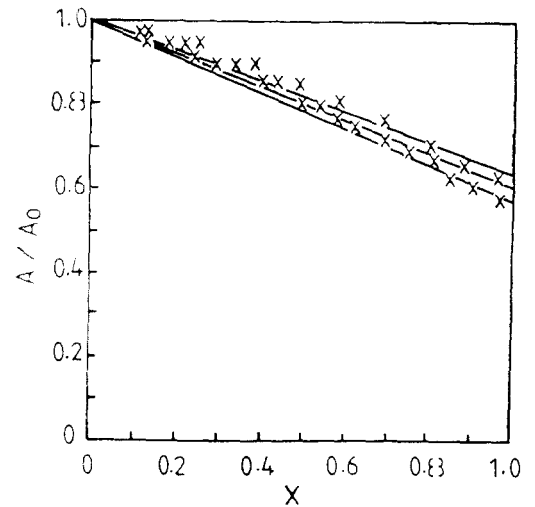


Fig. 2. Relation between the surface area ratio (A/A_0) and the drying ratio (X) on drying of sweet potato. ($d=4\text{mm}$, $T_a=50^\circ\text{C}$, $\text{RH}=10\%$, $U=0.8\text{m/s}$)
 x: Experimental, —: Theoretical (eq. 1)

조수축 식인 식 (1)을 사용하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

건조속도식

표면저항을 함유한 총괄적 건조속도 식인 식 (6)에서

표면적항에 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 속도 parameter 를 구하여 두께에 대해서는 Table 5 및 6에, 온도에 대해서는 Table 7 및 8에 나타내었다. Table 5 및 6에서 보면 차수 n 값은 식 (1)을 사용하였을 때 무우인 경우 두께 2, 4, 6mm에서 각각 0.268, 0.426 및 0.479 이었고 고구마인 경우는 각각 0.361, 0.491 및 0.667 이었다. 그리고 식 (3)을 사용하였을 때는 무우인 경우 각각 0.267, 0.421 및 0.477 이었고 고구마인 경우는 0.366, 0.492 및 0.666 으로서 두께가 얇을 수록 적은 값을 나타내었고 무우가 고구마보다 다소 적은 값이었다. 또한 Table 7 및 8에서 보면 n 값은 온도에도 영향을 받았으며 온도가 증가할 수록 감소하였다. 그러나 Table 5~8에서 나타난 바와 같이 수축식에는 영향을 받지 않고 비슷한 값을 나타내었다.

한편 위에서 구한 각각의 n의 값을 사용하여 건조속도 상수 Kn 값을 구한 결과(Table 5~8) 두께가 얇을 수록, 온도가 높을 수록 큰 값을 나타내었으며 고구마가 무우보다 큰 값을 나타내었으나 수축식에는 큰 영향이 없었다. 따라서 이상의 결과로 미루어 표준편차에도 차이가 없기 때문에 본 실험에서 건조속도 식을 표면적항을 포함한 식으로 나타낼 경우 수축식 중 어느 것을 사용해도 좋

Table 5. Rate parameters of the drying rate equation(lea. 6) of radish and sweet potatoes with various thicknesses

Sample	Thickness (mm)	A/Ao=-a ₁ x+1		
		Kn x 10 ²	n	σ
Radish	2	0.206	0.268	0.010
	4	0.112	0.426	0.013
	6	0.074	0.479	0.006
Sweet potatoes	2	0.217	0.361	0.008
	4	0.115	0.491	0.011
	6	0.090	0.667	0.009

(T_a=50°C, RH=10%, U=0.8m/s)

Table 6. Rate parameters of the drying rate equation(lea. 6) of radish and sweet potatoes with various thicknesses

Sample	Thickness (mm)	A/Ao=(1-a ₂ x) ^{2/3}		
		Kn x 10 ²	n	σ
Radish	2	0.204	0.267	0.009
	4	0.110	0.421	0.012
	6	0.073	0.477	0.005
Sweet potatoes	2	0.216	0.366	0.008
	4	0.115	0.492	0.012
	6	0.089	0.666	0.009

(T_a=50°C, RH=10%, U=0.8m/s)

Table 7. Rate parameters of the drying rate equation(lea. 6) of radish and sweet potatoes with various air temperatures

Sample	Temperature (°C)	A/Ao=-a ₁ x+1		
		Kn x 10 ²	n	σ
Radish	35	0.069	0.464	0.008
	50	0.112	0.426	0.013
	65	0.149	0.359	0.019
Sweet potatoes	35	0.076	0.525	0.005
	50	0.115	0.492	0.012
	65	0.244	0.452	0.011

(d=4mm, RH=10%, U=0.8m/s)

Table 8. Rate parameters of the drying rate equation(lea. 6) of radish and sweet potatoes with various air temperatures

Sample	Temperature (°C)	A/Ao=(1-a ₂ x) ^{2/3}		
		Kn x 10 ²	n	σ
Radish	35	0.068	0.466	0.008
	50	0.110	0.421	0.013
	65	0.147	0.358	0.019
Sweet potatoes	35	0.076	0.524	0.005
	50	0.115	0.492	0.012
	65	0.143	0.449	0.011

(d=4mm, RH=10%, U=0.8m/s)

다고 판단되나 간단한 선형적 표현식인 식 (1)을 사용하는 것이 더욱 편리하다고 생각된다. 또한 Fig. 3과 4는 시간에 따른 건조율을 실험치와 계산치를 비교하여 나타낸 것으로 식 (6)에서 식 (1)을 사용하여 얻어진 계산치는 실험치와 잘 일치하였다.

두께 4mm의 것을 습도 10%, 온도 50°C, 풍속 0.8 m/s에서 건조하고 식 (1)의 수축식을 사용하여 식 (6)에서의 n 및 Kn 값을 구한 결과 무우인 경우는 각각 0.426, 0.112×10⁻²/min, 고구마인 경우는 각각 0.491, 0.114×10⁻²/min 이었다. 따라서 이와같은 건조조건 하에서 얻어진 건조속도 식과 수축식은 다음과 같았다.

$$\text{무우 : } dx/dt = 0.112 \times 10^{-2} \cdot A(1-x)^{0.43}$$

$$A = Ao(-0.480x + 1)$$

$$\text{고구마 : } dx/dt = 0.115 \times 10^{-2} \cdot A \cdot (1-x)^{0.49}$$

$$A = Ao(-0.368x + 1)$$

초기 건조속도식

건조시 시료의 두께, 상대습도 및 풍속의 영향을 검토하기 위하여 t=0에서부터 초기 건조속도 변화를 구한 결과는 Table 9와 같으며 이 값들을 이용하여 식 (7)의

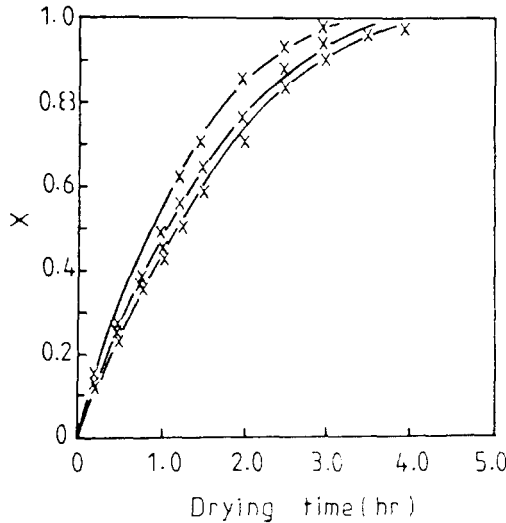


Fig. 3. Relation between the drying ratio and drying time on drying of radish.
 (d=4mm, Ta=50°C, RH=10%, U=0.8m/s)
 ×; Experimental, —; Theoretical; eq. 6)

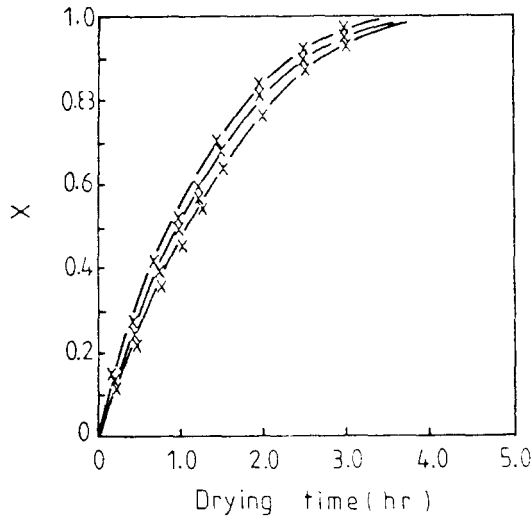


Fig. 4. Relation between the drying ratio and drying time on drying of sweet potato
 (d=4mm, Ta=50°C, RH=10%, U=0.8m/s)
 ×; Experimental, —; Theoretical; eq. 6)

parameter 들을 구하여 다음과 같은 초기 건조속도 식을 얻었다.

$$\text{무우} : (dx/dt)_{t=0} = 0.0648 (RH)^{-0.31} \cdot (d)^{-0.75} \cdot (U)^{0.39}$$

Table 9. The initial drying rate(dx/dt) with various sample thicknesses, relative humidities and air velocities

Items	Radish	Sweet potatoes
Thickness (mm)	2	0.0169
	4	0.0104
	6	0.0073
Relative humidity (%)	10	0.0104
	25	0.0087
	40	0.0062
Air velocity (m/s)	0.4	0.0078
	0.8	0.0104
	1.2	0.0120

$$\text{고구마} : (dx/dt)_{t=0} = 0.0547 (RH)^{-0.28} \cdot (d)^{-0.63} \cdot (U)^{0.37}$$

따라서 초기 건조속도 변화는 무우 및 고구마 모두 상대습도와 시료의 두께가 증가할수록 감소하며 풍속이 증가할수록 증가함을 재확인 할 수 있었다.

요 약

무우 및 고구마를 열풍건조하고 건조가 진행됨에 따라 표면적 변화를 측정하여 실험치와 잘 일치하는 건조수축식과 총괄적 건조 속도식을 구하였으며, 시료의 두께, 상대습도 및 풍속을 포함한 초기 건조속도의 함수관계 식을 구하였다. 건조속도 상수와 차수는 시료의 두께와 풍기의 온도에 영향을 받았으며 일정한 조건(d=4mm, Ta=50°C, RH=10% U=0.8m/s) 하에서 얻어진 총괄적 건조속도 식과 수축식은 무우는 $dx/dt = 0.112 \times 10^{-2} \cdot A \cdot (1-x)^{0.43}$, $A = A_0(-0.480x+1)$ 이었고, 고구마는 $dx/dt = 0.115 \times 10^{-2} A(1-x)^{0.49}$, $A = A_0(-0.368x+1)$ 이었다.

또한 초기 건조속도의 변화는 시료의 두께, 상대습도, 및 풍속에 대해 무우는 $dx/dt = 0.0648 (RH)^{-0.31} (d)^{-0.75} (U)^{0.39}$ 이었고, 고구마는 $dx/dt = 0.0547 (RH)^{-0.28} (d)^{-0.63} (U)^{0.37}$ 이었다.

기호설명

- a₁, a₂: empirical constant (-)
- A₀: initial surface area (cm²)
- A_e: surface area in equilibrium state (cm²)
- A: surface area in a time (cm²)
- d: thickness of sample (mm)

dx/dt : drying rate	(1/hr)
K_n : drying rate constant	(1/hr)
n : rate parameter	(-)
RH: relative humidity	(%)
t : time	(hr)
T_a : air temperature	($^{\circ}C$)
U : air velocity	(m/s)
V_e : volume in equilibrium state	(cm^3)
V_o : initial volume	(cm^3)
W_o : initial moisture content	(d.b.)
W_e : equilibrium moisture content	(d.b.)
W : moisture content in a time	(d.b.)
x : drying ratio	(-)
α : constant	(-1)

문헌

1. 木村進 : 體積收縮と表面硬化. 乾燥食品事典, 朝倉書店, 東京, 168(1984)
2. Kilpartrick, P.W., Lowe, E. and Van arsdel, W.B. : Tunnel dehydrators for fruits and vegetables.

- Advances in food research*, 6, 359(1955)
3. Suzuki, K., Kubota, K., Hasegawa, T. and Hosaka, H. : Shrinkage in dehydration of root vegetable. *J. Food Sci.*, 41, 1189(1976)
 4. Kishimoto, A. : Drying accompanied with shrinkage. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 28(7), 726(1962)
 5. Görling, P. : Physical phenomena during the drying of foodstuffs. In *Fundamental aspects of the dehydration of foodstuffs*, Macmillan Co., New York, 42(1958)
 6. Matsumoto, T., Kubota, K., Suzuki, K. and Hosaka, H. : Drying rate equations of shrinkage root vegetables. *Nippon Shokuhine Kogyo Gakkaishi*, 29(4), 238(1982)
 7. Kubota, K., Matsumoto, T., Suzuki, K. and Hosaka, H. : Over all drying rate equations of various shape potatoes. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 28(9), 491(1981)
 8. 久保田清, 森田徳義 : 名古屋大學 大型計算機 センター-ニュース, 4, 318(1973)
 9. 保坂秀明, 久保田清, 鈴木寛一 : 食品工學, 共立出版, 東京, 168(1975)

(1988년 11월 3일 접수)