

사과의 乾燥條件에 따른 乾燥特性

鄭信教 · 崔容熙 · 孫泰華 · 崔鍾旭

慶北大學校 食品加工學科

The Drying Characteristics of Apples at Various Drying Conditions

Shin-Kyo Jung, Yong-Hee Choi, Tae-Hwa Shon and Jong-Uck Choi

Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University, Taegu

Abstract

This study was performed to examine the drying characteristics of apples at various drying conditions. Air velocity has no effect on the drying rate except the constant rate period. In this experiment the diffusion coefficients of moisture in the apple tissue were in the range of  $1.1470-2.2148 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$ . As a result of balance of heat and mass transfer during the falling rate period, an empirical equation based on Fick's law was obtained as follows;  $\log \Delta t = \log t_0 - D \frac{\pi^2 \theta}{4d}$ . This equation can be used to calculate the temperature of apples during the falling rate period, provided the diffusion coefficients of apple are known. The experimental values of the internal moisture distribution during apple dehydration were nearly in accord with the theoretical values.

序 論

사과는 分類學上 薔薇科에 속하는 多年生 植物로서 우리나라 果實生産量의 45% 이상을 차지하며<sup>(1)</sup> 현재까지 대부분이 生果로서 이용되고 있는 實情이다.

그러나 미국을 비롯한 Australia, Canada 等地에서는 사과가 乾燥食品으로 利用된지 오래이며 이러한 方面으로 많은 研究가 進行되어왔다.<sup>(2-5)</sup>

國內에서는 孫等<sup>(6)</sup>이 乾燥사과의 제조법에 關係 報告한 바 있으나, 사과의 乾燥特性, 水分移動의 mechanism等에 關係하는 거의 報告되어있지 않다.

따라서 본 研究에서는 乾燥食品으로서 사과의 이용성증대를 爲해 實驗室 規模의 熱風乾燥機를 製作하여 乾燥條件을 다르게하여 사과의 乾燥特性을 究明하고자 몇 가지 實驗을 行하였으므로 報告하는 바이다.

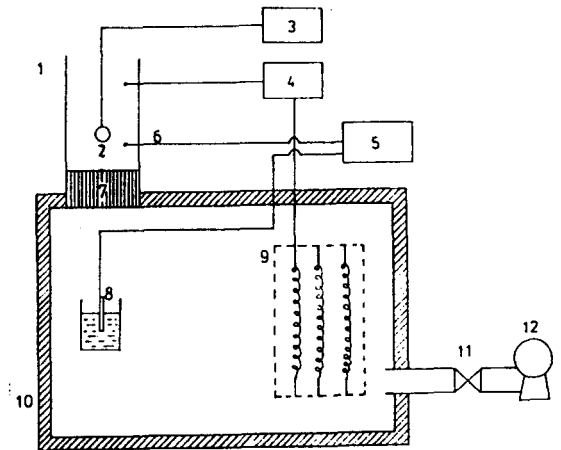
材料 및 方法

材料

1985年 9월 중순경 대구 七星市場에서 購入한 紅玉을 2~3°C의 냉장고에 貯藏하여 使用하였으며 試料의 크기는 2.5cm×2.5cm, 두께는 필요에 따라서 0.3~1.2cm까지 절단하여 使用하였다.

乾燥裝置

乾燥裝置의 概略圖를 Fig. 1에 圖示하였다. 熱風의 溫度는 thermostat와 relay로 調整하였으며 乾燥中 乾濕球溫度를 Copper-Constantan thermocouple에 連結된 多點溫度記錄計로 繼續的으로 記錄하였다.



1.drying chamber 2.sample 3.balance 4.thermostat  
5.multi-temperature recorder 6.dry-bulb thermocouple  
7.stream arrangement tube 8.wet-bulb thermocouple  
9.heater 10.constant temperature box 11.valve  
12.blower

Fig. 1. Experimental drying apparatus

風速은 送風機에 연결된 slide valve와 風速計로서 조절하였다. 乾燥試料은 balance(Ohaus Co, sensitivity 0.01g)에 연결하여 乾燥中 重量의 變化를 2분 간격으로 測定, 記錄하였다.

水分含量

初期水分含量은 上壓加熱乾燥法으로 測定하였으며 平衡水分含量은 乾燥後 90分동안 重量의 變化가 없을 때의 水分含量으로 하였다. 본 실험에서는 乾物基準水分含量(g water/g dry solid)을 사용하였다.

乾燥率

圖式微分法<sup>(7,8)</sup>을 사용하여 乾燥時間에 따른 水分含量의 곡선에서 구하였다.

擴散係數

Sherwood<sup>(9)</sup>는 微分板이 수없이 겹쳐진 固體의 한쪽 면에서 水分擴散에 의한 乾燥가 일어날 때 fick's law 에서 아래의 式을 誘導하였다.

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D \theta}{4d^2}\right\} \dots (1)$$

$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} < 0.6$  일 경우 加速 건조에 적용되며,

(1) 式은 다음과 같이 된다.

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D \theta}{4d^2}\right) \dots (2)$$

(2) 式을 이용하여 擴散係數 및 乾燥時間을 구하였으며<sup>(7,10)</sup> 擴散의 活性化 energy는 Arrhenius式을 이용하여 구하였다.<sup>(7,11)</sup>

$$D = A \exp(-Ea/RT) \dots (3)$$

內部水分의 分布

乾燥中 試料內部 水分의 分布를 實測値와 理論値 水分含量을 구하여 비교하였다. 實測値는 上壓加熱乾燥法으로, 理論値는 Fick's law에서 유도한 식<sup>(11)</sup>에서 각 구하였다.

結果 및 考察

乾燥特性曲線

試料두께 0.6cm 온도 50, 60, 70°C, 風速 1m/sec에서 사과的 乾燥特性曲線을 Fig 2에 도시하였다. 사과的 乾燥特性曲線은 恒速乾燥期間과 2단계의 減速乾燥期間으로 구분되며 臨界水分含量은 5.5~6.4g/g으로 나타

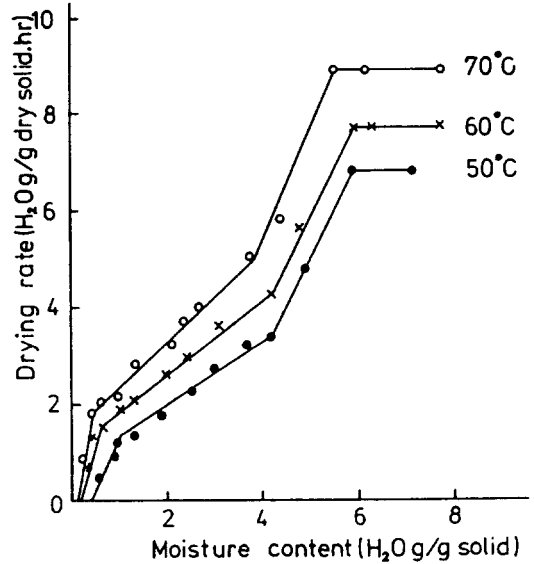


Fig. 2. Effect of temperature on drying rate with 1 m/sec of air velocity

났다.

熱風溫度의 증가에 따라 臨界水分含量이 낮아지는 요인은 恒速乾燥期間의 水分蒸發量이 공기의 온도, 습도 및 풍량에 따라 결정되므로 일정한 조건에서 공기 온도를 높이면 시료온도가 자연히 높게되어 시료내부의 수분을 더 많이 제거 할 수 있기 때문이라고 생각 된다.

熱風溫度가 증가함에 따라 乾燥率은 全乾燥期間에 걸쳐 상승하였으나, 風速을 2m/sec, 3m/sec로 증가시켜도 減速乾燥期間에는 별로 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

擴散係數

Fig. 3은 풍속 3m/sec, 熱風溫度 50, 60, 70°C일 때  $\frac{W - W_e}{W_c - W_e}$ 의 값을 시간에 대해 Semilog 그래프에 도시한 것으로서  $\frac{W - W_e}{W_c - W_e}$ 의 값이 0.6이하 일 때 기울기가 거의 직선에 가까운 것으로 나타났다. 따라서 사과的 減速乾燥期間에서 擴散에 의한 水分移動이 일어난다고 생각된다. 山澤等<sup>(12)</sup>은 곡류의 건조에서 加速 건조 초기에는 液狀水의 毛管移動과 蒸氣擴散에 의한 水分移動이 일어난다고 보고하고 있으며, Van Arsdell<sup>(13)</sup>은 平衡相對濕度가 100% 이하일 경우 減速乾燥期間에서는 水分의 擴散보다는 蒸氣擴散에 가깝다고 보고하고 있다. 이러한 報告로 미루어 보아 사과와 같은 多孔性의 細胞構造物은 減速乾燥初期의 毛管現象, 水分擴散, 蒸氣擴散의 複合的인 形態에 의해 乾燥가 進行되며 이

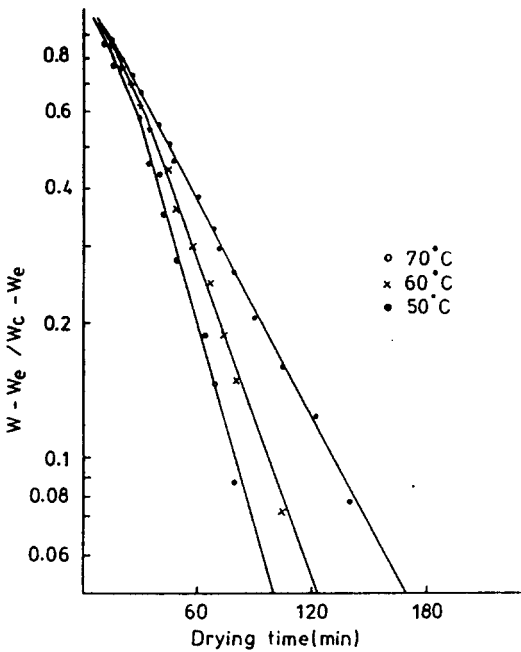


Fig. 3. In  $(W - W_e) / (W_c - W_e)$  vs. drying time at different temperature with 3 m/sec of air velocity

들의 경계점을 명확히 하기는 어렵다고 생각된다.

또한 각 건조조건에서 구한 확산계수를 Table 1에 나타내었다.

사과의 확산계수는  $1.1470 \sim 2.2148 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 인 것으로 나타났으며 이들 확산계수에서 구한 건조시간의 이론치를 실측치와 비교한 결과 거의 일치하였다.

Fig. 4에서 사과의 건조속도는 Arrhenius관계에 따라 온도에 대해 지수함수의 형태로 증가한다는 것을 알 수 있었으며 여기에서 구한 확산의 활성화 energy는 6.6k

cal/g mole이었다.

Table 2에서 여러가지 식품의 활성화 energy<sup>(14)</sup>를 비교한 결과 본 실험에서 구한 사과의 활성화 energy가 비교적 낮은 경향이였다.

이러한 이유는 사과의 조직이 비교적 他食品에 비해 多孔性이므로 乾燥表面으로의 水分移動에 대한 抵抗이 적기 때문이라고 생각한다.

溫度的 句配

두께 0.6cm의 사과절편에 Copper-Constantan thermocouple을 삽입하여 試料의 중심온도 및 표면온도를 測定하여 본 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

시료의 온도는 乾燥初期에 급격히 上乘하여 初期水

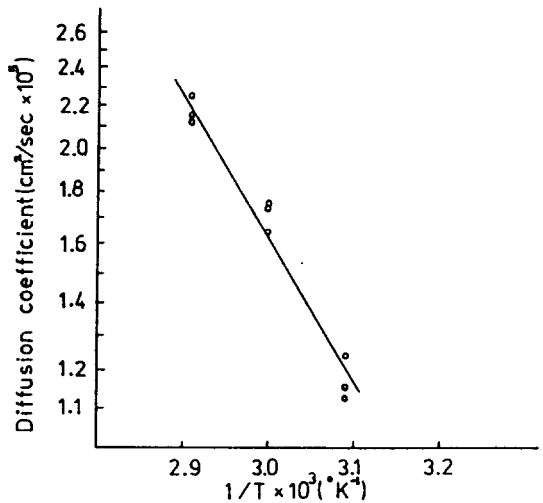


Fig. 4. Effect of temperature on the diffusion coefficient in apple dehydration

Table 1. Diffusion coefficient at various conditions

d.b. temp. (°C)	Air velocity (m/sec)	w.b. temp. (°C)	Diffusion coefficient (cm²/sec)	Drying time (min)	
				Experimental value	Theoretical value
50	1	24	$1.147 \times 10^{-5}$	285	308
	2	23.5	$1.2407 \times 10^{-5}$	260	269
	3	24.5	$1.1258 \times 10^{-5}$	240	251
60	1	26	$1.6430 \times 10^{-5}$	255	249
	2	26.5	$1.7369 \times 10^{-5}$	230	238
	3	26.5	$1.7621 \times 10^{-5}$	215	227
70	1	29.5	$2.1156 \times 10^{-5}$	190	219
	2	29	$2.2148 \times 10^{-5}$	165	174
	3	30	$2.1217 \times 10^{-5}$	155	144

Table 2. Activation energy for diffusion in various food materials

materials	Ea (Kcal/g mol)	Moisture content (d.b)
Fish muscle	7.1	0.1
Starch gel	8.1	0.063
Wheat	12.9-14.6	0.30-0.12
Potato	12.6	4.6
Cellulose (cotton)	8.3-9.0	0.1
Tobacco leaf	4.31	
Tapiocca root	5.4	
Sugar beet root	6.9	3.6-2.5
Rice		
Starchy endosperm	6.8	0.34-0.13
Bran	10.7	
Sorghum	7.5	0.21-0.06
Apple <sup>2</sup>	6.6	8.4-7.0

1 From reference 14.      2 Present work

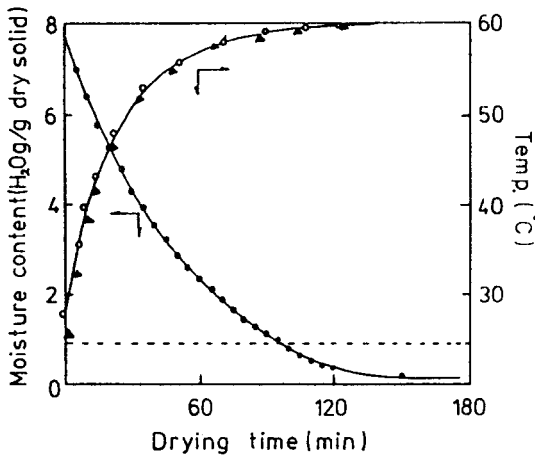


Fig. 5. Material temperature and moisture changes during drying

— dry bulb temp. ---- wet bulb temp. ○ surface temp. ▲ center temp. ● moisture content

分の 90% 정도 건조가 진행될 때는 거의 熱風의 乾球溫度와 일치하였으며 表面溫度와 中心溫度의 差異는 거의 없었다.

乾燥溫度와 試料溫度의 差異값은 Fig 6과 같이 도시한 結果  $\ln(W - W_e)/(W_c - W_e)$  對 時間의 기울기와 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 사과와 건조시 減速乾燥期間에서 熱의 移動과 物質移動이 거의 平衡狀態인 것으로 사료된다.

$$\ln \frac{(W - W_e)}{(W_c - W_e)} = -\frac{D\pi^2\theta}{4d^2} \dots\dots\dots(4)$$

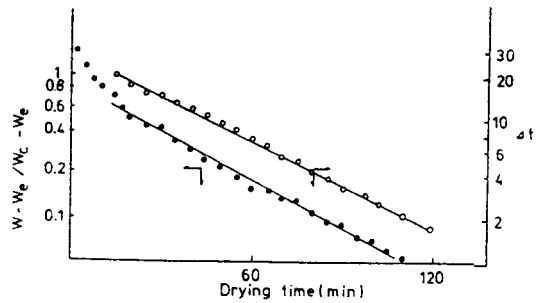


Fig. 6. Balance of heat and mass transfer  $\Delta t = d.b.t. - t_a$

(4)의 식에서

$$\ln \Delta t = \ln \Delta \text{ to } -\frac{D\pi^2\theta}{4d^2} \dots\dots\dots(5)$$

와 같은 식을 유도할 수 있었다.

이 식은 擴散係數를 알 때 減速乾燥初期의 온도를 구하는 데 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

内部 水分의 分布

Fig. 7은 두께 1.2cm의 시료를 건조후 1, 2, 3 時間 별로 두께에 대해 6등분하여 부위별로 수분을 측정하여 이론치와 비교하여 본 것이다. x축은 건조 시간 별로 시료두께를 6등분하여 나타내었다.

이론치와 실측치와 일치하는 경향을 나타내었으므로 Fick's law가 건조중 시료 내부 수분의 온도를 예측하는 데 상당히 유용하게 사용됨을 알 수 있었다.

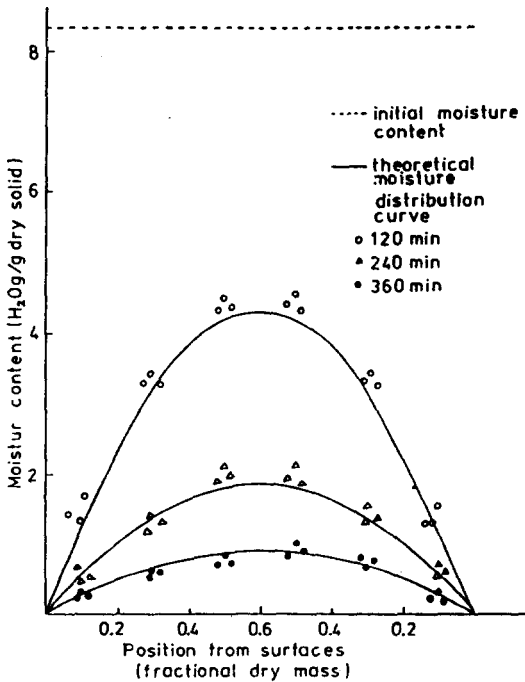


Fig. 7. Moisture distribution curve at various times

要 約

紅玉을 試料로 하여 乾燥條件을 다르게하여 乾燥特性, 水分移動現像, 乾燥中 試料溫度 및 內部水分의 分布를 조사하였다.

사과의 水分擴散係數는  $1.1470 \sim 2.2148 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$ , 擴散活性化에너지는  $6.6 \text{ kcal/g mole}$  이었으며 Fick's law에서 아래의 식을 유도 할 수 있었다.

$$\ln \Delta t = \ln \Delta t_0 - \frac{D \pi^2 \theta}{4d^2}$$

乾燥中 內部水分分布의 理論値와 實測値는 거의 일치하였다.

기 호

A : Frequence factor

- D : Diffusion coefficient ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
- d : Half thickness of sample (cm)
- Ea : Activation energy ( $\text{cal/g mol}$ )
- R : Gas law constant ( $1.98 \text{ cal/g mol } ^\circ\text{K}$ )
- T : Absolute temperature ( $^\circ\text{K}$ )
- $\Delta t$  : Temperature difference = d.b.t - ts ( $^\circ\text{C}$ )
- Wc : Critical moisture content (g/g)
- We : Equirbrium moisture content (g/g)
- d.b.t : Dry bulb temperature ( $^\circ\text{C}$ )
- w.b.t. : Wet bulb temperature ( $^\circ\text{C}$ )
- $\theta$  : time (sec)

문 헌

1. 農業協同組合中央會 : 農協年鑑 p. 60 (1981)
2. Eisenhardt, N.H.E. and Cording, J.J.: *Food Eng.*, 36 (6), 53 (1964)
3. Daniel, F.F. and Lazar, M.E.: *Food Tech.*, 23, 688 (1969)
4. Rahman, A.R. and Schmidt, T.R.: *U.S. Patent*, 3, 535, 127 (1970)
5. Esher, F. and Neukom, H.: *Lebensmweissin. Tchrrol.*, 5, (4), 145 (1971)
6. 孫泰華, 鄭基澤, 徐正填 : 慶北大學生產技術誌, 2, 8 (1967)
7. Saravacos, G.D. and Charm, S.E.: *Food Tech.*, 16, 78 (1962)
8. Perry, J.H.: *Chemical Engineers' Hand Book*, 2th McGraw-Hill Co, New York, p.802
9. Sherwood, T.K. *Ind. Eng. Chem.*, 21, 1134 (1929)
10. Vaccarezza, L.M. and Chirife, J.: *J. Food Sci.*, 40, 1268 (1975)
11. Vaccarezza, L.M., Lombardi, L.M. and Chirife, J.: *J. Food Tech.*, 9, 317 (1974)
12. 山澤新吾, 吉崎繁, 前川孝昭, 園部和彦 : 農業機械學會誌, 33 (3), 279 (1970)
13. Van Arsdel, W.B.: *Trans. A. I. Che.*, 43 (1), 13 (1947)
14. Suarez, C., Viollaz, P. and Chirife, J.: *J. Food Tech.*, 15, 523 (1980)

(1985년 12월 11일 접수)