

以實驗方法研究速溶茶之質傳性質

Experimental Study of Diffusivity for Instant Tea

國立臺灣大學農機系副教授

國立臺灣大學農機系研究生*

陳 世 銘

洪 偉 智

Suming Chen

W.J. Hong

摘 要

本研究係依據雙面加熱雙面脫水模式，以實驗迴歸的方式來探討速溶茶在冷凍乾燥時的質傳性質，以作為進一步控制速溶茶乾燥條件的基礎。

加熱板溫度設定為30°C或50°C，乾燥室壓力控制在40~45 Pa 之間，由速溶茶質量與時間的關係，以迴歸方法求得30%固形物之速溶茶的擴散係數平均值為 0.0029 m²/s。實驗同時顯示 30°C 或 50°C 的加熱板溫度對實驗結果之擴散係數值影響不大。本實驗分析除了可以求得速溶茶的擴散係數外，尚可算出冷凍乾燥機的質傳係數，因此可藉以判斷乾燥時水蒸氣移動之阻力主要來自乾燥機性能或是速溶茶本身之物理結構特性。以本研究為例，主要阻力在於速溶茶，若要縮短乾燥時間，應由改善速溶茶孔隙結構着手。

為確保乾燥過程中凍結的速溶茶不會溶化，當乾燥室壓力為45 Pa 時，凍結溫度至少要在零下25°C以下，且加熱板溫度最好不要超過30°C。

關鍵詞：速溶茶、冷凍乾燥、擴散係數

ABSTRACT

In this study, the two-side heating and two-side dehydration model was used, and the experiments were conducted to evaluate the mass transfer diffusivity of instant tea during freeze drying processes, in order to provide a basis for better controls of drying conditions.

The temperature of heating plates were set at 30°C or 50°C while the pressure of drying chamber was regulated to 40~45 Pa. The regression results of experiments indicate that the average value of diffusivity for instant tea (30% solid) is 0.0029 [m²/s]. It is also found that the heating-plate temperatures (30°C or 50°C) contribute very little effects to the diffusivity. This analysis not only can be used to estimate the diffusivity of instant tea, but also can be employed to calculate the mass transfer coefficient of the freeze-dryer. The values of diffusivity and mass transfer coefficient can

*現職為華新麗華電線電纜公司、電力生產技術部副工程師。

be used to determine either the physical structure of instant tea or the performance of the freeze dryer is the dominant in the resistance to the vapor transport during drying. In this study, the major resistance is due to the nature of instant tea. In order to reduce the drying time, the porous structure of instant tea needs to be modified.

When the pressure of the chamber is 45 [Pa], in order to assure that the frozen instant tea would not melt during the drying process, it is suggested that the freezing temperature be below -25°C and the heating-plate temperature be better not exceed 30°C .

Keywords: Instant Tea, Freeze Drying, Diffusivity

一、前 言

茶是國人傳統上的一種重要飲料，由於社會的進步，消費型態的改變，具有原茶風味而且沖調方便的速溶茶已逐漸受消費者所喜愛，是一種新興的飲料產品。除了以茶葉為原料製作速溶茶，副茶亦是可以考慮的重要原料，因為茶葉在精製及儲運的過程中，會產生大量的副茶，這些副茶若混雜在一般的茶葉中出售，會降低茶葉品質及售價。為了減少這種損失，可以參照速溶咖啡的製造方法，以副茶為原料，將茶葉中水溶性成份萃取出來，脫水製成粉狀或是顆粒狀，而成速溶茶。

目前國內速溶茶之研製仍屬試驗階段，其相關的物理性質資料缺乏，所以本研究之目的即以實驗方法探討速溶茶的質傳性質，以便能更進一步地控制適當的乾燥條件，縮短乾燥時間、增加產量、降低成本以及確保品質。

各種速溶茶生產流程均大同小異，其主要過程可分為下列五個步驟：

1. 萃取：所謂萃取是利用溶劑將物質內可溶性成分溶解、析出。茶葉的萃取通常是用 90°C 的熱水當溶劑，可分成浸出式、澆滲式及逆流式連續萃取。

2. 濃縮：利用離心式蒸發濃縮機來提高茶湯固形物的濃度。

3. 泡化：一般使用氮氣做為起泡劑，目的在降低其密度，增加易溶性，以適應沖泡習慣。

4. 凍結：利用溫度降低使泡化後的茶湯凍成固態。

5. 乾燥：此一步驟通常採用冷凍乾燥方式將茶湯內結成冰的水分除去，留下乾物，即是所謂的速

溶茶。

上述諸過程中，乾燥最費時間，且攸關產品品質，為生產之瓶頸。由於整個冷凍乾燥過程均保持低溫狀態，所以茶色比較不會變，同時也較能保持原來的香味。能保持較佳的原味是冷凍乾燥法最大的特點之一。

冷凍乾燥是一種低溫低壓的乾燥方法，顧名思義，希望能兼具冰凍與乾燥兩者的優點，以獲得一種較佳的保存狀態。如圖一所示，冷凍乾燥的脫水過程可以分為三個步驟 (Van Arsdell et al., 1973)：

1. 在常溫常壓下的物質 (A點) 藉降低溫度而呈凍結狀態 (B點)。

2. 利用真空泵 (Vacuum pump) 將乾燥室壓力降至水的三相點 (Triple point) 壓力 (約 610 Pa) 以下 (C點)。

3. 保持低壓並升高溫度，物質內的水分由凍結直接昇華為氣態的水蒸氣並排除掉 (D點)。

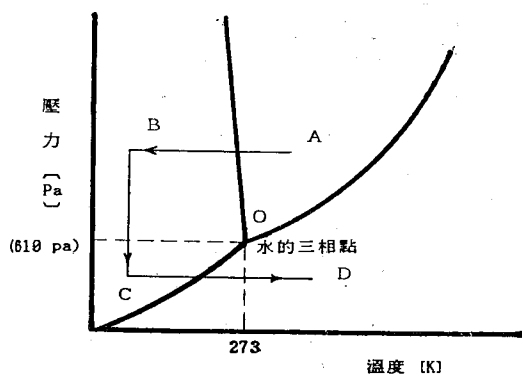


圖1. 冷凍乾燥程序

在冷凍乾燥進行中，有兩個現象同時在進行：

1. 熱傳現象：熱量從外界熱源經乾燥層或凍結層傳到昇華發生的區域，以提供冰昇華為水蒸氣時所吸收的潛熱。在物料內部的熱傳方式以傳導作用為主。

2. 質傳現象：昇華區域所產生的水蒸氣必須經過多孔的乾燥層排除。在低壓的狀態下，水蒸氣移動受 Knudsen 擴散的作用較大，相反地，當壓力較高時，由於無活性氣體存在的影響，分子擴散的作用較大。

在物料內，已排除水分的部份稱為乾燥層，尚未脫水的部份稱為凍結層。乾燥層與凍結層間交界的過渡區域稱為昇華界面。昇華界面的厚度有兩種不一樣的說法，有一派學者認為該昇華界面的厚度不可忽略；反之，另一派學者則認為此界面的厚度可以忽略不計。無論如何，忽略昇華界面厚度的假設比其他假設更能精確的分析冷凍乾燥的程序 (King, 1971)。Orville C. Sandall 等人 (1967) 即根據上述假設，提出一種利用實驗方法，考慮從上、下兩個方向對稱加熱，以重量變化與時間的關係來分析冷凍乾燥之質傳現象。

二、研究方法

(一) 理論模式根據

Orville C. Sandall 等人 (1967) 的方法，假設物料內部的熱傳與質傳均為一維且二者傳動方向平行，則昇華界面可看成是一個與熱傳 (或質傳) 方向垂直的平面。考慮從上、下兩個方向對稱加熱，熱量由物料的兩邊以傳導的方式傳入 (如圖 2 所示)，所以每一邊所傳入的熱量為：

$$q = -K_1 \frac{dT}{dx} = K_1 \frac{T_o - T_x}{X} \dots\dots\dots(1)$$

同樣地，水蒸氣也從兩邊同時排出，假設乾燥層的

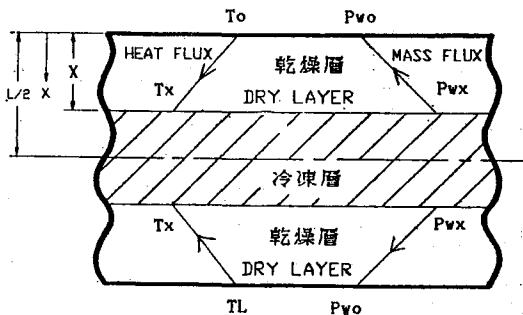


圖 2. 雙面加熱雙面脫水模式

孔隙像毛細管束排列一般，且壓力夠低，則在乾燥層內的質量傳動可以合理地假設為 Knudsen 擴散，故其單獨一邊的質通量為

$$N = \frac{1}{\frac{1}{K_m} + \frac{RTX}{DM}} (P_{wx} - P_{wc}) \dots\dots\dots(2)$$

令 Y 表示凍結層厚度與原物料厚度之比，則

$$Y = \frac{L - 2X}{L} \dots\dots\dots(3)$$

$$X = (1 - Y) \times \frac{L}{2} \dots\dots\dots(4)$$

因為熱傳與質傳在物料兩面同時發生，所以可以明顯地看出物料結構分成三個區域：上、下兩層是乾燥層，中間則為凍結層。所以整個物料內部共有兩個昇華界面，這兩個界面隨乾燥進行而逐漸向內縮，其內縮的絕對移動速率是

$$V = \frac{L}{2} \times \left(-\frac{dY}{dt} \right) \dots\dots\dots(5)$$

若乾燥時物料所排出的總水量是 ΔW [Kg]，單面乾燥面積為 A [m²]，則單位體積昇華的水分為 $[\Delta W / (A \times L)]$ 。假設昇華界面通過的區域，物料會由凍結層變成乾燥層，則單面質通量可以用昇華界面的移動速率與單位體積乾燥量的乘積表示

$$N = \frac{\Delta W}{2A} \times \left(-\frac{dY}{dt} \right) \dots\dots\dots(6)$$

由式(2)與式(6)可得

$$\frac{1}{\frac{1}{K_m} + \frac{RTX}{DM}} (P_{wx} - P_{wc}) = \frac{\Delta W}{2A} \left(-\frac{dY}{dt} \right) \dots\dots\dots(7)$$

將式(4)代入式(7)並整理得

$$1 - Y = \frac{4AMD(P_{wx} - P_{wc})}{\Delta WRTL} \left(-\frac{dt}{dY} \right) - \frac{2DM}{K_mRTL} \dots\dots\dots(8)$$

將上式積分並代入初始條件：t = 0 時 (1 - Y) = 0，得

$$1 - Y = \frac{8AMD(P_{wx} - P_{wc})}{\Delta WRTL} \times \frac{t}{1 - Y} - \frac{4DM}{K_mRTL} \dots\dots\dots(9)$$

其中 (1 - Y) 表式乾燥層厚度與物料厚度之比，此值可由下列二式計算而得

$$1 - Y = \frac{2X}{L} = \frac{W_o - W_t}{\Delta W} \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta W = W_o - W_f = \frac{M_o - M_f}{M_o + 100} \times W_o \dots\dots(11)$$

所以

$$1 - Y = \frac{(W_o - W_t)}{W_o} \times \frac{M_o + 100}{M_o - M_f} \dots\dots\dots(12)$$

同理

$$\left(-\frac{dY}{dt}\right) = \frac{\Delta W_t}{\Delta t \Delta W} \dots\dots\dots(13)$$

從式(8)可以明顯地看出來，(1-Y 與 -(dt/dY))成線性關係，若繪成一條 (1-Y) 對 -(dt/dY) 的曲線，此線應該是一條直線，故能迴歸而得一式，形如

$$1 - Y = a \times \left(-\frac{dt}{dY}\right) + b \dots\dots\dots(14)$$

$$a = \frac{4 \text{ AMD}(P_{wx} - P_{wc})}{\Delta W \text{RTL}} \dots\dots\dots(15)$$

$$b = -\frac{2DM}{K_m \text{RTL}} \dots\dots\dots(16)$$

a：迴歸式常數，如(15)式所定義

b：迴歸式常數，如(16)式所定義

同理由式(9)也可得一迴歸式，形如

$$1 - Y = c \times \left(\frac{t}{1 - Y}\right) + d \dots\dots\dots(17)$$

$$c = \frac{8 \text{ AMD}(P_{wx} - P_{wc})}{\Delta W \text{RTL}} \dots\dots\dots(18)$$

$$d = -\frac{4DM}{K_m \text{RTL}} \dots\dots\dots(19)$$

c：迴歸式常數，如(18)式所定義

d：迴歸式常數，如(19)式所定義

由(15)式即可求得物料內部的質傳性質

$$D = \frac{a \text{RTL} \Delta W}{4 \text{ AM}(P_{wx} - P_{wc})} \dots\dots\dots(20)$$

再代回(16)式，也可以同時求得外部之質傳係數

$$K_m = -\frac{2DM}{b \text{RTL}} \dots\dots\dots(21)$$

同理由(18)式即可求得物料內部的質傳係數

$$D = \frac{c \text{RTL} \Delta W}{8 \text{ AM}(P_{wx} - P_{wc})} \dots\dots\dots(22)$$

再代回(19)式，也可以同時求得外部之質傳性質

$$K_m = -\frac{4DM}{d \text{RTL}} \dots\dots\dots(23)$$

(二)實驗方法

本研究實驗部分係以茶葉改良場現有之真空冷凍乾燥機進行試驗，該機購自丹麥 ATLAS-DANMARK 公司，如圖 3 所示。包括真空乾燥室、真空泵、加熱系統、冷凝系統、承載托盤、溫度控制系統、壓力控制系統、及溫度、壓力、重量記錄器等。實驗壓力約在 40~45 Pa 之間，產品表

面溫度則設定為 30°C (或 50°C)。

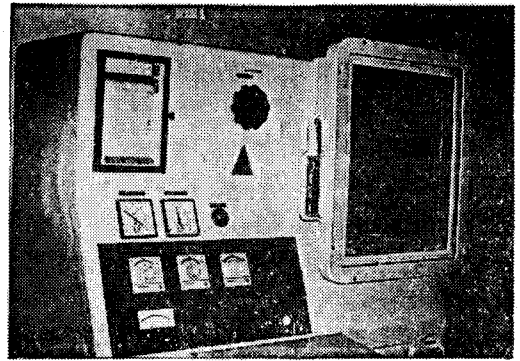


圖 3. ATLAS-DANMARK 牌冷凍乾燥機

該機原附有物料承載托盤四個，長 50 公分、寬 40 公分、高 2.5 公分。這些托盤底部為密封金屬，僅能傳遞熱流，水蒸氣無法通過，故僅適於單面脫水的情況。為了配合雙面脫水模式之分析，另外設計一種托盤，長 45 公分、寬 35 公分、高 2.5 公分。托盤之周緣是金屬板，內緣焊上對稱的八根細鋼條，鋼條直徑 0.2 公分，呈左右彎曲，以增加對凍結物料的附著力，其底部採活動裝置，可隨需要裝上或拆掉，當拆掉底部時，水蒸氣就可以從物料的兩面擴散出來。

本實驗所使用的材料是以臺灣省茶業改良場生產的包種茶，經熱水萃取、濃縮，而成固形物含量 30% 的茶湯，將此茶湯裝在托盤中，並置放於零下 30°C 之冷凍庫中，凍成 450×350×25mm 之塊狀物。凍結之前，先將熱耦計固定於托盤上，以便能量測凍結區域之溫度。

本實驗依下列程序進行：

1. 準備好一盤 30 Brix 的茶湯凍結塊。
2. 在實驗開始前 15 分鐘啟動冷凝系統。
3. 將熱耦計安裝在各量測點上。
4. 將待乾燥之茶湯凍結塊放入真空乾燥室，並同時啟動真空泵與記錄器。
5. 設定加熱板溫度為 30°C (或 50°C)，約 15 分鐘後，乾燥室壓力降至 60 Pa 以下時，再啟動加熱裝置。
6. 觀察重量減少的情形，直到重量不再減少，即可判斷乾燥已經完成。(中心溫度也可當作判斷的根據，當中心溫度上升到與加熱溫度一樣時，即表示乾燥已完成)
7. 將整塊乾燥完成的速溶茶分成前、中、後三

段，分別取樣，以烤箱法來量其含水率。

本實驗中含水率之計算方法為：

(a)初含水率：初含水率係以茶湯之固形物含量計算而得，如固形物含量為30%，則推算其含水率為233% [db]。

(b)終含水率：本實驗採用烤箱法，依茶業改良場所用的茶葉含水率測定標準，以100°C烤一個小時後，利用其重量變化來計算速溶茶的終含水率。

三、結果與討論

以加熱板溫度30°C為例子，圖4為實驗時速溶茶樣本中心溫度、上表面溫度、重量與時間的關係，由這個圖可以看出當乾燥即將完成時，中心溫度會有急速上升的現象，此現象即可據以判斷乾燥是否完成；另外在乾燥初期(第一個小時內)溫度會下降，這應是乾燥室壓力由常壓降為真空時所造成的。本實驗依加熱板溫度的設定值，分成30°C與50°C兩組。每次實驗之數據均進行下列四種迴歸計算(如圖5)：

A：利用(10)式代入(17)式作 $(1-Y)$ 對 $[t/(1-Y)]$ 之迴歸

B：利用(12)式代入(17)式作 $(1-Y)$ 對 $t/(1-Y)$ 之迴歸

C：利用(10)式代入(14)式作 $(1-Y)$ 對 $(-dt/$

$dY)$ 之迴歸

D：利用(12)式代入(14)式作 $(1-Y)$ 對 $(-dt/dY)$ 之迴歸

將A、B法迴歸所得的係數代入(22)、(23)式；將C、D法迴歸所得的係數代入(20)、(21)式，即可算得速溶茶之擴散係數(D)及外界質傳係數(Km)如表1所示。

表1. 雙面脫水模式計算之擴散係數(D)及外界質傳係數(Km)

單位：D = m²/s
Km = mole/s-m²-Pa

		No. 1	No. 2	No. 3
D	A	0.0030	0.0028	0.0028
	B	0.0030	0.0028	0.0029
	C	0.0014	0.0017	0.0016
	D	0.0014	0.0012	0.0017
Km	A	4.8E-6	4.9E-6	2.0E-6
	B	4.8E-6	4.9E-6	2.0E-6
	C	1.7E-5	5.1E-6	6.7E-6
	D	1.7E-5	3.5E-6	6.7E-6

No. 1：加熱板溫度30°C
No. 2：加熱板溫度30°C
No. 3：加熱板溫度50°C

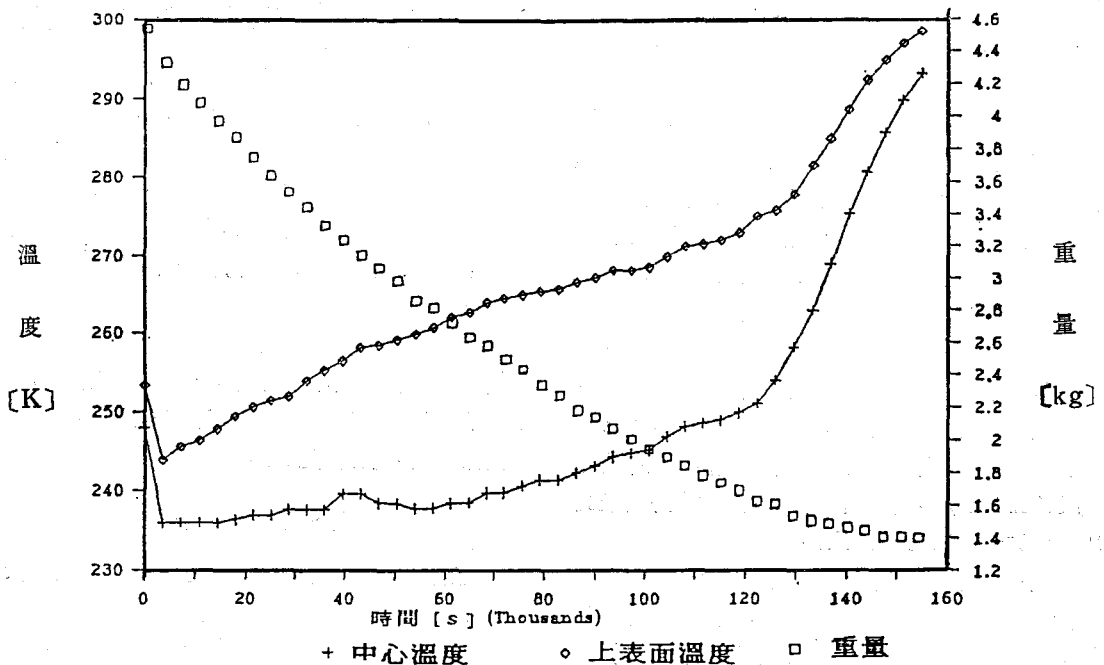


圖4. 速溶茶於冷凍乾燥時中心溫度、上表面溫度、重量與時間之關係

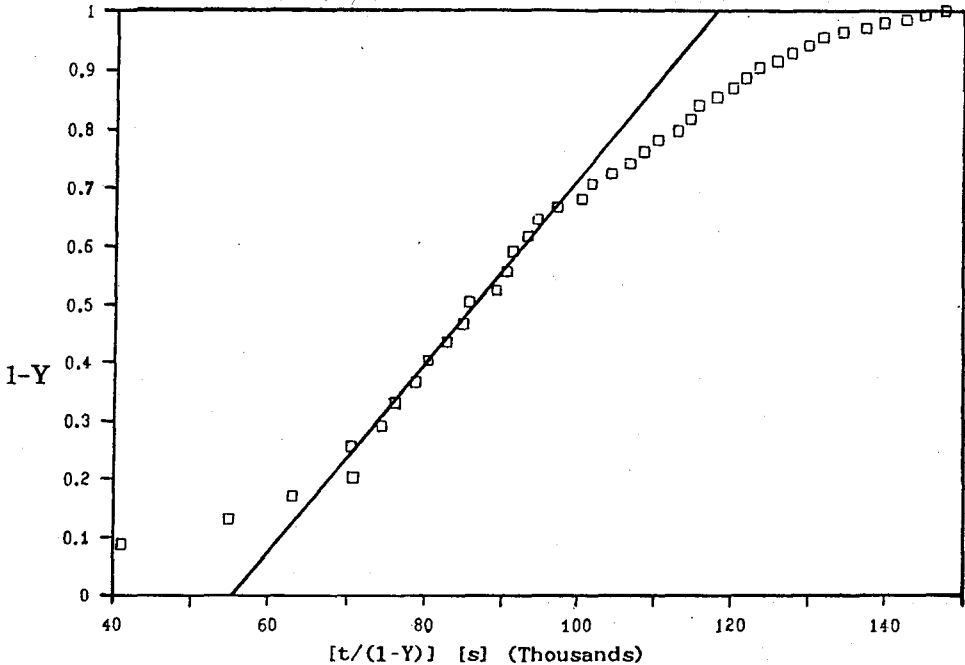


圖5. 實驗 No. 1 (雙面脫水, 加熱板溫度=30°C), 以A法所作之迴歸圖

比較A法與B法所得的結果, 可以發現不管是用乾燥前後的重量變化(A法)或是用乾燥前後的含水率(B法)來計算, 其結果都一樣。事實上, 通常冷凍乾燥後產品的含水率都很低, 而乾燥前茶湯的含水率則相當高, 相較之下, 最後殘留的水分幾乎可以忽略不計, 因此只要乾燥時間夠, 這兩種方法算出來的結果應該不會有太大的差異。

另外, 若以A法與C法來比較, 則會發現用(14)式與(17)式所得的結果差異相當大, 原因是(17)式考慮的是從乾燥一開始到某一時刻的變化, 因此各別單位時間內重量變化因量測產生的誤差影響較不明顯, 所以得到的迴歸式較穩定; 相反的, (14)式所考慮的是單位時間內的重量變化, 於是量測誤差的影響就變得很大, 其結果就不會很穩定。因其結果不穩定, 表1中之數據應以A法及B法求得之結果為準, C法與D法則捨去不用, 或僅為參考用。若以A法及B法之數據平均, 則速溶茶之擴散係數平均值為 $0.0029 \text{ m}^2/\text{s}$, 冷凍乾燥機之質傳係數平均值為 $3.9 \times 10^{-6} \text{ mole/s-m}^2\text{-Pa}$ 。

表一同時也列出各種計算方式所算出之 K_m 值, 此值是冷凍乾燥機的性能常數, 隨乾燥機不同而變, 與速溶茶無關。因為 K_m 與 (DM/RTL) 這兩個數值具有相同的物理意義, 所以可由其數值大

小之比較來判斷乾燥時水蒸氣移動之阻力主要來自乾燥機性能或是速溶茶本身。以 No. 1 之A法計算之果結來看, $(DM/RTL)=0.0000011 [\text{mole/s-m}^2\text{-Pa}]$, 而 $K_m=0.0000048 [\text{mole/s-m}^2\text{-Pa}]$, 另以 No. 2、No. 3 之A法計算結果算出之值則分別為 $(DM/RTL)=0.0000010 [\text{mole/s-m}^2\text{-Pa}]$, $K_m=0.0000049 [\text{mole/s-m}^2\text{-Pa}]$ 以及 $(DM/RTL)=0.0000010 [\text{mole/s-m}^2\text{-Pa}]$, $K_m=0.0000020 [\text{mole/s-m}^2\text{-Pa}]$, 顯然 (DM/RTL) 要比 K_m 小, 所以乾燥時的阻力主要來自速溶茶, 若要縮短乾燥時間, 應由改善速溶茶性質如結晶型態(與凍結速率有關)、造粒或乾燥方法著手。

另依據洪(1988)之實驗發現, 為確保乾燥過程中凍結的速溶茶不會溶化, 當乾燥室壓力為 45 Pa 時, 凍結溫度至少要在零下25°C以下, 且加熱板溫度最好不要超過30°C。

四、結 論

綜合前面的討論及實驗結果, 得到以下結論:

1. 速溶茶的擴散係數可以利用雙面脫水模式由實驗數據計算得之。當固形物含量30%的茶湯在冷凍乾燥時, 其擴散係數平均是 $0.0029 [\text{m}^2/\text{sec}]$ 。

2. 30°C 與 50°C 的加熱板溫度對實驗結果之擴散係數值影響不大。

3. 本實驗分析除了可以求得速溶茶之擴散係數外，尚可算出冷凍乾燥機的質傳係數，因此可藉以判斷乾燥時水蒸氣移動之阻力主要來自乾燥機性能或是速溶茶本身之物理結構特性。

五、檢討與建議

1. 在本實驗裏所用的原料都是固形物含量30%的茶湯，若茶湯內的固形物含量不一樣時，其質傳性質應該也會跟著變化。所以可以探討茶湯固形物含量與其質傳性質的關係。

2. 本研究的對象是整塊凍結的速溶茶，而目前臺灣省茶業改良場已將造粒運用到實際的速溶茶生產。因此，可將研究對象轉移到造粒的速溶茶，嘗試研究造粒外形的變化及因造粒而增加的孔隙對於質傳性質的影響。

3. 可嘗試利用電腦模擬方式來估算速溶茶之質傳性質。

六、誌謝

本研究期間承蒙李允中博士、阮逸明博士之建議及協助，另蒙臺灣省茶業改良場提供設備，並協助茶湯材料之準備，謹此一併誌謝。

七、符號說明

D : 乾燥層的水蒸氣擴散係數 [m²/s]
K₁ : 乾燥層熱傳導係數 [J/s-m-K]
K_m : 外界質傳係數 [mole/s-m²-Pa]
L : 物料厚度 [m]
M : 水分子量 [Kg/mole]
M₀ : 初含水量百分比 (乾基) [無因次]
M_f : 終含水量百分比 (乾基) [無因次]
N : 水蒸氣質通量 [Kg/m²-s]
P_{wx} : 昇華面之水蒸氣分壓 [Pa]
P_{wc} : 冷凝器外之水蒸氣分壓 [Pa]

q : 熱通量 [J/s-m²]
R : 氣體常數 [Pa-m³/mole-K]
t : 時間 [s]
T : 溫度 [K]
TL : 物料下表面溫度 [K]
T₀ : 物料上表面溫度 [K]
T_x : 昇華界面溫度 [K]
V : 昇華界面移動速率 [m/s]
W₀ : 乾燥前物料總重 [Kg]
W_t : 乾燥開始 t 秒後的物料重 [Kg]
W_f : 乾燥完成後的物料重 [Kg]
x : 物料厚度方向之座標軸 [m]
X : 昇華界面位置 [m]

八、參考文獻

1. 洪偉智。1988。速溶茶在冷凍乾燥時的質傳性質。碩士論文，臺大農機系，臺北。
2. 阮逸明、邱再發。1987。「速溶茶之研製」。臺灣農業第22卷，第6期，P.21。
3. 蘇弗第。1976。「茶精之提製」。食品加工。三民書局，臺北市。
4. King, C.J. 1971. Freeze-drying of foods. C.R.C.
5. Lusk, G., M. Karel and S.A. Goldblith. 1964. Thermal Conductivity of Some Freeze-dried Fish. Food Technology, Vol. 18, P. 121.
6. Sandall, O.C., C.J. King and C.R. Wilke. 1967. The Relationship Between Transport Properties and Rates of Freeze-Drying of Poultry Meat. A.I.Ch.E. Journal, Vol. 13, P. 428.
7. Van Arsdell, W.B., M.J. Copley and A.I. Morgan 1973. Food Dehydration. Vol. 1, 3. The AVI Publishing Company.