

回轉乾燥機의 計算과 米糠의 乾燥特性

皇 甫 漢*·孫 晋 彦*

The Calculation of Rotary-dryer and the Drying Characteristics of Ricebran

H. Hwang-Bo*, Jin Un Son*

*Dept. of Chem. Eng., Daegu College

An alternate procedure for the calculation of rotary-dryer is proposed, using the operating characteristics and the ratio of the time rate of heat capacity. The number of transfer unit in the period of constant rate of drying may be calculated from the knowledge of the humidity-increase in the dryer.

Drying characteristic curves of ricebran are plotted from the experimental data and the diffusion data and the diffusion coefficients of the moisture in the ricebran are calculated.

An example for the calculation of rotary-dryer is given.

1. 緒 言

材料가 熱風과 向流 혹은 並流로 운반되는 連續式 回轉 乾燥器의 計算은 若干의 研究者^{1,2)}에 依하여 연구되었다. 그들은 乾燥期間을 [Ⅰ] 材料의 예열기간, [Ⅱ] 恒率 건조기간 및 [Ⅲ] 材料의 加熱期間으로 區分하고 各 기간에서 材料와 熱風간의 熱 및 物質收支 關係를 연결하여 所要 乾燥面積을 計算하였다. 그들은 우선 經驗에 의하여 最適條件을 주는 건조기의 全 移動單位數를 가정하고 乾燥器 内の 熱風의 溫度分布를 近似的으로 計算하였다.

Bosnjakovic ^{3,4)}는 熱交換器의 計算을 위하여 操作 特性值(Betriebscharakteristik)와 熱 交換하는 物質의 水值(Wasserwert)의 比를 利用하였다.

本文에서는 그의 方法을 回轉건조기의 3 건조기간에 적용한다. 특히 건조第2기간에는 熱交換하는 두 物質

간에 物質의 移動(水分)이 있으므로 그 熱 交換 및 物質收支 關係를 연결하여 移動單位數를 求하는 方法을 고려하였다.

끝으로 米糠을 乾燥할 回轉건조기를 설계하기 위하여 米糠油를 抽出하고 남은 米糠을 試料로하여 熱風의 風速 및 溫度에 의한 乾燥特性을 實驗하고 그 結果를 整理하였다. 이 資料를 근거로 하여 回轉건조기의 計算 例를 들었다.

2. 理 論

一般的으로 回轉건조기의 計算은 건조기간을 [Ⅰ] 材料의 예열기간, [Ⅱ] 恒率건조기간, [Ⅲ] 재료의 加熱 期間으로 區分하고 다음과 같은 가정 하에서 한다.

- (1) 건조기는 外部와 단열되어 있다.
- (2) 건조재료 表面의 水分은 非結合水이다.
- (3) 이 水分은 주위의 空氣 以外에서 受熱되지 않는다.

*大邱大學 化工科

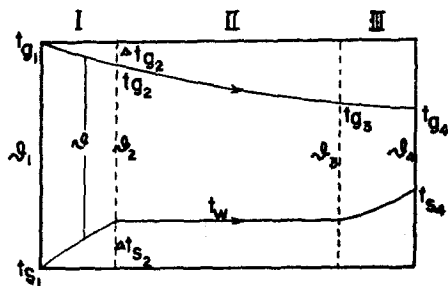


Fig. 1-a. Course of Temperature in a Continuous Parallel Flow Dryer

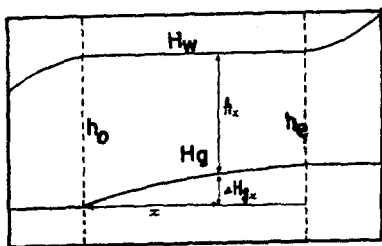


Fig. 1-b. Course of Humidity (H_g) of Air and Saturated Humidity (H_w) of Air at the Surface Temperature of Drying Material in a Parallel Flow Dryer

(4) 材料의 예열기간에는 水分 증발이 없다.
(5) 材料表面의 水分은 恒率건조기간 中 空氣의 濕球 온도에서 完全히 증발한다.

(6) 材料 加熱기간 中에는 水分 증발이 없다.

그림 1 과 그림 2 는 並流 및 向流式回轉건조기의 '各 건조기간에서 건조재료의 溫度와 熱風의 溫度 및 濕度 그리고 건조재료의 溫度에 있는 공기의 포화습도 곡선이다.

건조기의 예열기간의 任意的 斷面要素에서 空氣와 건조 材料가 交換한 熱量 dQ_1 은 (1)式과 (4)式으로 表示할 수 있다.

$$dQ_1 = uaS(t_g - t_s)dz = u \cdot dF \cdot \theta \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \theta = t_g - t_s \quad (2)$$

$$\text{그리고 } dF = aS \cdot dz \quad (3)$$

또 이 건조기간에서 空氣와 材料의 水值 즉 比熱容量 速度를 각각 W_{g1} 및 W_{s1} 이라고 두면

$$dQ_1 = -W_{g1} \cdot dt_g = \pm W_{s1} \cdot dt_s \quad (4)$$

$$\text{여기서 } W_{g1} = m_g \cdot C_p = \dot{m}_g \cdot C_H \text{이고} \quad (5)$$

$$W_{s1} = m_s \cdot C_s \text{이다} \quad (6)$$

단, (4)式 右邊의 +符號는 並流操作時이고 -符號는 向流操作時이다.

이 斷面에서 空氣와 材料의 溫度差를 θ 로 表示하면

$$d\theta = dt_g - dt_s = -dQ_1 \left(\frac{1}{W_g} \pm \frac{1}{W_s} \right) \quad (7)$$

(1)式을 (7)式에 代入하여 整理하고 積分하면

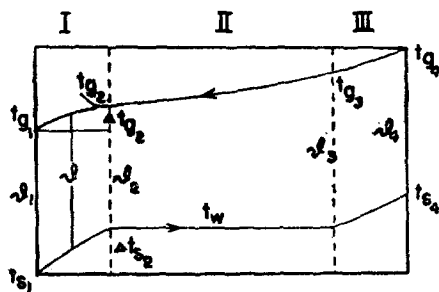


Fig. 2-a. Course of Temperature in a Continuous Countercurrent Dryer

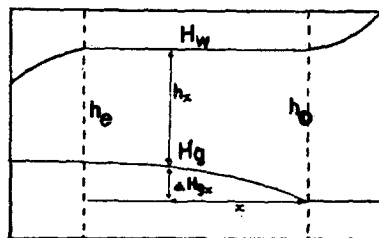


Fig. 2-b. Course of Humidity (H_g) of Air and Saturated Humidity (H_w) of Air at the Surface Temperature of Drying Material in a Countercurrent Dryer

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{u dF}{W_{s1}} \left(1 \pm \frac{W_{s1}}{W_{g1}} \right) \quad (8)$$

$$\text{곧 } \frac{\theta_2}{\theta_1} = e^{-\frac{u F_1}{W_{s1}} \left(1 \pm \frac{W_{s1}}{W_{g1}} \right)} \quad (9)$$

여기서

θ_1 과 θ_2 는 각각 材料入口와 材料豫熱기간 直後의 空氣와 材料의 溫度 差이고, F_1 은 이 乾燥기간 中 空氣에 노출된 材料의 總表面積이다. (9)式을 그림 3 에 그려 놓았다.

恒率건조기간 中 材料표면의 水分은 平衡水滴溫度에서 증발하고 생성된 수증기는 水滴의 표면에서 불포화된 空氣 中으로 擴散한다. 이때 必要한 증발잠열은 空氣에서 水滴으로 供給된다.

지금 空氣의 온도와 습도를 각각 t_g 및 H_g 라 하고 이 空氣의 습구온도 t_w 에서의 포화습도를 H_w 라 하면 다음 式이 成立된다.

$$u(t_g - t_w) = k\lambda_w(H_w - H_g) \quad (10)$$

여기서 u, k 는 각각 水滴表面에 있어서의 傳熱係數 및 物質移動係數이고 λ_w 는 습구온도에 있어서 물의 증발잠열이다.

乾燥기간 II 의 任意的 斷面要素에서 교환한 열량 dQ_{II} 는 열교환 및 물질收支 관계를 연결하여 다음 式을 얻는다.

$$dQ_{II} = \lambda_w \cdot \dot{m}_g \cdot dH_g \quad (11)$$

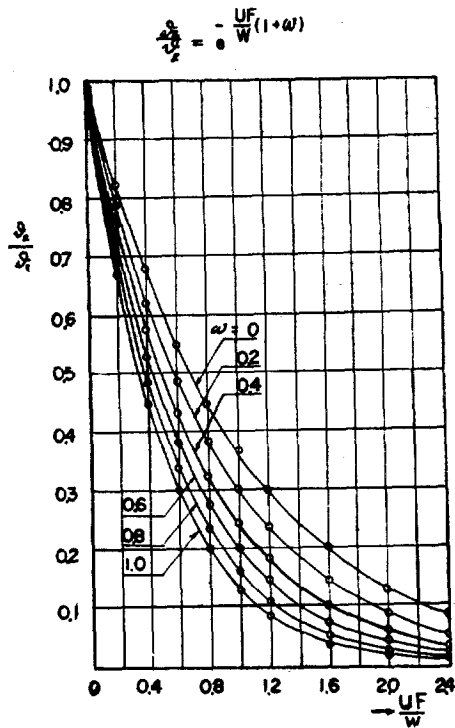


Fig. 3-a. θ_2/θ_1 as a Function of NTU and ω for Parallel-flow Dryer

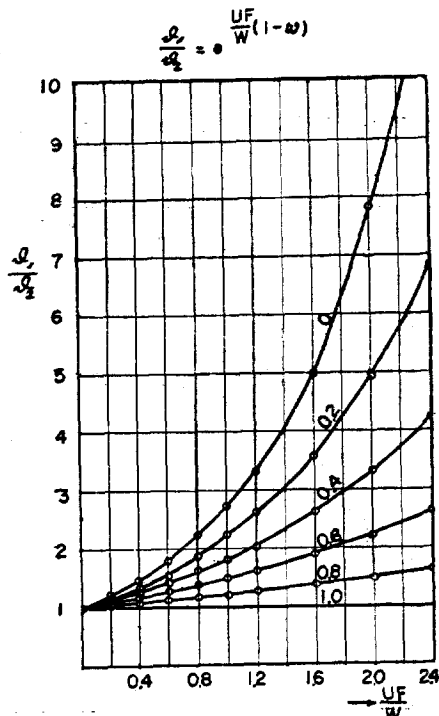


Fig. 3-b. θ_1/θ_2 as a Function of NTU and ω for Counterflow Dryer

혹은

$$dQ_{II} = k\lambda_W(H_W - H_g)dF = k\lambda_W \cdot h \cdot dF \quad (12)$$

여기서 $h = H_W - H_g$ 이다

$$(13)$$

재료의 건조온도 (t_W)가 일정하면 공기의 포화습도 H_W 도 일정하므로 (13)식을 미분하면

$$dh = -dH_g \quad (14)$$

(14)식을 (11)식에 대입하고 (12)식과 연결하여積分하면

$$\frac{dh}{h} = -\frac{k \cdot dF}{m_g} \quad (15)$$

$$\frac{h_e}{h_o} = e^{-\frac{kF_{II}}{m_g}} \quad (16)$$

別途로 건조第 II 기간의 임의의 斷面要素에서 교환된 열량 dQ_{II} 는 열전달 관계에서 다음 두 식으로表示된다.

$$dQ_{II} = u \cdot dF(t_g - t_s) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{또 } dQ_{II} &= \bar{C}_H \cdot \dot{m}_g \cdot dt_g = \bar{C}_p \cdot \bar{m}_{g(x)} \cdot dt_g \\ &= \int C_p \cdot m_{g(x)} \cdot dt_g \end{aligned} \quad (18)$$

여기서

$$\bar{C}_H = 0.24 + 0.45 \left[H_g + \frac{\Delta H_{H_g}}{2} \right] \quad (19)$$

C_H 는 공기의 습윤비열이고, \bar{C}_H 는 건조기 내의 평균 습윤비열이다. 또 \dot{m}_g 와 $m_{g(x)}$ 는 건조공기 및 습윤공기의 질량속도이다.

$$\begin{aligned} m_{g(x)} &= \dot{m}_g(1 + H_0 + \Delta H_{g(x)}) \\ &= \dot{m}_g \left[1 + H_0 + h_0 \left(1 - e^{-\frac{kF(x)}{m_g}} \right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$\bar{m}_{g(x)}$ 는 습윤공기의 평균 질량속도로서 (21)식으로 표시된다.

$$\text{여기서 } \Delta H_{g(x)} = h_0 - h_x$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_{g(x)} &= \dot{m}_g \left[1 + H_0 + \frac{1}{F_{II}} \int_0^{F_{II}} h_0 \left(1 - e^{-\frac{kF(x)}{m_g}} \right) dF(x) \right] \\ &= \dot{m}_g \left\{ 1 + H_0 + h_0 \left[1 + \frac{\dot{m}_g}{k \cdot F_{II}} \left(e^{-\frac{kF_{II}}{m_g}} - 1 \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

(21)식은 그림 4에 h_0 와 이동단위수 $\alpha = \frac{kF_{II}}{m_g}$ 의 함수로 나타내었다.

(17)식과 (18)식을 연결하여

$$\frac{\theta_3}{\theta_2} = e^{-\frac{uF_{II}}{\bar{C}_H \cdot \dot{m}_g}} \quad (22)$$

Lewis⁵⁾는 열전달과 物質이동의 相似理論에서 水, 空氣에 對하여 근사적으로 다음 식이 成立함을 제시하였다.

$$\frac{u}{\bar{C}_H} = k \quad (23)$$

따라서 (22)식, (23)식 및 (16)식을 비교하여 다음

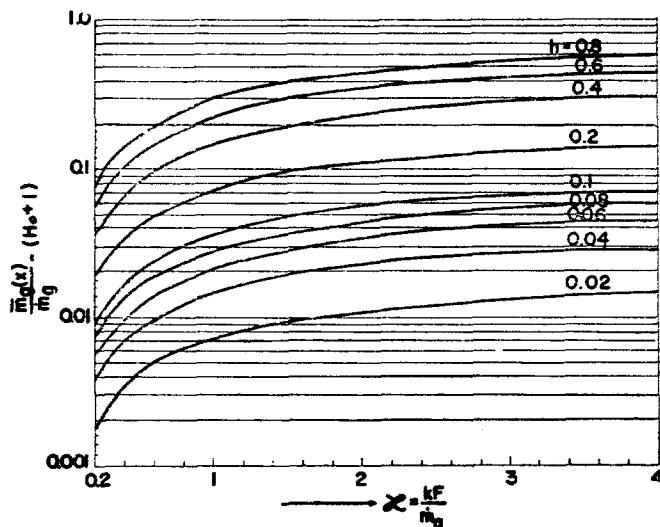


Fig. 4. Average Increase of Humidity in the Dryer vs. NTU

관계를 얻는다.

$$\frac{\theta_3}{\theta_2} = e^{-\frac{uF_{II}}{CH \cdot m_g}} = e^{-\frac{kF_{II}}{mg}} = \frac{h_e}{h_o} \quad (24)$$

건조된 재료를 出口 온도까지 가열하는 건조第Ⅲ기간의 熱收支 關係를 同一한 方法으로 계산하면 한다.

乾燥第1기간에서 교환한 열량을 Q_1 , 또 平均 온도를 θ_{m1} 이라 하면

$$Q_1 = uF_1 \cdot \theta_{m1} \quad (28)$$

여기서

$$\theta_{m1} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)} \quad (29)$$

또 이 기간에서 교환할 수 있는 최대열량을 Q_{01} 이라 하면

$$Q_{01} = uF_1 \cdot \theta_{01} \quad (30)$$

이 기간에서 실제로 재료를 가열하는데 교환된 열량 Q_1 과 Q_{01} 의 比를 건조第1기간의 有效度(ϵ_{m1})로 定義한다.

$$\epsilon_{m1} = \frac{Q_1}{Q_{01}} = \frac{\theta_{m1}}{\theta_{01}} \quad (31)$$

別途로 이 건조 第1기간의 조작특성치 ϕ 를 도입한다.

$$\phi_{s1} = \frac{\Delta t_{s2}}{\theta_{01}} \quad (32)$$

$$\phi_{g1} = \frac{\Delta t_{g2}}{\theta_{01}} \quad (33)$$

ϕ 와 ϵ_m 의 比를 熱移動單位數(N. T. U) α 로 表示한다.

ϵ_m 와 ϕ 의 定義에서

$$Q = uF\theta_{01}\epsilon_m = W_g \cdot \theta_o \cdot \phi_g = W_g \cdot \theta_o \cdot \phi_s \quad (34)$$

$$\frac{uF}{W_g} = \frac{\phi_g}{\epsilon_m} = \alpha_s \quad (35)$$

$$\frac{uF}{W_s} = \frac{\phi_s}{\epsilon_m} = \alpha_s \quad (36)$$

따라서 열교환하는 두 物質의 水值의 比 ω 는 다음과 같은 關係를 가진다.

$$\omega = \frac{\bar{W}_g}{W_s} = \frac{\alpha_s}{\alpha_g} = \frac{\phi_g}{\phi_s} = \frac{\Delta t_s}{\Delta t_g} \quad (37)$$

(if $W_g < W_s$)

(29)式的 兩邊에 건조 第1기간의 最高온도 차 θ_{01} 으로 나누면

$$\theta_{01} = \theta_1 (\theta_1 = \theta_2 + \Delta t_{g2} + \Delta t_{s2}; \text{並流時})$$

$$\theta_{01} = \theta_2 + \Delta t_{s2} (\theta_1 = \theta_2 + \Delta t_{s2} - \Delta t_{g2}; \text{向流時})$$

$$\frac{\theta_m}{\theta_{01}} = \frac{1 - \frac{\theta_2}{\theta_{01}}}{-\ln\left(\frac{\theta_2}{\theta_{01}}\right)} \quad (38)$$

(38)式과 (31)~(37)을 연결하여 다음 關係를 얻는다.

$$\epsilon_{m1} = \frac{\phi_{s1} + \phi_{g1}}{-\ln(1 - \phi_{s1} - \phi_{g1})} \quad (\text{並流}) \quad (39)$$

$$\epsilon_{m1} = \frac{\phi_{g1} - \phi_{s1}}{\ln(1 - \phi_{s1}) - \ln(1 - \phi_{g1})} \quad (\text{向流}) \quad (40)$$

(39)式을 고쳐 쓰면 並流時에

$$\phi_{g1} = \frac{1 - \exp\{-(1 + \omega)\alpha\}}{1 + \omega} \quad (41)$$

(40)式을 고쳐 쓰면

$$\phi_{g1} = \frac{1 - \exp\{-(1 - \omega)\alpha\}}{1 - \omega \exp\{-(1 - \omega)\alpha\}} \quad (42)$$

(41), (42)式을 건조第1기간뿐만 아니라 第2기간 및 건조第3기간의 並流 및 向流 조작에 利用할 수 있다.

큰 건조第2기간에서는 재료의 온도가 增加되지 않

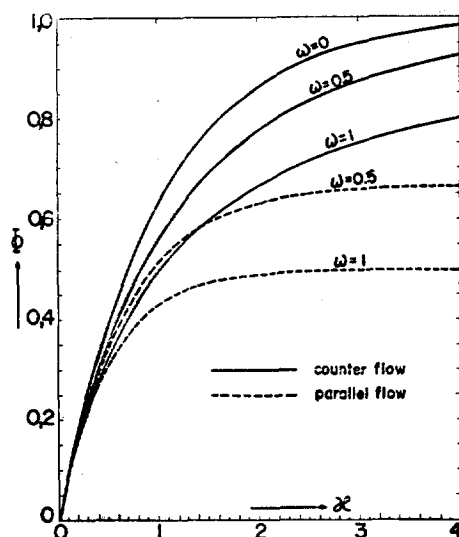


Fig. 5. Operating Characteristic ϕ vs. Number of Transfer Unit α and Ratio of Wasserwert ω

으므로 $\omega=0$ 인 경우이다.

(41) 및 (42)식의 건조특성치 ϕ 를 ω 의 함수로 그림 5에 그려 놓았다.

3. 米糠의 乾燥特性

米糠油를 hexane으로 抽出하고 남은 米糠을 steaming하여 溶劑를 回收한 다음 습윤한 米糠을 얻는다. 이 米糠粕을 건조하는데 적당한 건조기를 設計하려면 우선 이 건조재료의 건조특성을 알 필요가 있다. 이 米糠粕을 試料로 하여 그림 6과 같은 자동온도조절이된 conditioning oven에서, 熱風의 風速 및 건조온도 등을 변경하면서 실험하고 각종 건조特性曲線을 얻었다.

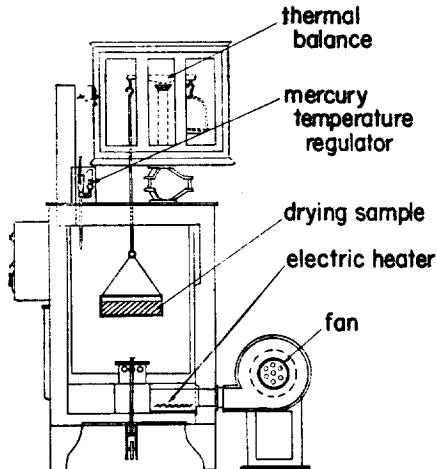


Fig. 6. Conditioning Oven for Drying

米糠粕과 같은 多孔性粒子가 응결된 固體 內의 水分移動 및 擴散을 取扱한 연구는 이미 若干의 研究자에 의하여 遂行되었다.

本文에서는 米糠을 試料로 한 실험결과에서 얻은 資料가 잘 符合되는 式을 조사하고, 試料 內의 水分의 擴散係數를 결정하였다.

4. 실험

乾燥材料로 米糠粕을 直徑 20 cm의 圓板金網上 內에 두께 3 cm로 만든다.

그림 6과 같은 condition oven을, 熱風의 流量 및 加熱回路를 조절하여 미리 乾燥溫度로 加熱 유지시킨다. 온도 조절 범위는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 로 한다.

여기에 준비된 건조재료를 넣고 熱天秤에서 重量감소를 測定한다.

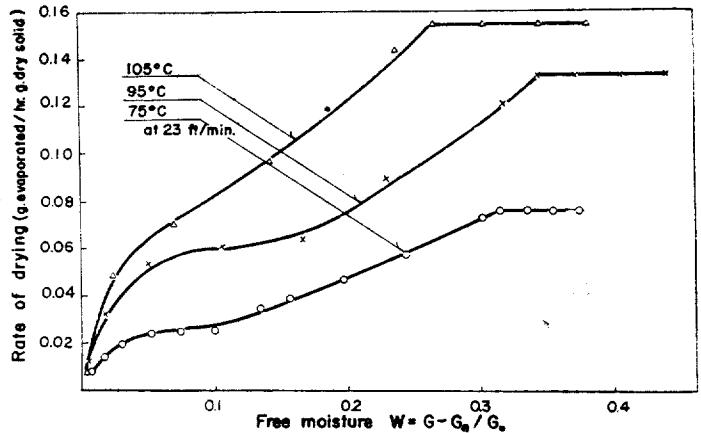


Fig. 7. Effect of Temperature on Drying-rate Curves

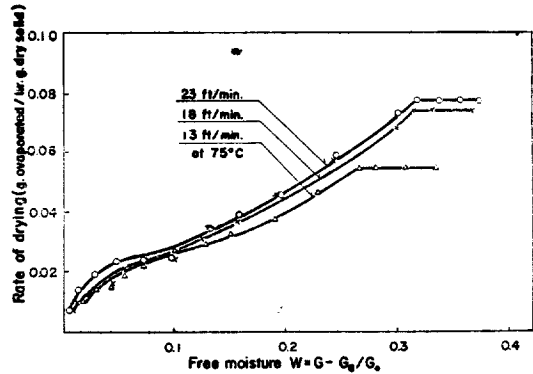


Fig. 8. Effect of Air Velocity on Drying-rate Curves

本實驗에서는 건조기 斷面의 流速을 23 ft/min로 하고, 건조온도를 75°C , 95°C 및 105°C 로 변경하면서, 수분 증발량을 측정하고 건조속도곡선을 그렸다(그림 7).

다시 건조온도를 75°C 로 유지시키고 流速을 23 ft/min, 18 및 13 ft/min로 변경하면서 同一한 方法으로 건조속도곡선을 그림 8에 그렸다.

건조를 계속하여 平均 함수율에 가까워지면 건조시간이 대단히 길어지는데, 이 실험에서는 同一조건 下에서 1시간 동안 水分감소가, 건조재료 每 g當 0.002 g以下가 되도록 한다. 건조재료를 진공건조 메시케타로 옮기고 3시간 건조시킨 다음 秤量하고 이 材料의 平衡 함수율로 보았다.

擴散係數의 算出

最初 試料內部的 水分分布가 均一한 薄板 試料가 空氣 中에 있을 경우, 試料內部的 水分의 濃度(c)를, 時間(θ), 및 座標(x)의 函數로 求한다.

곧 Ficks의 擴散式을 주어진 境界條件 下에서 풀면 (43)式을 얻는다.

$$\frac{w}{w_0} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D \theta}{4R^2}} \quad (43)$$

양변에 對數를 취하면

$$\ln\left(\frac{w}{w_0}\right) = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D \theta}{4R^2} \quad (44)$$

실험결과에서 自由含水率의 比를 건조시간에 따라 그림 9와 그림 10에 plot 하고 그 傾斜에서 擴散係數를 계산하고 表 1에 주었다.

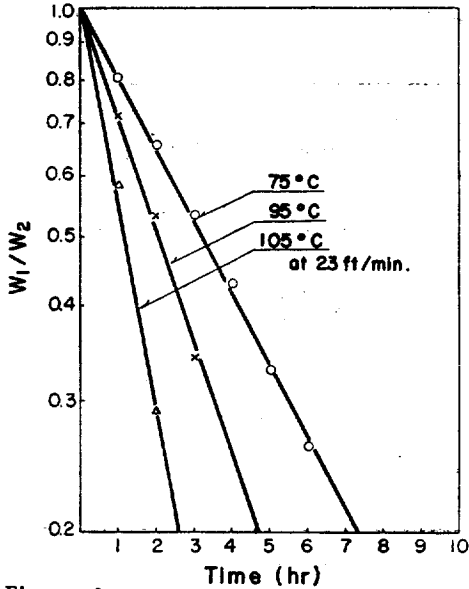


Fig. 9. $\log w_1/w_2$ vs. Time at Different Temperatures

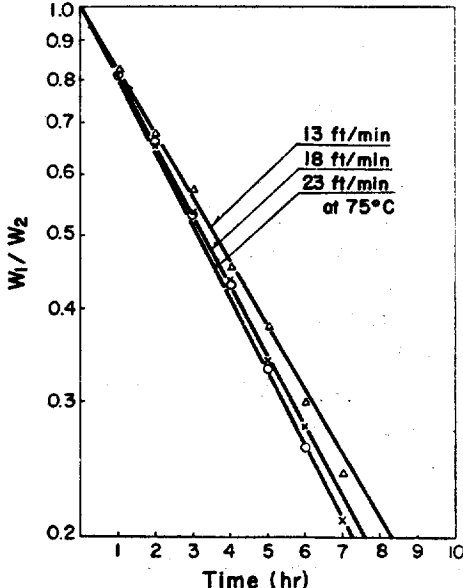


Fig. 10. $\log w_1/w_2$ vs. Time at Different Air Velocities

表-1

온도(°C)	流速(ft/min)	D (cm ² /s)
105	23	8.8×10^{-5}
95	23	4.0×10^{-5}
75	23	8.5×10^{-6}
75	18	7.3×10^{-6}
75	13	7.0×10^{-6}

5. 結果 및 檢討

(a) 건조기를 出入하는 空氣의 濕度를 알고 건조기 내의 空氣의 平均濕度를 알면, (21)式이나 그림 4를 이용하여 건조第2기간의 NTU를 계산할 수 있다.

(b) 조각특성치 ϕ 와 水值의 比 ω 를 알면, 건조 第1 및 第3 기간의 NTU를 알 수 있다.

(c) Friedman and Marshall ⁽⁶⁾이 제안한

$$ua = 15 \cdot \dot{m}_g^{0.16} / d \quad (45)$$

를 利用하여 總括傳熱係數를 알면 乾燥器의 所要面積을 求할 수 있다.

(d) 米糠의 乾燥特性曲線을 熱風의 風速 및 건조온도에 따라 그렸다.

(e) 米糠粕 내의 水分擴散係數를 計算하여 表-1에 주었다.

(f) 米糠을 건조할 回轉건조기의 計算例을 符錄에 들었다.

부 록

米糠의 건조 特性을 보면 自由含水率이 0.3 以下에서는 減率 乾燥特性을 가지고 건조시간을 長시간 要하므로, 回轉건조기로 微量의 水分 건조에는 不適當하다.

그러나 水分 含量이 많은 原料를 1次의 加熱 및 건조할 때는 回轉건조기를 使用해도 무방하다.

여기서는 參考로 다음과 같은 조건 아래서, 건조기의 NTU를 계산한다.

건조조건

(a) 건조 온도 = 60°C

(b) 向流 操作

(c) 乾燥 空氣의 流量 $\dot{m}_g = 5000$ kg/hr

(d) 건조재료의 流量 $\dot{m}_s = 1000$ kg/hr

(e) 건조기 入口의 空氣의 濕도 = 0.05

(f) 건조第1 기간의 操作特性值 $\phi_{11} = 0.3$

(g) 건조재료의 自由含水率 $w_1 = 0.6$ 에서 $w_2 = 0.3$ 까지 건조한다.

(h) 건조 第1 기간의 操作特性值 $\phi = 0.3$

(i) 건조재료 비열 $C_s = 0.60$ [Kcal/kg°C]

이상의 조건에서 空氣와 材料의 水值를 求하면

$$W_r = 5000 \times 0.24 = 1200 \text{ [Kcal/hr}^\circ\text{C]}$$

$$W_s = 1000 \times 0.6 = 600 \text{ [Kcal/hr}^\circ\text{C]}$$

따라서

$$w_1 = \frac{W_s}{W_r} = \frac{600}{1200} = 0.5$$

第1 건조기간의 操作特性值 $\phi_{s1} = 0.3$ 이므로 그림 5에서 移動 단위수 $(NTU)_1 = 0.4$ 이다.

또 每 時間當 材料에서 증발한 水分은 390 kg/hr 이므로 이 건조기에서 나가는 空氣의 습도는

$$H_r = \left(-\frac{390}{5000} + 0.05\right) = 0.11 \text{ 이 된다.}$$

지금 건조기 내의 平均 습도증가 ΔH_g 를 求하기 위하여 對數 平均을 이용하면

$$\Delta H_g = \frac{0.11 - 0.05}{\ln \frac{0.11}{0.05}} = 0.085$$

$$\dot{m}_g(x) = \dot{m}_g(1 + \Delta H_g) \text{ 이므로 (21)式에서}$$

$$\dot{m}_g(x)/\dot{m}_g - (H_0 + 1) = 1.085 - 1.05 = 0.035$$

$$\text{또 } h_0 = H_w - H_g = 0.15 - 0.05 = 0.1 \text{ 이므로}$$

그림 4에서 $(NTU)_1 \approx 1.0$ 이다.

건조 第Ⅲ기간도 건조 第Ⅰ기간과 같은 方法으로 계산할 수 있다. 逆으로 材料의 傳熱係數나 物質傳達係數를 알면 移動단위수를 그 定義로부터 계산할 수 있다. 別途로 pilot plant에서 操作特性值나 건조기의 有效度를 測定해 두면 매우 편리하다.

文 獻

- [1] W.L. Badger and J.T. Banchero; Introduction to Chemical Engineering, p. 503, 1955
- [2] W.C. Saemann and T.R. Mitchell; Chem. Eng. Prog. 50, 457, 1954
- [3] F. Bosnjakovic; Betriebscharakteristik von Wärmeaustauscher. VDI-Wärme Atlas 1956. N1
- [4] F. Bosnjakovic et al; Einheitliche Berechnung von Rekuperatoren, VDI-Forschungsheft 432
- [5] W.K. Lewis; Mech. Eng. 44, 445, 1922

- [6] S.J. Friedman and W.R. Marshall; Chem. Eng. Progr. 45, 573—578 (1949)

記 號

- a : Surface of solid particles exposed to air [m²/m³]
 C : Concentration of moisture in the solid [g-mole/cm³]
 \bar{C}_H : Average humid heat of air
 C_p, C_s : Specific heat of air and solid [Kcal/kg-solid, °C]
 D : Diffusion coefficient [cm²/sec]
 d : Diameter of dryer [m]
 F : Total surface of solid particles in the dryer [m²]
 H_g, H_w : Humidity and saturated humidity of air [kg-moisture/kg-dry air]
 h_0, h_c : The maximum and minimum difference between the saturated humidity and the humidity of air in the period of constant rate of drying [kg-moisture/kg-dry air]
 k : Mass transfer coefficient [Kcal/m². hr]
 m_s, m_g : Mass flow rate of drying material and air, respectively [kg/hr]
 m_g : Mass flow rate of dry air [kg/hr]
 Q : The exchanged heat [Kcal]
 R : The half thickness of drying sample [cm]
 S : cross section of dryer [m²]
 t_g, t_s : Temperature of air and the material [°C]
 u : heat transfer coefficient [Kcal/m². hr. °C]
 W_g, W_s : the time rate of heat capacity of air and the material [Kcal/hr. °C]
 w_0, w_1, w_2 : Free moisture contents [kg-moisture/kg-dry solid]
 z : Distance along dryer [m]
 θ : time [sec]
 ϕ_r, ϕ_s : Operating characteristics of air and the material [-]
 α : Number of transfer unit [-]
 ω : Ratio of the time rate of heat capacity (less than unity)