

Flat Blade Stirred Bed 乾燥器의 乾燥特性

柳基豐 · 都東燮* · 李哲洙

韓國核燃料公團

(접수 1980. 3. 12)

Slurry Drying in a Flat Blade Stirred Bed Dryer

Ki Pung Yoo, Dong Sup Doh and Chul Soo Lee

Korea Nuclear Fuel Corporation

(Received March 12, 1980)

要 約

Slurry를 注入할 때 Flat Blade Stirred Bed 乾燥器 內에서 定溫條件의 乾燥曲線을 計算할 수 있는 方法을 研究하였다. 熱天秤에서 얻은 乾燥實驗値와 分散모델의 物質收支式을 使用하였으며 軸方向의 分散係數와 粒子移動速度는 文헌에 알려진 相關關係式에서 求하였다. 얻어진 結果는 乾燥器에서의 實驗値와 잘 一致하였다.

ABSTRACT

A method was developed for the calculation of drying profile at constant temperature in a slurry fed flat blade stirred bed dryer. Thermobalance drying rate data and mass balance equation for the dispersion model were utilized for the calculation. Using the correlations available for the calculation of dispersion coefficient and convection velocity, the calculated results were obtained and compared with experimental results. The agreement was found satisfactory.

* 高麗大學校 化工科

1. 緒 論

氣-固係의 反應裝置의 하나인 Stirred Bed는 牛徑方向의 混合效果는 크고 軸方向의 混合效果가 적은 長點을 가지고 있으며, 또한 氣相-固相의 接觸이 좋은 反應器로 알려져 있으며, Helical Ribbon, Screw Flight 또는 Flat Blade 등의 교반장치를 가지고 있다.

Helical Ribbon 형 또는 Screw Flight 형에 대하여서는 동특성등 많은 연구가 되어 있으며, 형태 · 회전속도 및 注入率 등은 체재시간에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} Taylor 등은³⁾ 注入率과 교반기의 回轉速度가 Hold Up에 미치는 영향을 發表하였다. 반응기의 열전달 효율은 교반기의 회전수가 증가할수록 증가하며^{4,5)} Taylor 등은^{6,7)} 반응기의 直徑이 적을 때 Hot Spot의 形成을 防止할 수 있고 접촉효율이 높아 높은 반응성을 가짐을 보였다.

Flat Blade 형은 傾斜度를 가진 圓桶內에서 Flat Blade 형 교반기를 回轉시켜 粒子들을 前進시키면서 교반하게 된다. 이 反應器의 動特性은 朴明惠 등에⁸⁾ 의하여 연구된 바 있으나 반응이 일어나는 계는 取扱된 바 없다.

Slurry를 直接注入하는 方法은 乾燥後 다시 反應이 일어나는 系에서는 裝置를 한 단계 줄일 수 있는 잇점이 있으며 특히 Filter Cake를 Pulping하여 注入할 수 있을때 경제적이 될 수 있다.

本 研究에서는 Flat-Blade 형 Stirred Bed의 건조특성을 熱天秤에 의한 乾燥曲線과 物質收支式에서 計算할 수 있는 方法을 발전시켜 乾燥裝置設計에 도움을 주고자 하였다.

2. 理 論

Stirred Bed와 같이 比較的 Plug Flow에 가까운 反應器에서는 動特性이 일단 알려지면, 反應器는 始動後 平均 체재시간이 지난 후 定常狀態에 到達하므로, 定常狀態의 解가 重要하게 된다. Slurry Feeding을 하여 乾燥시키는 過程의

定常狀態의 解를 求하기 위하여 먼저 乾燥速度式을 생각하자.

잘 알려진 바와 같이 乾燥速度는 Macro Pore의 水分이 蒸發하는 동안은 一定速度를 維持하나 이 과정이 끝나고 擴散에 의하여 Micro Pore의 水分이 증발하는 동안은 速度가 점점 減少하여 一次反應과 비슷한 特性을 나타내게 된다.⁴⁾ 이 蒸發速度가 變化하는 點을 臨界含水量(W_c)이라 부르며, 全體速度式은 다음과 같이 近似的으로 表示된다.

$$r_{total} = -\frac{K_1 W}{1 + K_2 W} \quad (1)$$

여기에서 r 는 乾燥速度, W 는 水分含量, K_1 과 K_2 는 常數이다.

한편 이 乾燥速度式은 臨界含水量을 中心으로 0次反應式과 一次反應式의 두 형태로 나누어 쓸 수 있다.

$$r_1 = -K_3 \quad (W \geq W_c) \quad (2)$$

$$r_2 = -K_4 W \quad (W < W_c) \quad (3)$$

實際로 K_3 는 $K_1 W_c / (1 + K_2 W_c)$ 와 같은 값을 가지나 K_4 를 K_1 과 같이 놓는 경우에는 臨界含水量의 連續條件에서 問題가 發生하여 (1) 또는 (2)式을 使用하여 W_c 까지 積分하고 잔여區間에 對하여서는 K_1 과 다른 K_4 를 다시 求하여 使用할 必要가 있다.

定常狀態의 反應器의 軸方向의 分散係數와 平均速度는 一定하다는 假定下에서 物質收支式은

$$D_z \frac{d^2 W}{dZ^2} - U_z \frac{dW}{dZ} + r = 0 \quad (4)$$

이 되며 여기에서 D_z 는 分散係數, U_z 는 軸方向 平均 速度이고 充分히 乾燥될 程度의 길이 L 에 對하여 다음과 같은 境界條件을 갖는다.

$$\begin{cases} Z=0 & W=W_0 \\ Z \rightarrow \infty & W=0 \end{cases} \quad (5)$$

(1)式과 같은 乾燥速度式은 (4)식을 非線形으로 만들어 解析解를 求하는데 어려움을 주기 때문에 近似解法을 다음과 같이 생각하자.

$W_0 \geq W \geq W_c$ 인 區間에서는 乾燥速度가 거의 常數이므로 分散의 영향은 적을 것이고 分散項을 除外한 解에서 分散영향을 추산하기로 한다.

$$\frac{dW}{dZ} \cong -\frac{K_1}{U_z} \frac{W}{1 + K_2 W} \quad (6)$$

$$\frac{d^2 W}{dZ^2} \cong -\frac{K_1}{U_z} \cdot \frac{1}{(1+K_2 W)^2} \frac{dW}{dZ} \quad (7)$$

(7)식을 (4)식에 代入하여 풀면,

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_z K_1}{U_z^2} + 1 \right) \ln \frac{W}{W_0} + K_2 (W - W_0) \\ &= \frac{D_z K_1}{U_z^2} \ln \frac{1+K_2 W}{1+K_2 W_0} - \frac{K_1}{U_z} Z \end{aligned} \quad (8)$$

W_0 에서의 解를 無次元形으로 표시하면,

$$\begin{aligned} & (\phi + 1) \ln W_c^* + K_2 W_0 (W_c^* - 1) \\ &= \phi \ln \frac{1+K_2 W_0 W_c^*}{1+K_2 W_0} - S_t \cdot Z_c^* \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서 $W_c^* = W_c/W_0$, $Z_c^* = Z_c/L$, $S_t = K_1 L/U_z$ 이고,

$$\begin{aligned} \phi &= D_z K_1 / U_z^2 = \frac{D_z}{U_z \cdot L} \cdot \frac{K_1 L}{U_z} \\ &= S_t / P_e \end{aligned} \quad (10)$$

이고 L 은 임의의 特性길이이다.

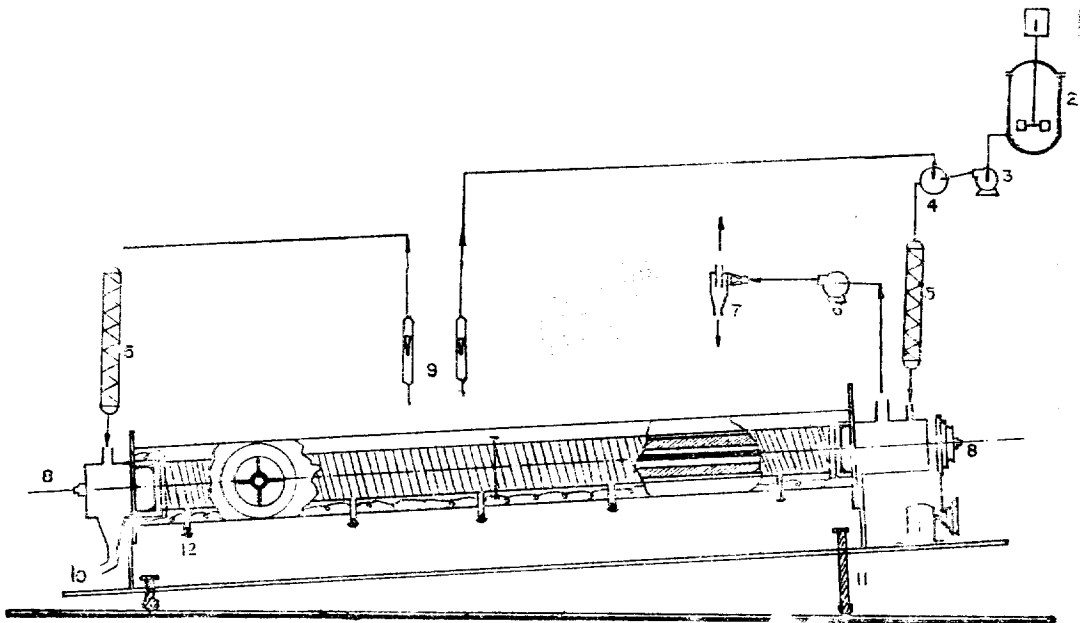
이렇게 얻어진 Z_c^* 에서 나머지 區間에 대하여 식(3)과 (4)를 풀면

$$\begin{aligned} W^* &= W_c^* \exp \left\{ \frac{1}{2} \left(P_e - \sqrt{P_e^2 + 4 P_e \cdot S_t'} \right) \right. \\ & \quad \left. (Z^* - Z_c^*) \right\} \quad Z_c^* \leq Z^* \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 $S_t' = K_1 L / U_z$ 이다.

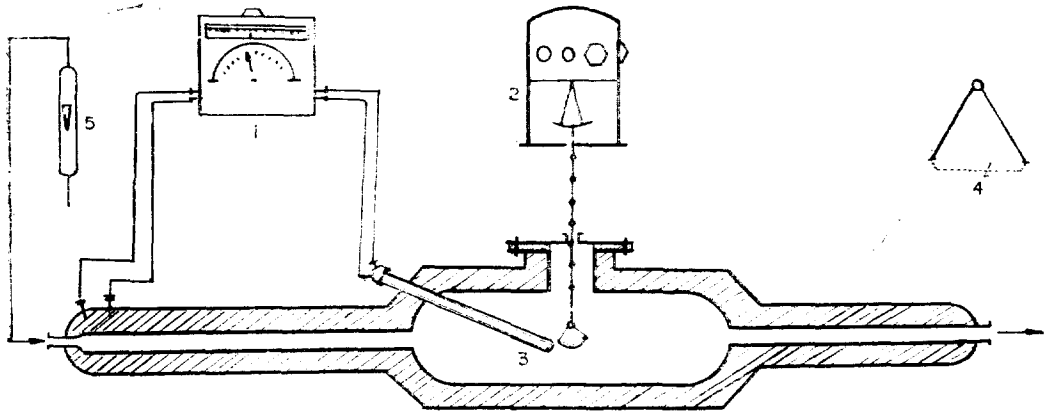
3. 實 驗

實驗에 使用된 Flat-Blade Stirred Bed는 Fig. 1에 표시되어 있다. 均一한 간격으로 5개의 試料採取口를 가지고 있는 유리관(2"OD×80 cm)내부에 4개의 Blade를 가진 軸이 돌게 되어 있고 Blade는 벽과의 간격을 調節할 수 있게 되었다. Blade (1cmW×3mm Thick)와 軸 (1/2"OD)는 Stainless Steel로 제작하였고 軸 内部에 열전대를 끼워 溫度를 測定하였다. 이때 Bed의 傾斜度는 3°로 하였다. 유리관 외부는 熱線을 감아 加熱하여 反應器 内部를 150°C로



- | | |
|-------------------------|--------------------|
| 1. Speed variable motor | 7. Dust collector |
| 2. Slurry tank | 8. Thermocouple |
| 3. Peristaltic pump | 9. Flowmeter |
| 4. Air diffuser | 10. Powder outlet |
| 5. Preheater | 11. Pointer |
| 6. Blower | 12. Sampling point |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus



1. Thermocontroller
2. Analytical balance
3. Sieve boat
4. Thermocouple
5. Flow meter

Fig. 2. Schematic diagram of thermobalance dryer

維持시키고 變速 Motor 를 사용하여 軸의 回轉數를 調節하였다.

實驗에 使用된 物質은 270~325 Mesh 程度의 Alumina 분말로 물과 1:1로 混合하여 Slurry 를 만들고 Peristaltic Pump 를 사용하여 流量을 調節하였다.

Peristaltic Pump 를 나온 Slurry 는 100°C 程度로 예열되어 反應器에 注入되며 이때 소량의 空氣를 함께 注入하여 操業이 容易하게 하였다. 150°C 로 예열된 空氣는 反應器內에서 向流로 흐르며 流量은 Rotameter 로 조절하였다.

實驗은 Alumina 注入流量, 反應器의 傾斜度, 回轉速度 및 空氣流量을 變化시키면서 出口에서 試料를 채취하여 乾燥後의 무게減量에서 含水量을 決定하였다.

Alumina Slurry 의 乾燥速度式을 求하기 위하여 熱天秤을 Fig. 2 와 같이 製作하였다. 미세한 망으로 만든 Boat 위에 소량의 試料를 담고 Boat 를 Balance 에 연결하였다. 空氣를 150°C 로 加熱하여 試料 Boat 주위를 通過시키면서 물의 증발에 따른 무게감소를 15초 간격으로 測容하였다. 試料의 무게는 0.5g 정도를 취하여 잘

퍼고 Boat 가 흔들리지 않는 限度內에서 最大의 流量을 흘려 物質傳達 저항을 최소로 하였다.

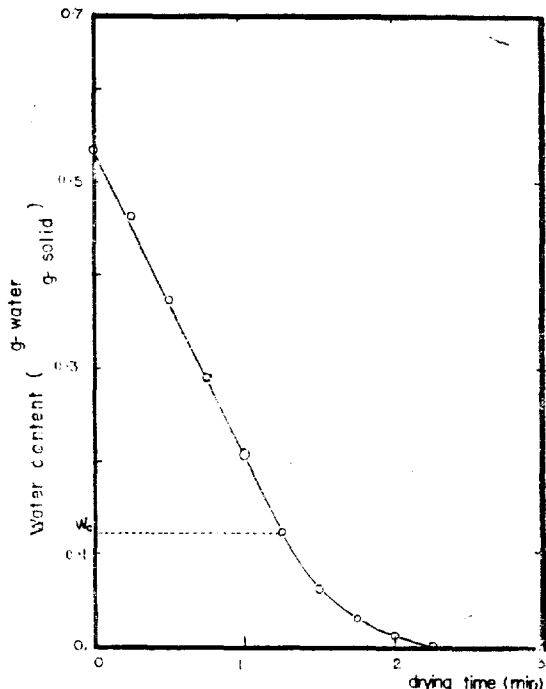


Fig. 3. Drying curve for thermobalance dryer

4. 結果 및 檢討

熱天秤을 써서 얻은 Alumina의 건조곡선은 Fig. 3에 표시되어 있다. 이 곡선을 (1)식의形態로 나타낼 때 K_1 과 K_2 는 각각 7min^{-1} 및 19g solid/g water 임을 알았다. 또한 이 곡線으로부터 臨界含水量을 $0.12\text{g water/g solid}$ 임을 發見하였으며, 이를 경계로 반응의 두形態를表現한 (2)식과 (3)식중의 K_3 와 K_4 는 각각 $0.33\text{g water/g solid}\cdot\text{min}$ 및 2.8min^{-1} 임을 알았다.

K_3 는 理論에서言及한 바와 같이 $K_1W_0/(1+K_2W_0)$ 와 아주 近似한 값이나 예상대로 K_4 는 K_1 과는 다른 값을 나타내었다.

이 값들을 사용하여 理論에 언급된 分散모델의 解法에 따라 求한 理論乾燥曲線과 實驗曲線을 Fig. 4에 表示하였으며, 熱天秤乾燥曲線을 反應器理論軸으로 換算하여 함께 圖示하였다. 分散모델이 適用됨은 이미 確認된 바 있다.⁸⁾ 또한 非線形微方의 數値解를 求하여 보면, 數値解는 Runge-Kutta 法으로 Shooting Method를 使用하여 $Z=0$ 일때 $W=W_0$ 이고 이 點에서의 기울기를 假定하여 $Z=L$ 에서 $W=0$ 되는 條件을

찾으며 計算하였다. $W^*=0.05$ 以下에서는 解가 不安定하여 全區間에서의 解는 求할 수 없었으나 W_c^* 근처까지는 充分히 신뢰할 수 있는 解를 얻을 수 있었다.

Fig. 4에 表示된 例에서 近似法에 의한 解는 熱天秤解에서 Z_c^* 값의 1.4%를 이동시킨 結果를 나타내었으며 數値解의 1.8% 移動시킨 結果와 近似한 結果를 나타내었다. 近似法은 乾燥速度가 減少하는 區間에서는 誤差가 크다. 比較에 使用된 條件은 $D_z=10.12\text{cm}^2/\text{min}$, $U_z=10.15\text{cm/min}$, $W_0=0.78\text{g water/g solid}$ 이었다.

이제 열전칭에 의한 乾燥曲線과 Stirred Bed의 乾燥曲線을 現象의으로 더 檢討할 必要가 있다.

두 境遇 모두 粒子가 接하고 있는 금속의 溫度가 一定하므로 Stirred Bed에서 粒子들이 쌓여 열전달 條件이 달라지는 點은 한가지 非理想의 現象이라 볼 수 있다. 또한 열전칭에서는 증발된 수증기가 空氣에 의하여 제거되나 Stirred Bed에서는 粒子들이 쌓여 內部에서 증발한 수증기가 제거되는데 약간의 低抗을 받을 수 있다. 計算値와 實驗値의 差異는 아마도 이들 現象을 考慮한 效率을 다음과 같이 定義하여 說明할 수 있을 것이다.

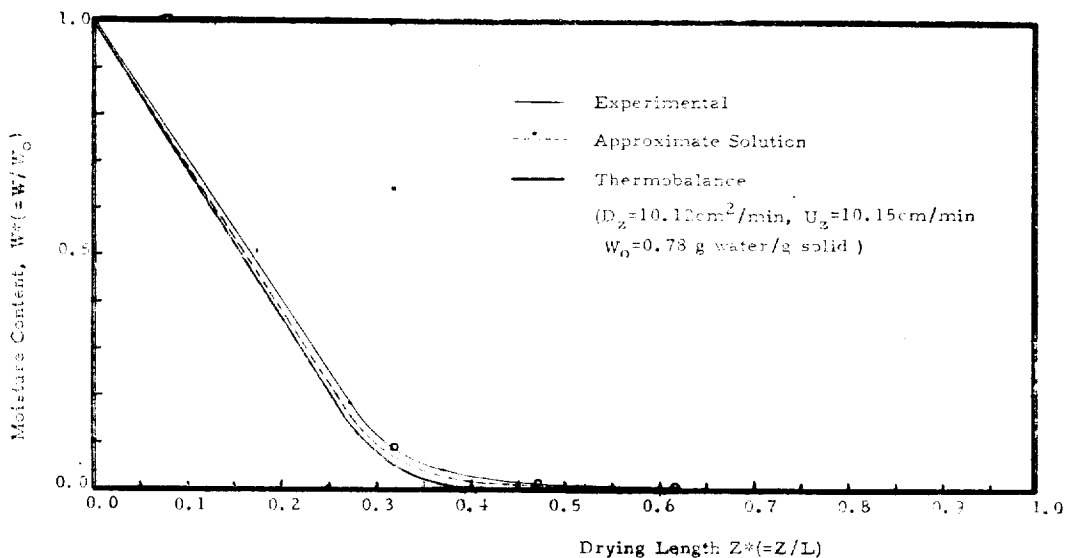


Fig. 4. Drying Curves for Alumina Slurry in Stirred-Bed

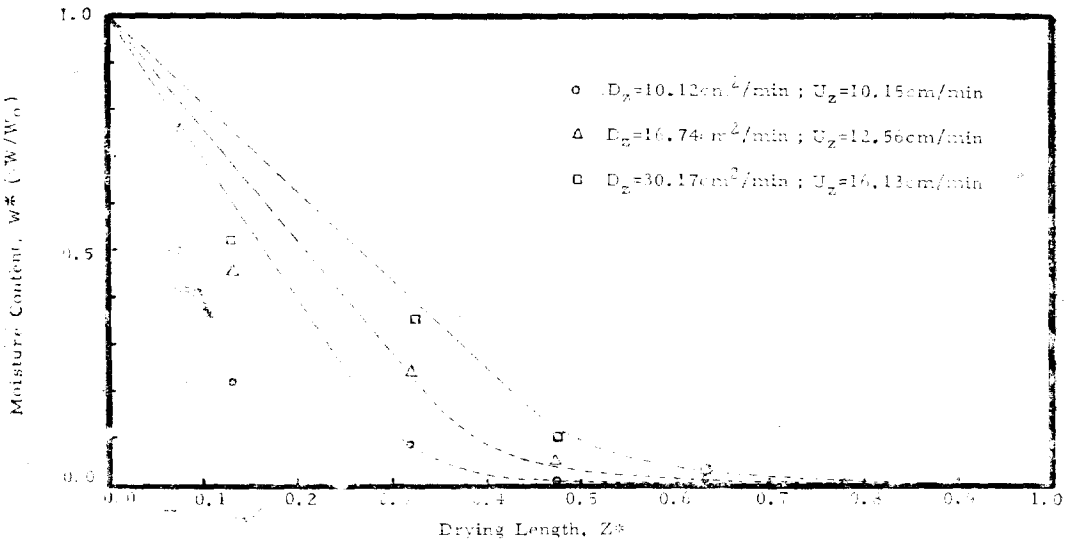


Fig. 5. Drying Curve of Alumina Slurry in Stirred-Bed for $\epsilon=0.95$

즉 (1)식 또는 (3)식을 다음과 같이 쓸 때

$$r_{\text{total}} = -\frac{(K_1\epsilon)W}{1+K_2W} \quad (12)$$

$$r_2 = -(K_4\epsilon)W \quad (13)$$

ϵ 는 효율이 된다.

Fig. 5에適切な 효율을假定하여計算한計算値와實驗値들을比較하였다. ϵ 값은 0.95程度임이判明되었으며, 이 값은 다른條件에서 구하여진文獻値 0.95以上과比較될 수 있다.⁶⁾

實際로 Slurry Feeding은 Filter Cake가 Pulping되어 수송이 가능한 경우에 유리하나 본 실험에서는 Filter Cake의含水量이 0.6程度인데 반하여 Feed는 1程度の含水量을 가지고 있었으며, 예열기를 통과하는 동안含水量은 0.8程度로減少하였고 열전달實驗이 0.6에서 시작되었지만 0.6에서 0.8까지의區間은 열전달結果를外插하여使用하였다. 이는一定蒸發速度區間에서는現象적으로外插이可能하리라고 생각되었기 때문이다.實驗値의 첫點을除外하고는計算値와實驗値가 잘一致하고 있다고 말할 수 있다.

Fig. 5에서使用한 D_z 값 및 U_z 값은運轉條件과 장치크기 즉 장치반경, 傾斜度, 回轉數로부터 이미發表된相關關係式을⁸⁾利用하여 얻어

졌으며, 일단 이들條件과 열전달乾燥曲線이 얻어지면 W_0 에對하여最終含水量과 이에必要한裝置길이를 Fig. 6과 같이表示하여使用할 수 있다. 橫軸의 $D \cdot \delta$ 는 (반응기 직경) · (RPM) · $\{\tan(\text{경사도}) - \alpha \cdot \text{공기속도}\} \cdot (\text{固體注入率})^{1/2}$ 을表示하며 앞서言及한相關關係式에⁸⁾使用

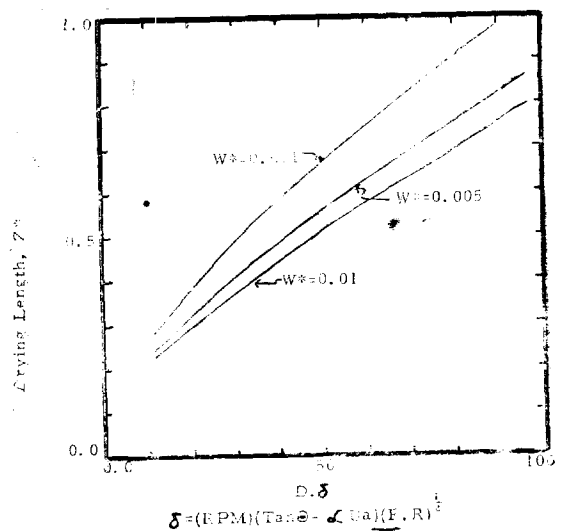


Fig. 6. Plot of Drying Length vs. $D \cdot \delta$ for various Moisture Content

된 變數이다.

5. 結 論

Slurry 를 注入하여 Flat Blade Stirred Bed 反應器를 乾燥裝置로 使用하고 乾燥特性을 研究하였다.

乾燥速度式과 物質收支式에서 定常狀態의 乾燥曲線을 計算할 수 있는 近似法을 發展시켰으며 열전칭에서 얻은 乾燥速度式에 效率을 考慮하여 裝置解析에 使用할 수 있음을 確認하였다.

參考 文獻

1. R.G. Geier, HW-49652(1957)
2. M.J. Szulinsky, Chem. Eng. Progr., **53**(1957), 586.
3. R.F. Taylor, T.R. Jenkins, Chem. Eng. Progr. Symp. Series, **27**(1968), 101.
4. R.H. Perry ed., "Chemical Engineers Handbook", 5th ed. McGraw-Hill, N.Y., 1973.
5. A.S. Foust, I.A. Wenzel, C.W. Clump, L. Maus, L. D. Anderson, "Principles of Unit Operation", Wiley, N.Y., 1960, p.337.
6. R.F. Taylor, F.R. Dell, Trans. Instn. Chem. Eng., **44**(1966), T-97.
7. R.F. Taylor, F.R. Dell, Trans. Instn. Chem. Eng., **44**(1966), T-105.
8. M.H. Park, C.W. Lee, C.S. Lee, Hwahak Konghak, Submitted for publication.