

噴霧乾燥機設計를 爲한 重要因子の 特性

金榮泰 · 柳萬馨* · 車岷煥*

工業化學科

〈요 약〉

본연구는 분무건조기의 설계에 있어서 Atomizer의 조작조건에 따른 여러인자를 연구하였다. Slurry 상으로된 용액을 건조열공기와 접촉시켜서 짧은 시간에 입자로써 건조시키는 것이다. 건조속도 및 온도분포, 분무기의 분사속도 등을 한성입자크 하이 실험하였다.

A Study on the important Parameters for the Design of Spray drying Chamber

Kim, Young Tae., Yoo, Man Hyung* and Cha, Min Whan*

Dept. of Industrial Chemistry

〈Abstract〉

This study was carried out to correlate the very important factors and derive an equation for design of spray drying chamber in general form including operating conditions of atomizer.

Taking the largest drop among spray particles as a limiting particle correlate the trajectory equation, drying time of the particle and the parameters which determine the volume of a drying chamber.

Temperature difference between the dry bulb and wet bulb at various local points was measured and compared with over-all temperature difference between inlet and outlet of the chamber.

I. 서 론

슬러지계의 건조방법에는 이더가지가 있으나 그 중에서도 분무건조는 용액이나 현탁액, slurry 상의 물질등을 미립액상으로 건조공기와 접촉시켜 열손실없이 짧은시간(2~20초)에 건조시키는 방법이다. 이방법은 연속적인 조작으로 인력을 절약할 수 있고 제품의 취급이 간편하므로 작업조건 개선과 제품의 질을 균일하게 회수할 수 있다. 이 방법은 열에 민감한 물질의 건조에 좋으며 여타의 건조방법으로 불가능한 이파와 분해 과정을 생략할 수 있다.

이와 같이 여러가지 장점이 있지만 사용이 활발하지 못 한것은 건조기 내의 흐름형태나 진행과정이 완전히 밝혀지지 않았고 이전의 연구들은 이 현상을 간단한 가정을 세워 연구하였으므로 각자가 사용한 모델에서만 타당성이 있고 서로간에 연관성이 희박하여 일반성있는 자료가 아직 부족하다. 본연구는 지금까지 가장 타당성 있는 인자들을 상형시켜 건조기의 실제상 필요한 관계식을 Atomizer의 조작조건을 포함하는 일반적인 경우로 유도하였다. 본 연구에서는 분무입자중 가장 큰 입자를 한성입자라 하여 이 입자의 건조시간과 건조실의 크기분 설정하는 제 인자를 상관시켰고 건조시간의 계산에서 건

* 忠北大學校 化工科

속도의 추진력이 되는 온도차를 건조실내의 여러 위치에서 측정된 건조온도와 습구온도의 차이를 건조실의 입구의 출구의 온도차로 총합 계산하였을 경우와 비교하여 그 관계를 밝혔다. 또한 한성임자 1개당 계산된 진열속도식은 입사분포를 고려하여 선분무에 관한 선열속도식으로 구하였다. 본인구에서 상기식의 유도과정에 쓰인 건조실내부의 온도 및 습도를 실내부의 위치에 따라 측정 고감하였고 건조실의 실체를 위한 방향을 제시하였다. 1883年 독일에서 특허로 발표된후 지금까지의 연구동태를 보면 Atomizer와 drop size에 대해서 Fraser와 Dombrowski⁽⁶⁾, 拔山과 棚澤⁽¹³⁾ Wigg⁽¹⁶⁾ 등에 의하여, drop trajectory에 관하여는 Gauvim⁽⁹⁾에 의하여 연구되었으며 흐름형태, 저형시간 혼합 등은 Leon Baltas와 Gauvim⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ Lewis⁽¹¹⁾ 등에 의하여 연구되었다. Frossing⁽⁷⁾ Ronz와 M & shall⁽¹⁴⁾ 등은 Re No가 0~10,000 범위에서 건조속도, 역 및 물질진닐의 관계식을 얻었으며, Sjenizer⁽¹⁵⁾ Duffy와 Marshall⁽⁵⁾ Gaubin⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ Crosby⁽⁴⁾ 등은 spray drying medium을 retarding zone과 free falling zone으로 나누어 drop 생성시의 저항 및 항윤조건에 대한 특징을 연구한바 있다.

II. 이 논

1. 가정 및 수학적모델

(가) 분무임자는 불용성 해를 포함하여 균일하게 분포되어 있으며 입자늘의 최합은 무시한다.

(나) 분무임자의 건조시간은 분사후 건조기의 벽에 충돌할때 까지의 flight time으로 한다.

(다) 분무임자의 Nusselt No는 2이다.⁽¹⁶⁾

(라) 분무임자는 분사될때 동시에 포화온도에 도달하기 건조실 내부에서 분사임자늘의 열진닐은 대류단 고려한다.

(마) 건조기는 열추실이 없는 단열과정이나.

2. 이논식의 유도

(가) 건조실 내부의 온도 및 습도의 분포는 Spray zone이나 Free falling zone에서 같은 구배의 변화율을 갖는 동선원의 무수한 유형상태로 존재하며 nozzle로 부터 분사된 입자는 종말속도에 도달한 임의의 유형에서 증력과 건조매체의 속도에 의하여 하강한다.

(나) 임의의 임경분포를 갖는 입자를 분사할때 노즐의 팽창각 이내의 모든 입자는 노즐로부터 동일

한 거리에 도달한 후에 종말속도를 갖는다.

노즐로부터 분사된 모든 한경입자는 각 유형을 통과하여 종말속도가 될때까지 거리 l 만큼 이동한다. 이때 노즐의 팽창각은 ω 이며 z 은 임의의 유형을 표시하며 Ki는 중심에서 유형까지 길이이다.

$$l = \sum_{i=0}^n (K_{i+1} - K_i) \operatorname{cosec} \frac{\omega}{2} \quad (1)$$

분무임자의 평균유속은(11)

$$\frac{V}{V_m} = 6.2 \left(\frac{De}{l} \right) \quad (2)$$

$V = \frac{dl}{dt}$ 이고 직분하면

$$\theta_i = \frac{l_i}{12.4 V_m \cdot D_e} \quad (3)$$

건조실의 노즐 하부로 부터 Spray zone까지의 유효부피를 S 로 놓으면

$$S = \frac{\pi D_e^2 l_i^2}{4} \quad (4)$$

가정 (나)와 문헌 (1)에 의하여 시서 L/D_e 는 4~5 이므로

$$\frac{D_e}{l_i} = \frac{1}{4} \quad (5)$$

(4)을 (5)시에 대입

$$S = \frac{\pi l_i^3}{64} \quad (6)$$

(6)식을 (3)시에 대입

$$\theta_i = \left(\frac{64}{\pi} \right)^{2/3} \frac{S^{2/3}}{(12.4) V_m \cdot D_e} \quad (7)$$

분무기에서 물질수지일 취하면

$$F_a + F_s = \frac{V_m \pi D_e \rho_m}{4} \quad (8)$$

또한 $V_a \cdot F_a = (F_a + F_s) V_m$

(8)을 (9)식에 대입하면

$$F_a + F_s = V_a \frac{F_a}{F_a + F_s} + \frac{\pi D_e^2}{4} \rho_m \quad (10)$$

(10), (9) 양식을 (7)식에 대입하면

$$\begin{aligned} \theta_i &= \left(\frac{64}{\pi} \right)^{2/3} \frac{S^{2/3}}{(24.8) V_a \cdot F_a \sqrt{\frac{1}{\pi F_a \cdot V_a \rho_m}}} \\ &= 0.532 S^{2/3} \sqrt{\frac{\rho_m}{F_a \cdot V_a}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{그러므로 } \frac{\rho_m}{\rho_a} \left(\frac{F_a + F_s}{F_a} \right) \quad (12)$$

(12)식을 (11)에 대입하면

$$\theta_i = 0.532 S^{2/3} \sqrt{\left(\frac{\rho_a}{F_a \cdot V_a} \right) \left(\frac{F_a + F_s}{F_a} \right)} \quad (13)$$

한경 입자의 전열 속도식은 다음에 같다.

$$\frac{dQ}{d\theta} \cdot hA \Delta t_i = 2\pi k D_{max} \Delta t_i \quad (14)$$

한 입자의 고지 질량당 전열량은 다음과 같다.

$$\frac{dQ_m}{d\theta} = \frac{12\pi \cdot k \cdot D_{max} \cdot \Delta t_i}{\rho_s \cdot \pi \cdot (D_{max})^3} = \frac{12k \cdot \Delta t_i}{\rho_s \cdot (D_{max})^2} \quad (15)$$

각 입자당

$$Q_m = \frac{12k \cdot \Delta t_i}{\rho_s \cdot (D_{max})^2} \theta_{max} \quad (16)$$

선열속도는

$$q = \frac{dQ}{d\theta} = Q_m \cdot F_s \quad (17)$$

(17)식과 (16)식에

$$q = \frac{12k \cdot \Delta t_i \cdot F_s \cdot \theta_{max}}{\rho_s (D_{max})^2} \quad (18)$$

θ_i 와 θ_{max} / 차함으로

$$q = \frac{6.38 \cdot k \cdot S^{2/3} \cdot \Delta t_i \cdot F_s}{(D_{max})^2 \cdot \rho_s} \sqrt{\left(\frac{\rho_a}{F_a V_a}\right) \left(\frac{F_a + F_s}{F_a}\right)} \quad (19)$$

가 되어 선열속도 q 여러 인자에서 구할 수 있다.

(19)식은 환산 입자질 기준으로 계산된 식이므로 선체식 입도 분포에 대한 평균 선열 속도를 입자의 상극 분포의 반경시켜서 계산하면 다음과 같다.

$$d_p^* = \frac{D_{max}}{d_p} \quad (20)$$

$$\bar{q}_m = \frac{6.38 \cdot k \cdot S^{2/3} \cdot \Delta t_i \cdot F_s}{\rho_s d_p^2} \sqrt{\frac{\rho_a}{F_a V_a} \left(\frac{F_a + F_s}{F_a}\right)} \left[\int_0^\infty \frac{1}{d_p^{*2} \phi(d_p^*)} \right]$$

와 같다.

이거시

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot \sqrt{d_p^*}} \exp\left[-\frac{(\sqrt{d_p^*} - \bar{1})^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \bar{Q}_i \cdot \bar{q}_m \cdot F_s \quad (21)$$

이거시

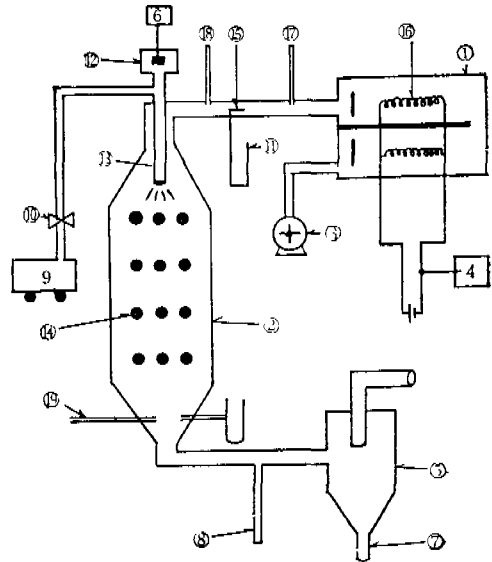
$$\beta = 6.38 \cdot k \cdot \frac{F_s}{d_p^2 \cdot \rho_s} \sqrt{\frac{\rho_a}{F_a V_a} \left(\frac{F_a + F_s}{F_a}\right)} \left[\int_0^\infty \frac{1}{d_p^{*2} \phi(d_p^*)} \right] \text{이면}$$

$$S = \left(\frac{Q_i}{\beta \cdot \Delta t_i}\right)^{3/2} \quad (22)$$

III. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 분무건조장치는 持田降,⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾에 의해 제시된 설계방법에 따라 건조실을 설계하

였으며 또한 Boewn Lab Type D을 이용하였다. 열원으로 7kW의 전열선을 단열된 가열기내에 설치하였고 송풍기에 의해 송풍된 공기가 가열기내에서 가열되어 건조실 내부로 유입되어 이 고온공기의 온도조절을 위해 도관내에 Pt-Rd 열선대를 설치



1. HEATING CHAMBER
2. DRYING CHAMBER
3. BLOWER
4. TEMPERATURE CONTROLLER
5. CYCLONE
6. AGITATOR
7. PRODUCT COLLECTOR
8. DRAIN
9. AIR COMPRESSOR
10. VALVE
11. MANOMETER
12. FEED VESSEL
13. NOZZLE (ATOMIZER)
14. TEMPERATURE CHECK
15. PITOT TUBE
16. HEATING COIL
17. THERMOMETER

Fig 1. Experimental Apparatus

하이 온도조절기와 연결시켰다. Atomizer는 건조실의 중심축방향으로 분사되도록 2개의 노즐을 세차 사용하였으며 분무기 공기는 압축기로 압축한 건조 공기를 공급했다. 건조실 내부의 측면온도 측정은 Pt-Rd 열선대를 하였다.

본연구에 사용된 시료는 건조됨에 Swelling Kupture 현상을 방지하기 위해 단단한 고체구조 Gypsum을 사용하였다.

시료의 채취는 Gypsum을 24시간 건조시킨후 Ball mill로 분쇄하여 200mesh 통과부를 Shimadzu Sedi

mento Graphy(Type SA2)을 이용하여 입도를 분석하였고 비표준적인 Shimadzu (Type SS 100) 입자표준 측정기에 의해 측정하였다.

분부공기의 유속은 Pitot관과 Orifice Meter로 측정하였으며 건조실 내부의 측면온도는 실내부로 부터 15cm 간격으로 r/R 비가 0, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{3}$ 네 곳을 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

건조실 내부의 건열속도 제한에서 Ranz, Marshall^{(9),(11)} 등은 온도는 축방향으로 균일하다고 가정하였으며 Leon, Baltas^{(9),(10)} 등은 실내부의 온도 및 습도 관계를 아래와 같이 표현 했다.

$$T_r = T_s + 33.2 - 4170H$$

본 실험에서 얻은 온도를 실지한 결과 Fig. 2에서 실내부의 식경 방향의 측면 온도는 축을 중심으로 벽에 가까워 질수록 감소하는 경향을 나타내며 가

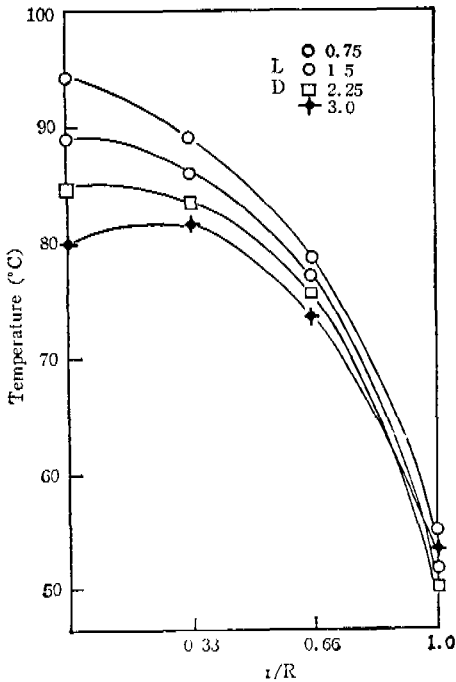


Fig. 2. Radial Temp profiles with hot air

증가할수록 온도는 떨어졌다. 또 Fig. 3에서 시료를 분부시는 $r/R=0.66$ 부근에서 측면온도의 변화가 생겼고 오히려 L/D 에 대해서 밀의 온도가 상승한 것은 건조실의 하부에서 생긴 열공기의 Back flow가 분부에 영향이 Fig. 2와 3에서 열공기면

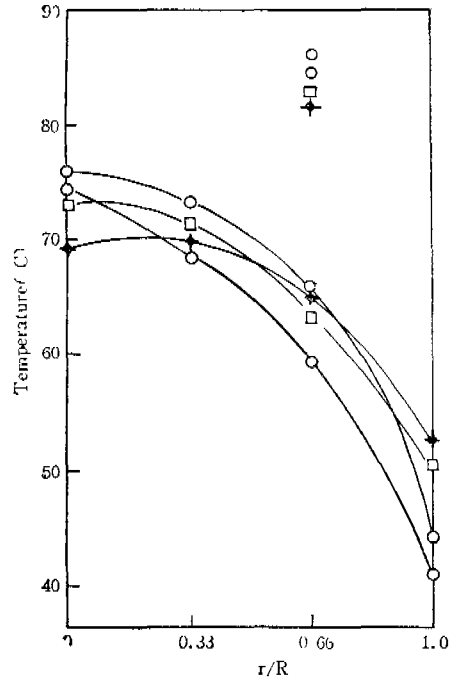


Fig. 3. Radial Temp profiles with Spray

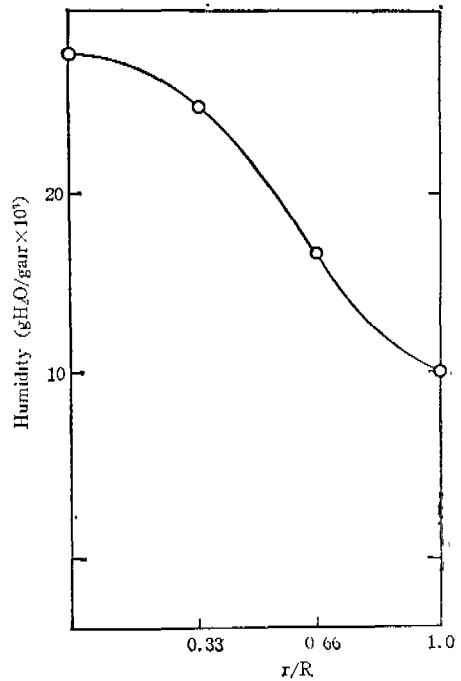


Fig. 4. Radial Humidity at L/D = 1.5

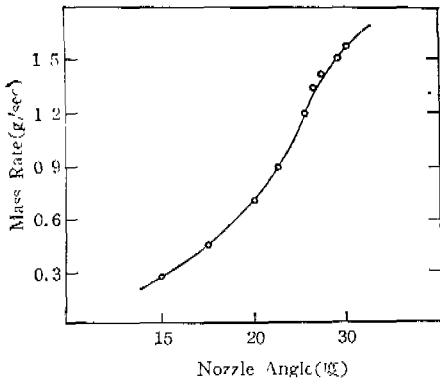


Fig. 5. Relation between Nozzle Angle and Mass Rate

의 경우에 $r/R=0.66$, $L/D=2.25$ 에서 3.0까지 생겼던 액류영역이 더 넓어져 Spray zone이 끝나는 $L/D=2.25\sim 3.0$ 위치의 비 근방의 열풍기의 체류시간이 길어지므로 열의 축적이 생긴 결과로 예상됩니다.

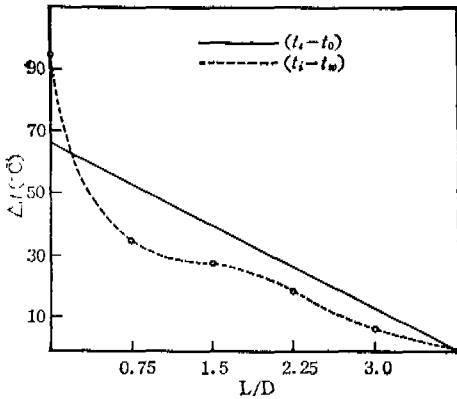


Fig. 6. Temp difference vs L/D

Fig. 4에서 $L/D=1.5$ 에서 축비습도 r/R 에 위치가 따라 보이주고 있다. 벽에 가까워질수록 감소할 수 있다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 노즐은 일정한 유량에서 팽창각이 조절되지 않으므로 진탕속도에 따라 사운 변화되었으나 노즐의 계각이 정밀하지 못했음은 그림에서도 알 수 있다.

Δt_i 의 계산은 윗형모형에 기 구한 $\Delta t_i = t_i - t_w$ 와 총관기이므로 계산한 값 즉 $\Delta t_i = t_i - t_o$ 사이에는 후자가 선사의 값보다 큰 값을 갖는 것을 Fig. 6에서 알 수

있다.

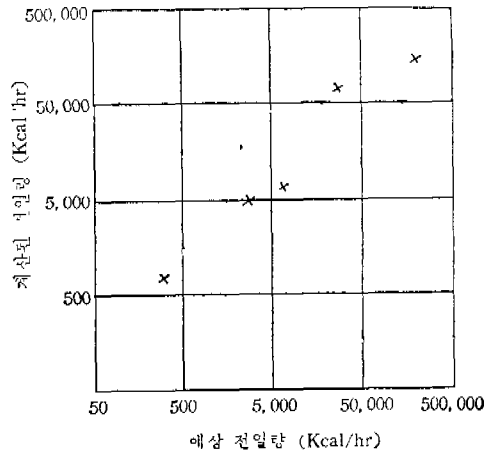


Fig. 7. 전열량

IV. 결론

이상의 결과로서 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 전소 조각의 성능을 고칠때 단계적으로 구한 온도차로 계산한 열량은 총괄적인 온도차 $(t_i - t_o)$ 보서 제기된 열량보다 25% 적다.
- (2) 조식 조건을 고려함으로써 보다 실제적이고 정확한 건조실 크기를 결정할 수 있다.

Nomenclature

- A =진열면적, cm^2
- D_c =분무건조기의 직경, cm
- D_e =분무기의 유효직경, cm
- d_p =입자직경, cm
- \bar{d}_p =평균입자직경, cm
- d_p^* =회산평균 입자직경, cm
- D_{max} =한계입자직경, cm
- H =질대습도, H_2O g/건조공기 g
- h =전열계수, $cal/(cm^2)(^{\circ}C)(hr)$
- k =입자 주위의 gas film의 열전도도, $cal/(hr)(cm)(^{\circ}C)$
- K_i =분무기 중심에서 입자의 거리, cm
- l =입자의 비선거리, cm
- Q =진열열량, cal
- Q_m =단위 중량당 전열량, cal/g
- q =분무기에서 진열속도, cal/hr

Jt = 온도차, °C

S = 건조길의 개시 cm^3

V = 분무기의 촉량당 속도, cm/hr

V_m = 용액의 분무기에서 속도, cm/hr

θ_{\max} = 환상 입자의 건조시간, hr

θ_i = 용액이 떨어지는 건조시간, hr

ρ_a = 공기의 비중, g/cm^3

ρ_m = 용액의 분무기에서 비중, g/cm^3

F_a = 분무공기의 유속, g/hr

F_s = 분무용액의 유속, g/hr

參 考 文 獻

1. BOWEN Lab Spray dryer Catalog, 1911.
2. CHARLES worth D.H., W.R. *Marshall*, Jr, T of A.I.C.h.E. **6**, 1.80. (1963)
3. JU, Chun Chu Stanley Finlet, I&EL, **51**, 3, 107 (1959)
4. CROSBY, E. T. and *Marshall* W.R. C. E. P. **52**, 231. (1957)
5. DUFFY, J. A. and *Marshall* W.R., C. E. P, **49**, 417~480 (1953)
6. FRASER, R.P. and *Dombroski* N., *Chem. Eng. Sci.*, **18**, 339 (1963)
7. FROESSLING, N., *Acta, Univ. Innd.*, **36** (47), 43 (1940)
8. WIGG, L.D., *Ind Fuel.*, **37**, 500 (p964)
9. LEON Baltas, W.H. Gauvin, T. of AIChE, **15**, 5, 764 (1969)
10. LEON Baltas, W.H. Gauvin, T. of AIChE, **15**, 5, 772 (1969)
11. LEWIS, H.G. and D.G., *Edward Ind. Eng. C.hem.*, **40**, 67, (1948)
12. Masters. K., M.F. *Mofftadi, Briti. Chem. Eng.*, **13**, 2, 242 (1968)
13. NUKIYAMA, S. and *Tanasawa* Y., *Trans. soc. Mech. Engr. Japan*, **4**, 86 (1938)
14. RANZ, W.E and *Marshall*, W.R., Jr, C. E.P., **48**, (4), 173. (1952)
15. SJENIZER, F., *Chem., Eng.Sci*, **1** (3), 101 (1952)
16. 持田隆, 荻田, 化學裝置 66—67, 1973, 6.
17. *ibid.* 54—63. 1973. 2.