

기류건조기의 설계 (I)

朴 明 治 · 權 英 秀

한국과학기술연구소 공업화실험실

1. 서 언

분립상(粉粒狀), 니상(泥狀) 또는 괴상(塊狀)의 피건조물을 열기류중에 분립상으로 분산시켜 열기류와 병행수송하면서 건조시키는 건조법을 기류건조법이라 한다.

이 건조법은 이미 1930년에 독일에서 공업규모로 채용된 적이 있고, 1949년 미국의 Gordon¹⁾이 Flash Drying이라 호칭하여 이를 소개한 이래 세계 각국에서 많은 주목을 받기 시작했다. 따라서 기류건조기를 대개 Flash Dryer라 부르기도 하나 이는 당시 Gordon이 근무한 Combustion Engineering사의 상품명에 지나지 않으며 일반적으로 기류건조기(Pneumatic conveying dryer)라 명명되어 여러책에서 소개되고 있다²⁾.

이하 본고에서는 이 기류건조기의 운전특성과 설계순서를 요약하고자 한다.

2. 본 건조기의 적용범위

기류건조기는 피건조물이 열기류와 함께 건조관내에서 수직으로 수송되면서 매우 짧은 시간내에 건조가 일어나므로 적용범위에 약간의 제약이 따른다.

첫째, 피건조물이 심하게 응집되어서는 안되며, 열기류속에서 용이하게 분산되어야 한다.

둘째, 건조관내로 투입되는 피건조물의 입경은 밀도에 따라 달라질 수 있으나 대개 1~2mm까지가 적당하다. 이 이상의 입경을 가졌거나 응집된 것은 적당한방법으로 분쇄하여 투입한다. 이는 열풍의 송입속도와 송입압력에 제한이 다르기 때문이다.

셋째, 매우 짧은 시간(일반적으로 0.5~3초) 내에 건조가 일어나므로 비교적 건조속도가 빠른물질이 좋다.

넷째, 건조후 미세 분말은 집진기에서 효과적으로 포집되어야 하며, 포집이 곤란하거나 특히 유해물질은 본 건조기의 적용을 피하는 것이 좋다.

또한 점착성이 강한 재료나 결정입자가 파괴되어서는 안되는 물질은 피하는 것이 좋다. 파괴되기 쉬운 물질은 입자파괴에 대한 허용풍속을 구하여 어떤 범위내에서 운전할 수는 있다.

이상과 같은 제약점들을 제외하면 다음과 같은 장점들을 간주될 수가 있다.

(1) 건조시간이 짧고 열풍과 병류(cocurrent)하므로 열에 매우 불안정한 물질에도 적용할 수 있다.

(2) 열풍이 피건조물을 수송하면서 건조시키므로 별도 수송장치가 필요하지 않다.

(3) 설치면적이 비교적 적고, 최종 집진기 이외에는 옥외설치가 가능하다.

(4) 건조기의 운전과 제어가 비교적 용이하다.

(5) 동작부위가 적으므로 수선유지비가 적게 든다.

(6) 다른 건조기에 비해 건설비가 적게 든다.

3. 여러가지 계통도²⁾

기류건조기의 몇가지 계통도를 설명하면 다음과 같다.

Fig. 1은 가장 일반적인 계통도이다. ①에서 발생한 열풍은 ⑤공급기, ③파쇄기로부터 공급된 피건조물을 ②건조관에서 분산 건조시킨다. 건조가 끝난 물질은 ④싸이크론에서 대부분 포집되고 미세분말은 ⑧ bag filter에서 다시 포집된다. ⑨는 배풍기이다.

피건조물이 응집되지 않는 것은 별도의 파쇄기가 필요하지 않으며, 싸이크론은 일차, 이차로 분리하여 설치하는 경우도 있고 bag filter 대신 venturi scrubber, cyclone scrubber 혹은 정전기 집진기를 사용할 수도 있다.

Fig. 2는 ⑦분급기를 설치하여 조립자는 공급구로 다시 순환시키는 방법인데 분급은 기계분급이나 풍력분급이 사용된다.

Fig. 3은 건조제품을 일부 순환시켜 원료에 다시 혼합하는 방법인데 피건조물의 수분함량이 너무 많아 분산이 곤란한 경우에 사용하는 방법이다.

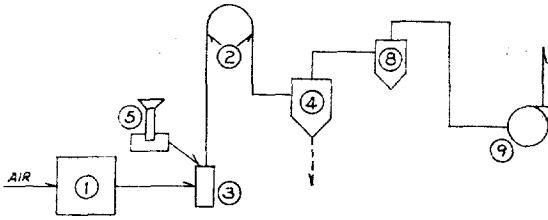


Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic conveying dryer-I

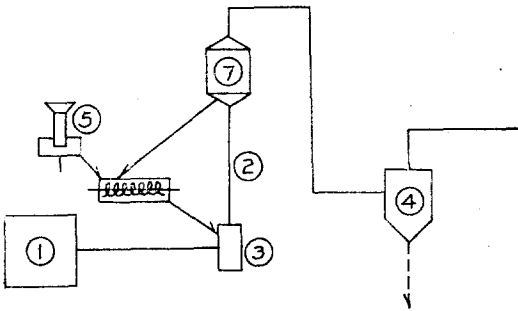


Fig. 2 Schematic diagram of pneumatic conveying dryer-II

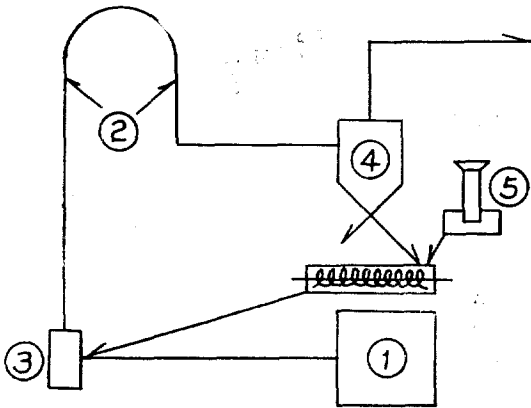


Fig. 3 Schematic diagram of pneumatic conveying dryer-III

4. 계장 및 제어

앞에서도 말한 바와 같이 피건조물의 체류시간이 매우 짧기 때문에 증발부하의 변화는 열풍의 출구온도에 신속하고도 직접적인 영향을 미치게 되고, 이는 다시

피건조물과 열풍과의 평균온도차에 영향을 주어 제품 수분함량을 변화시킨다. 실제로 증발부하, 열풍의 출구온도 및 제품의 수분함량과의 관계는 매우 복잡하다. 증발부하의 변화에 대하여 열풍의 출구온도에 나타나는 응답이 매우 신속하다는 점은 열풍의 출구온도가 건조기의 제어에 매우 편리한 제어변수가 될 수 있다는 사실을 암시해 준다. 제어변수에 대한 조작변수로는 다음의 세가지가 있다.

(1) 열풍의 송입량을 고정시키고 그 입구온도를 변화시키는 방법.

(2) 증발부하가 거의 일정한 값을 유지할 수 있도록 피건조물 공급속도를 변화시키는 방법.

(3) 열풍의 입구온도를 고정시키고 그 송입량을 변화시키는 방법.

가장 일반적으로 쓰이는 방법은 첫번째 방법이다. 열풍의 온도변화는 대부분 항률건조구간(constant-rate period)에서 일어나고 감률건조구간(falling-rate period)에서는 열풍온도가 거의 일정하다. 따라서 열풍의 입구온도가 올라가면 그만큼 열효율이 증가하는 이점이 있다.

두번째 방법은 건조기의 처리능력변화가 공장내의 다른 공정에 영향을 미치지 않는 경우에 한하여 가능하다. 특히 제어되지 않는 폐열을 열원으로 이용하는 경우에는 매우 유리한 방법이다.

세번째 방법은 특별한 경우를 제외하고는 별로 사용되지 않는 방법이다. 즉 열풍의 입구온도를 고정시키고 풍량을 변화시키는 방법은 그만큼 체류시간의 변화를 초래하여 제어에 혼란을 야기시킨다. 만일 증발부하가 증가한다면 이 경우에는 체류시간이 감소하기 때문에 공급열량 뿐만 아니고 열풍과 피건조물간의 평균 온도차가 증가해야 하는데, 출구온도가 제어변수로 사용되어 어떤 설정치 이상이 될 수가 없으므로 요구되는 온도차의 증가는 일어나지 않는다. 따라서 이 방법은 증발부하가 설계치 이하의 범위에서 변하는 경우, 또는 일정량을 초과하지 않는 경우에 한하여만 가능하다.

수동이나 자동이나를 불문하고 어떤 제어방법을 사용하든간에 피건조물은 될수 있는대로 일정하게 공급하여 증발부하에 급격한 변동을 주지 않는 것이 바람직한 일이다. 이는 제어시스템의 응답시간이 피건조물의 체류시간보다 커질 위험성이 다르기 때문이다. 이렇게 되면 부하의 증가에 해당하는 만큼의 제품 수분 함량이 증가하여 싸이크론이나 bag blower에 지장을 초래한다. 체류시간이 짧다는 것이 커다란 장점이 되는 반면에 이런 점에서는 또한 단점이 될 수 있다.

5. 설계에 필요한 자료

건조는 열전달과 물질전달이 동시에 일어나는 현상이므로 원칙적으로는 열전달 및 물질전달계수만 측정되면 건조기의 설계는 가능하다. 기타 피건조물의 입도분포, 자유낙하 속도 및 여러가지 경험적인 자료가 뒷받침 되어야 하지만 가장 기본적인 형태의 건조기 설계를 예로 들면 다음과 같은 기본사항을 풀어야 한다.

(1) 피건조물을 수송하는데 필요한 최소한도의 열풍 속도.

(2) 열풍의 입구온도.

(3) 피건조물의 건조 및 수송에 필요한 열풍/고형물비

(4) 체류시간

(5) 필요열량

이에 필요한 기초자료로써는

(1) 처리량

(2) 피건조물의 초기 수분함량 및 온도

(3) 제품의 출구 수분함량

(4) 피건조물의 입도분포

(5) 피건조물의 진비중

(6) 피건조물의 비열

(7) 제품의 출구온도 및 허용최고온도

(8) 열 및 물질전달계수

등을 들 수 있다.

경험치에 의하면 열풍의 출구온도는 제품출구온도보다 약 10~30°C 정도 높은 것이 알맞다고 한다.

설계순서를 기술하기 전에 먼저 열전달 및 물질전달계수를 측정하는 실험실적인 방법을 약속하고자 한다.

6. 수분함유 고형물의 증기압 측정³⁾

Fig. 4 와 같은 측정장치를 사용한다. 시료병(sample holder)에 소량의 시료를 넣고 시료병과 평형용 차압계(Balancing manometer)를 드라이 아이스-메칠알콜 조(槽)에 넣어 동결시킨 후 진공을 1mmHg 이하로 걸고 공기를 뱀다. 다음에 시료병 위의 코크(cock)를 닫고 대신 수조(水槽)에 담겨 수조온도와 시료온도가 같아 지도록 충분한 시간을 주어 서서히 가열한다. 시료병 내의 압력이 상승하면 진공라인에 공기를 유입시켜 평형용 차압계를 평형시킨다. 이때의 압력(즉 증기압)과 온도를 기록하고, 같은 작업을 수분함량이 다른 여러

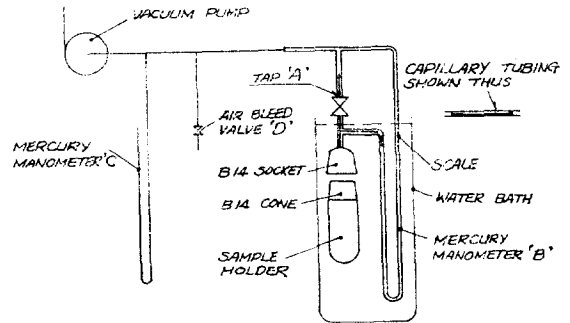


Fig. 4 Vapour pressure apparatus

가지 시료에 대해 일정 시간간격을 두고 반복한다.

Clausius-Clapeyron 식에 의하면 증기압과 절대온도와는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{dP^*}{dT} = \frac{\lambda}{RT^{*2}} \quad (1)$$

$$\ln \frac{P_2^*}{P_1^*} = \frac{\lambda}{R} \left(\frac{1}{T_1^*} - \frac{1}{T_2^*} \right) \quad (2)$$

$\ln P^*$ 를 $1/T^*$ 에 대해 그리면 직선으로 나타난다. Fig. 5는 어떤 무기염에 대한 실험결과인데 대부분의 무기염도 이와 비슷한 실험치가 나타난다.

만일 용해성 물질인 경우에는 건조시 물질에 부착된 포화용액이 증발됨에 따라 건조가 진행되면 결정이 생긴다.

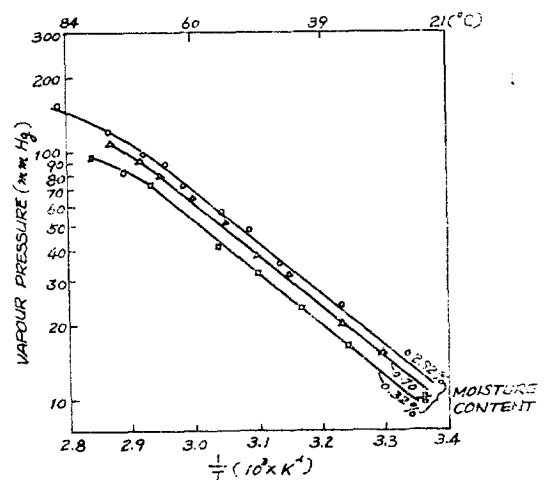


Fig. 5 Vapour pressure of an inorganic material

따라서 실험결과로 계산한 증발잠열에는 실제로는 결정열이 가감된 것이다.

7. 열 및 물질전달계수의 측정

Fig. 6은 실험실적인 기류 건조장치이다. 장치 각 부분의 크기 및 용량, 열풍의 속도 및 온도, 시료의 공급속도등은 실험자가 편리하도록 정한다. 이 실험의 주 목적은 열 및 물질전달계수를 측정하는 것이지만, 공업적인 규모의 건조기를 설계하기 전에 한번쯤은 실험실적인 규모의 예비실험을 거쳐 여러가지 자료를 얻고 윤곽을 파악해 두는 것이 바람직한 일일 것이다.

Table. 1은 어떤 무기염에 대한 실험결과를 정리한 것이다.

(KA_u) 및 (hA_u)는 다음 ③식과 ④식에 의해 계산되며 이에대한 자세한 설명은 후술 하겠다.

$$hA_u = \frac{\Sigma Q}{\Delta T_{lm} \cdot \theta_h} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Sigma Q &= Q_g + Q_c + Q_\lambda = (C_s + C_w \cdot M_m)(T_2 - T_1) \\ &+ \frac{M_2 S_2 Q_{C2}}{100 - S_2} - \frac{M_1 S_1 Q_{C1}}{100 - S_1} + Q_\lambda \\ KA_u &= \frac{M_1 - M_2}{\Delta P_{lm} \cdot \theta_m} \quad (4) \end{aligned}$$

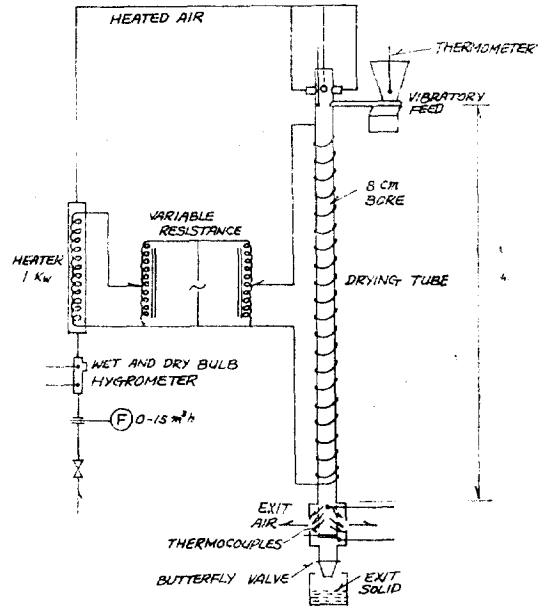


Fig. 6 Laboratory model of a pneumatic dryer

Table. 1 Drying tests on an inorganic salt in laboratory model pneumatic conveying dryer⁽¹⁾

	Symbol	Unit	Run 1	2	Remarks
Initial moisture	M_1	wt %	3.36	2.40	
Final moisture	M_2	wt %	2.53	1.92	
Mean moisture			2.94	2.16	
Mass transfered		g/kg	8.3	4.8	
Initial solid temp.	T_1'	°C	23	24	
Final solid temp.	T_2'	°C	34	34	
Inlet air temp.	T_1	°C	73	73	
Exit air temp	T_2	°C	68	68	
Log mean temp. diff.	ΔT_{lm}	°C	41	41	
Sensible heat to dry solid		kcal/kg	4.3	3.9	
Sensible heat to residual water		kcal/kg	0.32	0.22	
Latent heat of evaporation		kcal/kg	4.73	2.74	
Total heat transferred		kcal/kg	9.40	6.86	
Water vap. pressure over solid at T_1'		mmHg	12	15.8	Experimental result refer to the previous section
Water vap. pressure over solid at T_2'		mmHg	27	27	"
Partial pressure of water vap. in the air		mmHg	3.75	3.75	Assumed that air is supplied sufficiently
Log mean v. p. driving force	ΔP_{lm}	mmHg	15.8	17.3	
Heat transfer coefficient	(hA_u)	kcal/kg·sec·°C	0.46	0.33	Eq. ③
Mass transfer coefficient	(KA_u)	kg/kg·sec·mmHg	1.05 $\times 10^{-3}$	0.55 $\times 10^{-3}$	Eq. ④

Residence time=0.5 sec.

Specific heat of dry solid=0.39 kcal/kg·°C

Operating pressure=760 mmHg

Latent heat of evaporation of water=570 kcal/kg

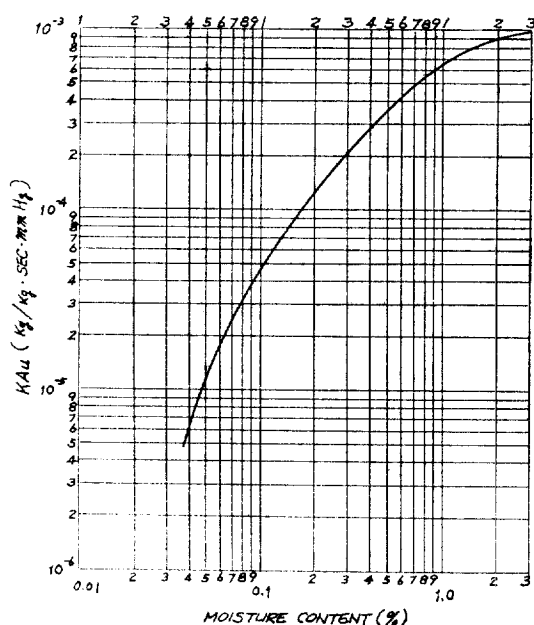


Fig. 7 Relation between the mass-transfer coefficient(KA_u) and the moisture content of the salt determined in the laboratory model of a pneumatic dryer

열 및 물질달전계수 (hA_u , KA_u 가 아니고 h 및 K)를 실험에 의해서 측정하지 않고 계산으로 구하는 실험식이 몇가지 소개되고 있으나⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 현재까지는 그 신빙성도 의심스럽고 또 실제 입자의 면적(A_u)을 계산하기도 매우 곤란하므로 상기 방법에 의해 hA_u , KA_u 형태의 계수를 측정하여 사용하는 것이 좋은 것이다.

Fig. 7은 어떤 무기염의 수분함량에 따른 KA_u 치를 구한 것이다.

8. 건조기 설계순서

8-1 설계순서

- (1) 증발부하 및 피건조물 내열허용 온도로부터 열풍의 유량과 입구 온도를 설정한다.
- (2) 입자의 자유낙하속도로부터 필요한 열풍의 유속과 건조관의 직경을 계산한다.
- (3) 열 및 물질전달계수를 찾고, 물질 및 열수지로부터 건조시간과 건조관의 높이를 계산한다.
- (4) 출구제품의 재순환 필요성 여부를 검토한다.
- (5) 총 필요열량을 계산한다.
- (6) 필요동력을 계산한다.
- (7) 피건조물 공급방법을 결정한다.

(8) 적절한 계장과 제어방법을 강구한다.

8-2 열풍 입구온도 및 유량

건조기에서의 필요열량은 피건조물과 함유수분의 현열증가 및 증발잠열의 합으로 나타나며, 이 단계에서는 열손실을 고려하지 않는 것이 좋다. 열풍의 유량은 열풍의 입출구온도를 먼저 가정한 후 열수지에 의해 구하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 열풍 입구온도는 피건조물의 내열허용온도, 열풍 발생장치등을 감안하여 결정하며 열풍 출구온도는 보통 제품 출구온도보다 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 높게 가정한다. 열풍의 유량이 정해지면 출구에서의 수증기 분압과 피건조물의 증기압을 비교하여 적당한 값인가를 확인한다. 기류건조기에서는 출구에서의 수증기 분압이 제품의 수증기 증기압에 비해 반 이하가 되도록 하는 것이 좋다. 즉, 열풍의 유량은 제품의 출입구 온도 및 열풍의 출입구온도를 여러가지로 가정하여 출구에서의 수증기 분압과 증기압, 건조관의 관경과 필요 유속등의 관계를 고려하여 가장 알맞는 값이 되도록 한다.

8-3 열풍의 유속

초기속도 0에서 건조관에 공급되는 입자군은 열풍과의 충돌에 의해 가속되면서 상승한다. 일정한 거리를 상승한 후에는 열풍과 입자는 그 상대속도가 입자의 종말속도와 같은 속도차를 가지고 비상하게 된다. 그 일정한 거리 이진을 가속권(加速圈), 이후를 종속권(終速圈)이라 부른다. 입자의 속도는 건조관의 유효건조면적과 관계가 있고, 열풍과의 상대속도는 전열 및 물질전달계수와 관계가 있다. 따라서 건조관내에의 입자의 비적(飛跡)을 추구하지 않으면 안된다.

수직으로 상승하는 기류중에 투입된 한개의 입자가 가속되는 속도는 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{dV_i}{d\theta} = \frac{\rho_g C_D a_k (V_g - V_i)^2}{2m} - \frac{(\rho_p - \rho_g)g}{\rho_p} \quad (5)$$

일반적으로 $\rho_p \gg \rho_g$ 이고, 입자가 구형인 경우,

$m = (\pi/6)d^3\rho_p$, $a_k = (\pi/4)d^2$ 이므로

$$\frac{dV_i}{d\theta} = \frac{3C_D\rho_g(V_g - V_i)^2}{4d\rho_p} - g \quad (6)$$

입자가 종말속도에 달하면 $dV_i/d\theta = 0$ 이 되므로 이때의 종말속도 V_t 는

$$V_t = \sqrt{\frac{4d\rho_p g}{3C_D\rho_g}} \quad (7)$$

저항계수(drag coefficient) C_D 는 Re 수와 함수관계

에 있고³⁾ $Re > 10^3$ 의 범위에서는 거의 일정($C_D \approx 0.44$)하다.

입자가 구형이 아닐 때는 보정계수 F 를 도입하여 ⑤식을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dV_s}{d\theta} = \frac{\rho_g C_D (\pi/4) d^2 (V_g - V_s)^2}{2Fd^3 \rho_p} - g \quad (8)$$

표면적 a_s 는 대표경을 취하여 $(\pi/4)d^2$ 으로 표시해도 큰 오차가 없다. F 의 값은 체적계수(구의 경우 $\frac{\pi}{6}$)와 면적보정계수(최대 1.0)의 곱이며 일반적으로 모래인 경우 0.27~0.316, 유안($d=0.5$ mm)일때 0.456이고 물질에 따른 각종 값이 발표되고 있다.⁹⁾

기류진조에서는 입자질량 대 열풍질량의 비가 최대 1 정도로서, 입자가 가속된 후의 입자농도는 극히 희박하여 입자군이 입자속도에 미치는 영향은 매우 적지만, 입자투입 직후에는 입자농도가 커서 영향을 미치게 된다. 즉 입자가 가속을 받는 초기에는 입자질도가 커서 C_D 가 커지지만 가속됨에 따라 단일입자의 값과 근사해진다.

건조관내에서 입자가 차지하는 용적의 분율을 용적율이라 하면, 입자의 공급속도가 W (kg/sec) 일 때 용적율 κ 는

$$\kappa = \left(\frac{W}{\rho_p} \right) \left(\frac{1}{(\pi/4)D^2 V_s} \right) \quad (9)$$

로 나타난다. 이 값을 보조변수로 하여 Re 수와 C_D 의 관계를 나타내면 Fig. 8과 같이 된다.⁹⁾

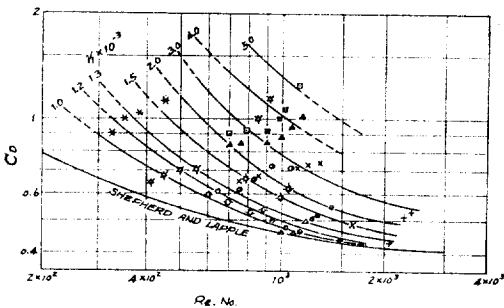


Fig. 8 Relation between Re and C_D with the parameter of κ

기류진조기에서 열풍의 속도는 입자의 종말속도보다 약 2.5~3m/sec 크게 하는 것이 보통이고, 따라서 관내유속이 10~30m/sec 범위내에 들어가는 것이 일반적인 경험치이다.

8-4 체류시간 및 건조관의 높이

건조관내에서 입자와 열풍간에 열 및 물질전달이 일어날 수 있는 충분한 시간이 주어지야 하는데 이는 열 및 물질전달이 동시에 일어나므로 물질수지 및 열수지를 취하여 연립으로 풀어야 한다.

물 질 수 지

시간 $d\theta$ 동안에 고상의 수분이 dM 증발하고 기상의 습도가 dH 증가한다고하면, (고체의 [수분감량])=(기체의 습도증가량)=(물질이동량)의 관계가 성립되어야 한다.

$$-WdM = GdH = WKA_s(P^* - P_g)d\theta \quad (10)$$

$$\frac{dM}{d\theta} = -KA_s(P^* - P_g) \quad (11)$$

$$dH = -\frac{W}{G}dM \quad (12)$$

⑫식을 적분하면

$$H_2 = H_1 + \frac{W}{G}(M_1 - M_2) \quad (13)$$

또한

$$H = \frac{P_g}{P_T - P_g} \times \frac{18}{29} \text{에서}$$

$$P_g = \frac{H}{0.62 + H} \cdot P_T \quad (14)$$

기상의 열수지

(기상의 현열감소량)=(고상으로부터의 전열량)+(증발된 수분의 현열증가량)

$$-G(C_s + HC_v)dT = WhA_s(T - T')d\theta + GdHC_v(T - T') \quad (15)$$

⑩식의 관계를 대입하여 정리하면

$$\frac{dT}{d\theta} = -\frac{W}{G} \cdot \frac{1}{C_s + HC_v} \{ hA_s + C_v KA_s(P^* - P_g) \} (T - T') \quad (16)$$

고상의 열수지

(공기로부터의 전열량)=(현열증가량)+(증발잠열)+(결정열)

$$WhA_s(T - T')d\theta = W(C_s + MC_w)dT' - WdM(\lambda_v + \lambda_c) \quad (17)$$

정리하면

$$\frac{dT'}{d\theta} = \frac{hA_s(T - T') - (\lambda_v + \lambda_c)KA_s(P^* - P_g)}{C_s + MC_w} \quad (18)$$

주어진 투입조건(열풍의 온도, 습도, 량 및 피건조물의 투입량, 온도, 수분함량)에 대하여 식⑪, ⑫, ⑬의 3원 1계 비선형 연립미분방정식을 식⑬, ⑭와 실험에 의하여 구하여 진 (KA_u) 및 (hA_u) 와 더불어 해석하면 건조시간 경과에 따르는 모든 현상을 알 수 있으므로 요구되는 제품건조에 필요한 건조시간을 구할 수 있다. 일반적으로 (KA_u) 및 (hA_u) 는 온도 및 수분함량의 관계식으로 주어진다. 만일 공기와 제품의 출구온도가 가정치와 비교하여 부적당하다면 풍량을 재조정하여 다시 계산하여야 한다.

건조관의 길이는 건조시간에 공기유속을 곱하여 정하기도 하나, 실제로 건조시간은 피건조물의 통과시간이며, 피건조물은 가속되기까지 일정한 시간이 걸리며 공기의 유속도 온도와 습도의 변화에 따라 변하므로, 건조관의 길이를 좀 더 정확하게 구하기 위하여는 식⑧과 아래의 식⑬의 두개의 미분방정식을 위의 건조계산에 추가하여 5원 1계 비선형 연립미분방정식을 풀어야 한다.

$$-\frac{dL}{d\theta} = V_s \quad (15)$$

이때는 (hA_u) 와 (KA_u) 에 대한 풍속의 영향을 고려할 수 있다.

이 식들을 풀기 위하여 종래에는 식을 차분화(differentiation) 하고 피건조물 습도나³⁾ 건조관 길이²⁾를 여러구간으로 나누어, 온도차나 압력차를 대수평균(log-mean)으로 취하여 단계적으로 계산하였으나 매 단계마다 시행오차법을 사용해야 하므로 이 계산은 매우 번거롭고 많은 시간과 노력이 필요한 것이었다.

그러나 전자계산기를 이용하여 직접 적분하면 매우 정확한 해석이 가능하며 시간과 경비를 줄일 수 있고 각 조건에 대한 영향을 쉽게 알 수 있다.

전자계산기를 사용한 실제 계산방법과 예는 2부에서 언급하기로 한다.

Nomenclature

A_u ; Surface area per unit mass of solid, m^2/kg
 a_u ; Surface area of one particle, m^2
 C_D ; Drag coefficient
 C_g ; Specific heat of drying gas in dry state, $kcal/kg \cdot ^\circ C$
 C_s ; Specific heat of dry solid, $kcal/kg \cdot ^\circ C$
 C_v ; Specific heat of water vapor, $kcal/kg \cdot ^\circ C$
 C_w ; Specific heat of liquid water, $kcal/kg \cdot ^\circ C$

D ; Inside diameter of drying tube, m
 d ; Diameter of a spherical particle, m
 G ; Drying gas mass flow, kg/sec
 g ; Acceleration due to gravity ($=9.8$), m/sec^2
 H ; Absolute humidity, mass water/dry air, kg/kg
 h ; Heat transfer coefficient, $kcal/m^2 \cdot sec \cdot ^\circ C$
 K ; Mass transfer coefficient, $kg/m^2 \cdot sec \cdot mmHg$
 m ; Mass of one particle, kg
 M ; Moisture content, mass water/dry solid, kg/kg
 M_1, M_2 ; Moisture content, inlet and exit, kg/kg
 M_m ; Moisture content, mean, kg/kg
 P_g ; Partial pressure of water vapor in drying gas, $mmHg$
 P_T ; Total pressure of system, $mmHg$
 P^* ; Vapor pressure of moisture solid, $mmHg$
 ΔP_{im} ; Log mean particle pressure driving force, $mmHg$
 Q ; Total heat transferred per kg dry solid, $kcal/kg$
 Q_C ; Heat of crystallization of new solid formed per kg of dry solid, $kcal/kg$
 Q_{C1}, Q_{C2} ; Heat of crystallization of new solid formed at solubilities S_1, S_2 $kcal/kg$
 Q_s ; Sensible heat gained by wet solid per unit mass dry solid, $kcal/kg$
 Q_λ ; Heat to evaporate water per unit mass of dry solid, $kcal/kg$
 R ; Ideal gas constant, $kcal/kg \cdot ^\circ K$
 S_1, S_2 ; Solubilities at temperatures, T_1', T_2' , kg/m^3
 T ; Temperature of drying gas, $^\circ C$
 T' ; Temperature of solid, $^\circ C$
 T^* ; Temperature of system, $^\circ K$
 ΔT_{im} ; Log mean temperature difference, $^\circ C$
 V_g ; Velocity of drying gas, m/sec
 V_s ; Velocity of particle, m/sec
 V_t ; Terminal velocity of particle, m/sec
 W ; Weight of dry solid to dryer per unit time, kg/sec
 θ ; Residence time in drying tube, sec
 θ_h ; Drying time derived from heat transfer, sec
 θ_m ; Drying time derived from mass transfer, sec
 λ_v ; Latent heat of evaporation at stated temperature, $kcal/kg$
 λ_c ; Heat of crystallization, $kcal/kg$
 ρ_g ; Density of gas, kg/m^3
 ρ_p ; Density of solid, kg/m^3

Reference

- 1) C. W. Gordon, *Chem. Eng., Prog.*, **45**, 497(1949)
- 2) 桐榮三良 : 乾燥裝置, 日刊工業新聞社(1972)
- 3) J. H. Perry, : "Chemical Engineer's Hand Book,"
4th ed p 5-60.
- 4) Nonhebel & Moss : "Drying of solids in the chemical Industry," London (1971)
- 5) W. E. Ranz, W. R. Marshall, *J. Chem Eng. Prog.*, **48**, 141, 173(1952)
- 6) R. D. Ingebo, : *Chem Eng. Prog.*, **48**, 403(1952)
- 7) R. L. Johnstone, H F. Pigford J. H. Chapin,
: *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **37**, 95 (1941)
- 8) 白井隆 : "流動層", p. 42 科學技術社 (1958)
- 9) 龜井, 桐榮, 平岡 : "化學工學," **20**, 60 (1956)