

I. 입자 운동

유체는 흐르거나 멈춰있는 기체나 액체이다. 특히 기계적 분리에서는 유체중의 고체입자 또는 액적의 운동이 관여되며, 이와같은 운동에 대해 알 필요가 있다. 기체나 액체 등 유체속에서의 입자운동은 역학적으로 쉽게 설명될 수 있다.

1. 유체내에서의 입자의 운동

어떤 유체내에서 입자는 외부에 의한 힘에 의해서 움직인다. 즉 외력이 있어야만 하고, 이 외력은 여러 가지가 있으나 여기서는 밀도 차이에 의한 중력과 원심력만을 외력으로 간주하여 설명하며, 아래에 작용하는 힘에 대해 나타내었다.

표 1-1. 유체 속에서 운동하는 입자에 영향을 미치는 힘의 종류

힘의 종류	특징
외력으로서의 중력 또는 원심력	
입자의 부피에 해당하는 유체의 질량에 의한 부력(buoyant force)	부력은 외력과 평행이지만 반대방향으로 작용한다.
유체와 입자 사이의 상대운동이 있는 경우에 항상 나타나는 저항력	저항력도 외력과 평행으로 작용하지만 작용방향은 입자의 운동방향과 반대이며 입자의 운동을 방해한다.

입자의 운동방향은 유체와 항상 같지 않으며, 외력과 부력의 작용방향에 항상 평행하지 않는 경우가 있고, 이럴 때는 어떤 각도를 이루면서 작용한다. 이러한 경우를 2차원 입자운동이라고 부르고, 입자운동은 저항력을 2차원의 분력으로 나누어서 표시한다. 여기에서는 모든 힘의 방향이 평행한 경우, 즉 1차원흐름에 대해 알아본다.

1) 1차원 운동식

보통 입자의 운동방향이 입자에 작용하는 힘의 방향과 평행한 1차원의 경우에서 질량 m 인 한 개의 입자에 작용하는 모든힘의 합은 다음과 같다.

$$m \frac{du}{dt} = F_e - F_b - F_D$$

(1-1)

여기서, F_e : 외력

F_b : 입자에 작용하는 부력

F_D : 저항력

du/dt : 입자의 가속도

이며, 외력(F_e)과 부력(F_b), 입자에 작용하는 저항력(F_D)은 각각 다음과 같다.

$$F_e = m a_e \quad (1-2)$$

$$F_b = \frac{m\rho}{\rho_p} a_e \quad (1-3)$$

$$F_D = \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2} \quad (1-4)$$

여기서, a_e = 입자의 가속도

ρ = 유체의 밀도

ρ_p = 입자의 밀도

C_D = 무차원 항력계수

u = 유체와 입자의 상대속도

A_p = 입자의 운동방향에 수직인 평면에서 측정된 입자의 투영면적

위식을 정리하여 (1-1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{du}{dt} = a_e \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m} \quad (1-5)$$

여기서 외력이 중력일 경우와 원운동에 의한 원심력이 작용하는 가속도의 2가지가 있을 수 있다.

외력이 중력일 경우의 입자의 운동식은 a_e 를 중력가속도 g 로 대치하여 정리한다.

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m} \quad (1-6)$$

그리고 중력이 아닌 원심력일 경우, 운동방향이 바뀔수도 있으므로, 중력가속도 a_e 는

$$a_e = r w^2$$

(1-7)

$$\frac{du}{dt} = r w^2 \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m} \quad (1-8)$$

여기서 r = 입자의 진행경로의 반지름

w = 회전각속도[rad/s]

식 (1-8)을 풀어서 입자의 속도나 입자가 움직이는 거리 또는 필요한 시간을 계산하려면 u 를 dr/dt , 즉 du/dt 를 d^2r/dt^2 으로 표시하여 얻는 간단한 미분방정식을 풀어야 한다.

2. 유체내에서의 입자의 침강

1) 종말속도(terminal velocity)

(1) 중력장의 경우

중력가속도 g 는 일정하고, 항력은 속도비례한다. 입자가 중력장에서 침강하여 입자의 가속도 du/dt 는 시간에 따라서 감소하다가 0에 도달하고, 입자는 일정속도에 이르게 된다. 이 속도를 종말침강속도(terminal settling velocity)라고 부른다. 중력침강에서 종말속도 u_t 의 방정식은 $du/dt=0$ 으로 놓을 때 구해진다. 식 (1-6)으로부터

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}} \quad (1-9)$$

u_t : 종말침강속도

(2) 원심력의 경우

입자의 운동에서는 속도가 입자크기에 의존하며, 유체에 상대적 운동을 하고 있으므로 일정하지는 않다. 그러나 du/dt 는 식 (1-8)의 오른쪽 두 항에 비교하면 매우 작아서 무시할 수 있다고 가정하여 전개하면 구할 수 있다.

$$u_t = w \sqrt{\frac{2r(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}} \quad (1-10)$$

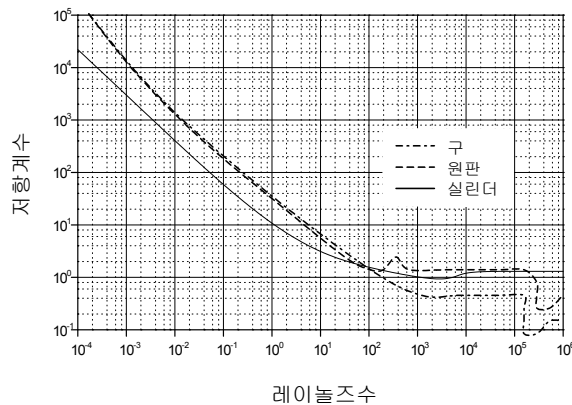
2) 저항계수(drag coefficient)의 결정

C_D 값을 구하여 종말속도와 입도를 위의 주어진 식을 이용하여 알 수 있다.

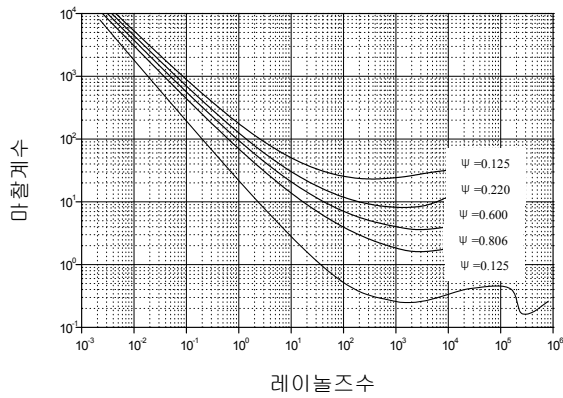
(1) 입자형상의 변화에 따르는 C_D 와 Re_p 의 관계

입자형상의 변화에 따르는 C_D 와 Re_p 의 관계는, 그림 1-1(a)에서와 같이 저항계수를 각각의 입자형상에 따라 Re_p 의 함수로 나타내었고, 별도의 곡선을 각각의 입자형상에 따라 저항계수곡선이 달라지며, 앞절에 설명한 바와 같이 입자가 특정한 방향으로 배향된 것에 관해서만 적용된다.

원판형 입자나 기타의 판모양을 가진 입자의 종말속도는 입자의 배향이 어느 고정된 경우에 계산되는 값보다도 더 작아는데, 유체 속에서 비구형 입자가 자유운동을 할 때, 입자의 배향이 항상 변화하기 때문에 이러한 변화는 운동에너지를 소비하여 입자에 작용하는 실제의 저항력을 증가시키므로, C_D 값은 정지된 입자 주위를 지나가는 유체의 운동이 일어나는 경우보다 더 크기 때문이다.



(a) 구원판 및 원통모양 입자의 저항계수



b) 입자의 형상계수에 따른 저항계수
그림 1-1

▶ 항력곡선이 적용되는 조건

조 건	
입자는 구형고체이다.	
다른입자끼리 충분히 떨어져 있다.	입자끼리 충돌하지 않는다.
벽면으로부터도 충분히 멀리 떨어져 있다.	입자의 운동으로 인하여 입자 주위에 생기는 유체의 흐름형태가 형클어지지 않는다.
유체에 상대적인 종말속도로 입자가 운동한다.	

위의 구형입자에 대한 C_D 와 Re_p 의 곡선부분을 다시 아래 그림 1-2에 나타내었다.

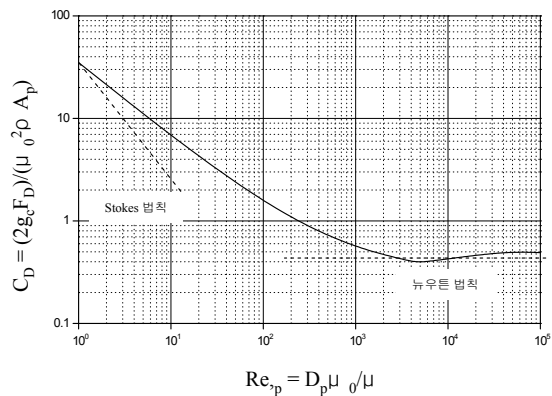


그림 1-2 구형입자의 저항계수

(2) 입자가 가속되고 있는 경우에서의 저항계수

가속되고 있는 경우에서 입자의 저항계수는 그림 1-2에 나타낸 값보다 상당히 커지므로 정지된 유체내에 떨어뜨린 입자가 초기속도 0에서 종말속도에 도달하는 데 걸리는 시간은 위의 정

상상태를 가정한 C_D 값을 이용하여 계산하는 경우보다 더 길어지게 된다. 입자가 빨리 흐르고 있는 유체 속에 떨어뜨릴 때도 정상상태를 가정한 C_D 값보다 작기 때문에 예상되는 것보다는 훨씬 천천히 가속된다. 그러나, 미세한 입자나 액적이 포함되어 있는 대부분의 분리공정에서는 가속되어 종말속도에 이르는 시간이 아주 짧으므로 이과정의 해석에서 무시한다.

(3) 침강의 종류

① 자유침강(free settling)

입자가 유체의 용기벽과 인접 입자로부터 충분히 먼 거리에 있으면 입자의 낙하운동은 용기 벽이나 인접 입자의 흐름형태로부터 영향을 받지 않는 경우를 말한다.

② 간섭침강(hindered settling)

입자가 인접 입자와 실제로 충돌하지 않더라도 입자의 운동이 다른 인접 입자로부터 방해 받는 경우를 말한다. 간섭침강의 저항계수는 자유침강의 저항계수보다 더 크다.

(4) 브라운 운동의 효과

입자가 매우 작으면 브라운운동(Brownian movement)이 나타난다. 이 운동은 입자와 그 주위에 있는 유체의 분자간의 충돌로 인하여 입자에 주어지는 불규칙한 운동(random motion)으로서, 입도가 $2\sim 3\mu m$ 일 때 상당한 영향을 나타내고, 입도가 $0.1\mu m$ 이하일 때는 중력의 영향보다 우세해서 중력침강의 효과가 크게 줄어들고, 중력침강이 일어나지 않는다. 이러한 때는 원심력을 이용함으로써 브라운운동의 효과를 상대적으로 줄일 수가 있다.

3) 구형입자의 운동

중력침강종말속도식은 입자가 지름 D_p 인 구형일 경우, 아래의 식 (1-10)을 식 (1-9)에 대입하여 정리한다.

$$m = \frac{\pi D_p^3 \rho_p}{6}, \quad A_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$$

(1-10)

$$u_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)D_p}{3C_D \rho}} \quad (1-11)$$

D_p : 입자의 지름

일반적인 경우 시행오차법(trial and error method)으로 계산하는데, C_D 의 초기값을 정하기 위하여 종말침강속도는 Re_p 를 먼저 가정한 후 u_t 를 계산하고, 그 u_t 로 Re_p 를 계산한다. 그러나 Re_p 가 매우 작거나 아주 큰 값일 때는 u_t 를 직접 계산할 수도 있다.

(1) Stokes법칙이 적용되는 범위

낮은 Re_p 에서 C_D , F_D , u_t 는 다음식으로 표시된다.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (1-12)$$

$$F_D = 3\pi \mu u_t D_p$$

(1-13)

$$u_t = \frac{gD_p(\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (1-14)$$

식 (1-14)는 Stokes법칙이라고 알려져 있는데,

- $Re_p < 1.0$ 인 범위의 입자에 적용.
- $Re_p = 1.0$ 에서는 $C_D = 24$ 대신에 $C_D = 26.5$ 가 되고, 종말속도가 저항계수의 제곱근에 관계 (Stokes법칙은 이 범위에서 약 5%의 오차가 생긴).
- g 를 rw^2 으로 원심력 장에 있는 작은 구형입자의 종말속도를 추정하는 목적으로 사용.

(2) Newton의 법칙이 적용되는 범위

$1000 < Re_p < 200,000$ 의 범위에서는 경험에 의하여 저항계수가 거의 일정한 값임이 알려져 있으므로 다음 식을 얻는다.

$$C_D = 0.44 \quad (1-15)$$

$$F_D = 0.055 \pi D_p^2 u_t \rho \quad (1-16)$$

$$u_t = 1.75 \sqrt{\frac{gD_p(\rho_p - \rho)}{\rho}} \quad (1-17)$$

식 (1-17)은 Newton의 법칙

→ 기체나 점도가 낮은 액체내에서 침강하는 제법 큰 입자에 대한 경우에 잘 맞는 식.

3. 침강속도의 단위를 결정하는 방법

- ▶ 입자의 운동이 적용되는 범위
- Stokes법칙이 적용되는 범위
- Newton의 법칙이 적용되는 범위
- 그 사이의 어느 영역

1) 입자의 운동이 적용되는 범위

입자의 운동이 어떠한 법칙에 적용이 되는지 확인하기 위해서는 새로이 적용되는 K 라는 값을 구해 알 수 있다. 식 (1-14)의 u_t 를 $Re_p = D_p u_t \rho$ 에 대입하여 속도항을 소거하면, Stokes법칙이 적용되는 범위에서는 다음과 같다.

$$Re_p = \frac{D_p u_t \rho}{18\mu^2} = \frac{D_p^3 g \rho (\rho_p - \rho)}{18 \mu^2} \quad (1-18)$$

$$K = D_p \left[\frac{g \rho (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (1-19)$$

(1) Stokes법칙이 적용

Re_p 는 1.0보다도 작아야 하므로, 식 (1-18)에서 $Re_p = K^2/18$ 이므로 $Re_p = 1.0$ 이면 $K = 18^{1/3} = 2.6$ 입자의 크기를 알면 K 를 식 (1-19)에서 계산하여 $K < 2.6$ 이면 안심하고 Stokes법칙을 적용하게 된다.

(2) Newton의 법칙이 적용

식 (1-17)의 u_t 를 마찬가지로 방법으로, Re_p 에 대입하면, $Re_p=1.75K^{1.5}$ 이고 $Re_p=1000$ 에서 $K=68.9$ 가 된다. 즉, K 가 68.9보다 크고, 2360보다 작으면 Newton의 법칙이 적용된다.

(3) 그외의 영역

K 가 2360보다 크면 저항계수는 유속이 약간만 변하더라도 갑자기 크게 변한다. 이러한 상황에서는 $2.6 < K < 68.9$ 의 범위와 마찬가지로, 종말속도를 식 (1-11)로 계산해야 하는데, 이때 C_D 를 그림 1-2에서 시행오차법으로 구하여 이용한다.

예제 1-1 (a) 80 ~ 100 mesh의 석회석 ($\rho_p = 2800 \text{ kg/m}^3$)이 30°C의 물에서 낙하할 때의 종말속도를 구하여라. (b) 가속도가 50g인 원심분리기에서는 이 속도가 얼마나 커지겠는가?

여기서, $D_p = 0.147 \text{ mm}$ (100 mesh일 때)

$D_p = 0.175 \text{ mm}$ (80 mesh일 때)

평균지름 : $D_p = 0.161 \text{ mm}$

$\mu = 0.801 \text{ cP}$

$\rho = 62.16 \text{ lb/ft}^3$ 또는 995.7 kg/m^3

풀이

(a) 어떤 범위의 침강영역인지 판별기준 K 를 식 (1-19)를 통해 계산한다.

$$K = 0.161 \times 10^{-3} \left[\frac{9.80665 \times 995.7(2800 - 995.7)}{(0.801 \times 10^{-3})^2} \right] = 4.86$$

이 값은 Stokes법칙의 적용범위보다 조금 크다. $Re_p = 4.4$ 라 가정하면, 그림 1-2에서 $C_D = 7.9$ 이다. 식 (1-11)에서,

$$u_t = \left[\frac{4 \times 9.80665 \times (2800 - 995.7) 0.161 \times 10^{-3}}{3 \times 7.9 \times 995.7} \right]^{1/2} = 0.022 \text{ m/s}$$

(b) 식 (1-19)에서 g 대신에 $a_e = 50g$ 를 사용하면, 가속도만 변화하므로 $K = 4.86 \times 50^{1/3} = 17.90$ 이다. 이것도 역시 중간 침강영역이다. $Re_p = 80$ 이라 가정하면, 그림 1-2에서 $C_D = 1.2$ 이다. 따라서,

$$u_t = \left[\frac{4 \times 9.80665 \times 50(2800 - 995.7) 0.161 \times 10^{-3}}{3 \times 1.2 \times 995.7} \right]^{1/2} = 0.4 \text{ m/s}$$

(4) 다른 간단한 방법

Reynolds수의 모든 범위에서 시행오차계산을 하지 않고도 간단하게 할 수 있다. 식 (1-19)를 무차원 수로서, 다시 쓰면

$$K^3 = \frac{D_p^3 g (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \quad (1-20)$$

K^3 : Galileo수

그런데 $C_D = (F_D/A_p) / (\rho u_0^2/2)$ 이므로 식 (1-5)의 $du/dt=0$ 에서,

$$\frac{C_D}{2} = \frac{2}{3} \frac{g(\rho_p - \rho)D_p}{u_0^2 \rho}$$

(1-21)

식 (1-21)에 $(Re_{0,p})^2$ 을 양변에 곱하면 속도항을 포함하지 않는 무차원 수를 얻는다. 이때 $(Re_{0,p})^2$ 는 종말속도 u_0 를 포함하는 입자의 Reynolds수이다.

$$\left(\frac{C_D}{2}\right)(Re_{0,p})^2 = \frac{2}{3} \frac{g(\rho_p - \rho)D_p^3}{\mu^2} = \frac{2}{3} Ga$$

(1-22)

따라서, 입자의 종말속도는 유체의 성질(밀도, 점도 등)과 입자의 성질(입도와 밀도 등), Ga (Galileo 수)와 미리 작성된 도표(그림 1-3)를 이용하여 구할 수 있다

또, 어떤 종말속도가 이미 정해진 입자의 크기를 계산하는 데도 시행오차법에 의한 계산이 필요한데, 이러한 번잡함도 비슷한 기법으로 쉽게 풀이될 수 있다. 즉,

$$\left(\frac{C_D}{2}\right)(Re_{0,p})^{-1} = \frac{2\mu g}{3 \rho^2 \mu_0^2} (\rho_p - \rho)$$

(1-23)

의 관계를 이용하여 작성된 그래프로부터 $Re_{0,p}$ 를 얻고 D_p 를 계산할 수가 있다.

위에 설명한 방법은 입자의 종말속도가 정해진 분리장치에서 처리할 수 있는 입도를 미리 예측하거나 반대로 주어진 입도를 가진 입자의 종말침강속도를 식 (1-22)와 식 (1-23)의 관계식으로 계산된 표나 그림이 있으면, 쉽게 추산하여 분리장치의 설계자료로 사용할 수 있다.

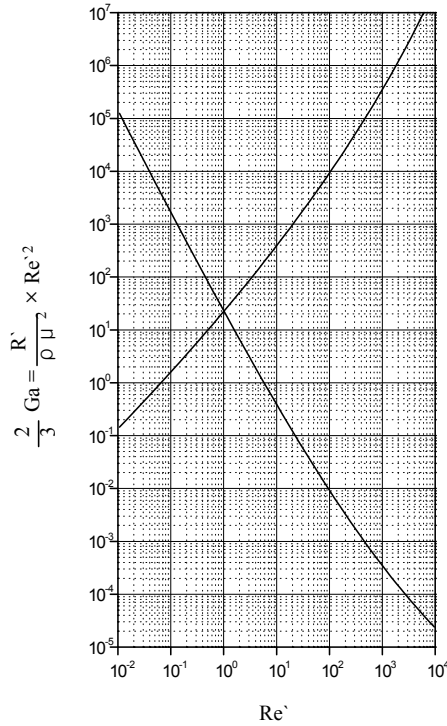


그림 1-3 구형입자의 Galileo 수와 Re_{sp} 의 관계

예제 1-2 20°C의 사염화탄소(CCl_4 , 비중 = 1.594) 중에서 섬아연광(spalerite) 입자(비중 = 4.00)이 중력침강한다. 섬아연광의 입자지름은 0.0045 in (0.011 mm)이고, CCl_4 중의 섬아연광의 부피분율은 0.25이다. 섬아연광의 침강속도를 구하여라.

조건 : 20°C의 사염화탄소의 점도는 1.03cP

풀이

입자와 액체의 비중차는 $4.00 - 1.594 = 2.406$ 이다. 사염화탄소의 밀도는 $62.37 \times 1.594 = 99.42 \text{ lb/ft}^3$ 이고, 밀도차는 $62.37 \times 2.406 = 150.06$ 이다. 식 (1-19)에 의해 K 는 다음과 같다.

$$K = \frac{0.0045}{12} \left[\frac{32.174 \times 99.42 \times 150.06}{(1.03 \times 6.72 \times 10^{-4})^2} \right]^{1/3} = 3.76$$

침강은 거의 Stokes법칙 영역에 있으며, 섬아연광 입자의 자유침강 종말속도는 식 (1-14)에 의해서 다음과 같다.

$$u_t = \frac{32.174 \times (0.00045/12)^2 \times 150.06}{18 \times 1.03 \times 6.72 \times 10^{-4}} = 0.054 \text{ ft/s}$$

6. 간섭침강

1) 간섭침강의 특징

- 간섭침강에서는 정상적인 입도-유속-저항 관계가 적용되지 않는다.
- 각 입자의 주위에 생기는 속도구배(velocity gradient)가 부근에 존재하는 입자의 영향을 받기 때문
- 간섭침강속도 u_s 는 u_t 보다 작다.
- 침강하고 있는 입자는 아래쪽에 있던 액체를 밀어올리기 때문

2) 간섭침강속도 결정 방법

균일한 농도로 입자가 현탁된 현탁액(suspension)에서는 침강속도 u_s 를 연구된 여러 가지의

경험식(empirical equation)들을 이용하여, 자유침강속도로부터 격리된 단일 입자의 침강속도를 추산할 수 있다.

$Re_p = D_p u_t \rho$	n
0.1	4.6
1.0	4.3
10	3.7
10^2	3.0
10^3	2.5

$$u_s = u_t \cdot \varepsilon^n \quad (1-24)$$

u_s : 침강속도

ε : 현탁액 중에서 유체가 차지하는 부피분율

여기서 지수 n 을 결정짓는 것은 Re_p 이며, 2.5~4.6 사이에서 변한다.

표 1-2 간섭침강속도 결정지수

(1) 매우 작은 입자의 현탁액에서의 침강속도

$\varepsilon=0.9$ 일 때 계산된 $u_s/u_t=0.62$ 이고, $\varepsilon=0.6$ 일 때 $u_s/u_t=0.095$ 로서 간섭침강 때는 단일 입자의 침강속도보다 훨씬 작은 침강속도를 나타낸다.

(2) 큰 입도의 입자로 된 현탁액에서의 침강속도

실험에 의하면 큰 입도의 입자로 된 현탁액의 경우에도 $\varepsilon=0.9$ 일 때 $u_s/u_t=0.77$, $\varepsilon=0.6$ 일 때 $u_s/u_t=0.28$ 로 측정되었다. 그러나 입자가 큰 경우에는 간섭침강의 효과가 미세입자의 경우보다 두드러지지 않는데, 그 이유는 유체입자 경계면에서의 경계면 두께(boundary-layer thickness)가 큰 입자의 경우에 상대적으로 얇기 때문이다. 여하튼 간에 식 (1-24)는 사용할 때 주의를 요한다. 왜냐하면 침강속도가 입자형상에도 영향을 받고 입도분포에도 영향을 받으며, 현탁액의 점도에도 영향을 받기 때문이다. 따라서 침강장치 특히 액상침강장치를 정확하게 설계할 때는 계산에만 의존할 것이 아니라 실험자료가 필요하다.

(3) 대량의 미세분말이 액체에 섞여 있는 현탁액 속에서의 침강속도

대량의 미세분말보다 굵은 입자가 침강할 때, 유체의 밀도와 점도 대신에 현탁액의 밀도와 점도를 계산하여 굵은 입자의 종말침강속도를 계산해야 한다. 이때 사용되는 침강속도 추산식으로는 식 (1-24)가 이용된다. 이 식의 ε 값으로는 큰 입자를 포함하는 전체 현탁액의 유체부피

분율을 쓰지 않고, 미세분말 현탁액의 액체 부피분율로 한다.

(4) 물속에 매우 고운 모래가 들어 있는 현탁액에서의 침강속도

물속에 매우 고운 모래가 들어 있는 현탁액은 무거운 광물에 섞여 있는 석탄을 선별할 때 사용되는데, 이 현탁액의 밀도는 석탄의 밀도보다 약간 큰 값이 되도록 조정함으로써 석탄입자를 현탁액 표면에 떠오르게 하고, 동시에 무거운 광물입자는 바닥에 가라앉도록 할 수 있다. 이러한 선광법을 중액분리법(heavy-medium separation)이라고 하는데, 광석 처리에 많이 쓰인다.

3) 유효점도(effective viscosity) μ_s .

현탁액의 점도는 분산상(dispersed phase)의 존재에 의하여 영향을 받는다. 흐름성이 좋은 분체입자의 현탁액에서는

$$\frac{\mu_s}{\mu} = \frac{1+0.5(1-\epsilon)}{\epsilon^4} \quad (1-25)$$

μ_s : 유효점도

윗식은 현탁액의 액체 부피분율 $\epsilon > 0.6$ 일 때만 적용되고, $\epsilon > 0.9$ 일 때 가장 정확하다.

(1) Einstein식

윗식보다 더 간단하게 현탁액의 점도를 추산하는 식으로는 Einstein의 식도 있다. 즉,

$$\mu_s = \mu(1+2.5C) \quad (1-26)$$

C : 현탁액 속에 들어 있는 입자의 부피농도

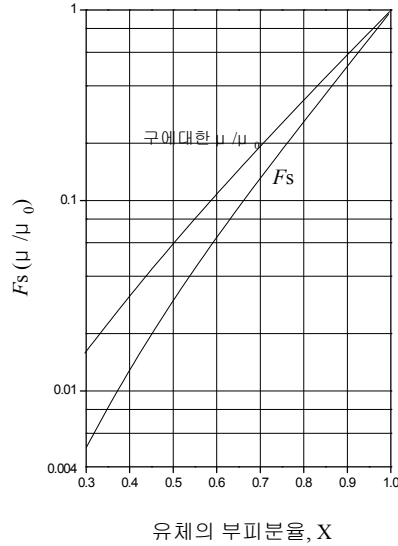
윗식에서 상수 2.5는 구형입자에 사용되는 값이다. 이 식은 보다 묽은 농도 범위에서 사용된다.

그림 1-4는 구형입자의 현탁액의 점도를 추정하는 데 사용되는 편리한 도표이며, 그림에서 F_s 는 간섭침강속도를 식 (1-14)에서 계산할 때 사용할 수 있는 침강계수로서 식 (1-24)의 다른 형태라고 설명할 수 있다.

$$u_s = u_t \cdot F_s \quad (1-27)$$

F_s : 침강계수

그림 1-4 현탁액의 액체부피분율과 점도의 관계



7. 액상의 낙하와 기포의 상승속도

기체연속상내에 액적이 분산된 경우나 액체연속상 내에 기포가 분산되어 있는 계의 유체역학적 현상을 이해하는 것은 화학공업장치의 설계나 운전에 중요하다. 분체의 분리공정에는 대

개 입자가 연속상인 기체나 액체에 분산된 이상유체역학의 원리가 적용된다. 특히 충전탑, 삼상 유동층 등에서는 고체입자와 함께 관여하는 기포나 액적의 유체역학적 이론이 응용된다.

고체입자와는 달리, 기체 속에 분산된 액적이나 액체에 분산된 기포는 연속상 내에서 움직이는 동안에 그 크기와 모양이 달라진다. 형태저항력은 이들 액상이나 기포에 작용하는데 그 형상을 납작하게 만드는 경향이 있는 반면, 표면장력은 이 형태저항에 대항한다. 그러나 크기가 0.5mm이하의 액적이나 기포는 단위부피당 표면에너지가 크기 때문에 거의 구형을 유지하게 되므로 저항계수와 종말속도가 구형고체입자와 꼭 같다. 물론, 기포나 액적의 저항계수는 구형고체입자의 것과 꼭 같지는 않다.

▶ 저항계수가 같지 않은 이유

- 기포나 액적의 표면마찰로 인하여 낙하하는 액적 내부에서 유체의 회전흐름이 생기는 경향이 있기 때문.
- 기체-액체 경계면의 움직임으로 인하여 단단한 구형입자에 비하여 전체 저항력이 작아지기 때문. 그러나, 기체-액체 경계면에 농축되는 경향이 있는 불순물은 경계면의 운동을 저지하기 때문에 저항계수는 순수한 이상혼합계에서 볼 수 있는 저항계수보다 크다.

▶ 크기, 모양에 따른 낙하속도의 비교

- 지름이 1~수mm인 액적은 흐름방향에서 다소 평평해지며 같은 부피의 구형 액적보다 낙하속도가 작다.
- 액적이 좀더 커지면 그 모양은 납작한 타원체가 되거나 편원형(oblate)과 럭비공 모양(prolate)으로 변갈아 형상이 바뀌기도 한다.

저항계수는 Reynolds수에 따라 증가하고 종말속도는 액적의 크기가 증가함에 따라서 최대치가 되었다가 줄어든다.

그림 1-5는 난류흐름의 물속에서 상대적으로 움직이는 공기기포의 실험 결과이다. 이때의 상대속도는 정지한 액체 속에서 움직이는 공기기포의 속도보다 약간 크다고 알려져 있다. 그러나, 물속의 단일공기 기포의 운동에 관한 많은 발표 결과들은 서로 잘 일치하고 있지 않는데, 이유는 아마도 물의 순도, 벽면효과, 측정기술상의 차이 등에 있는 것으로 보인다.

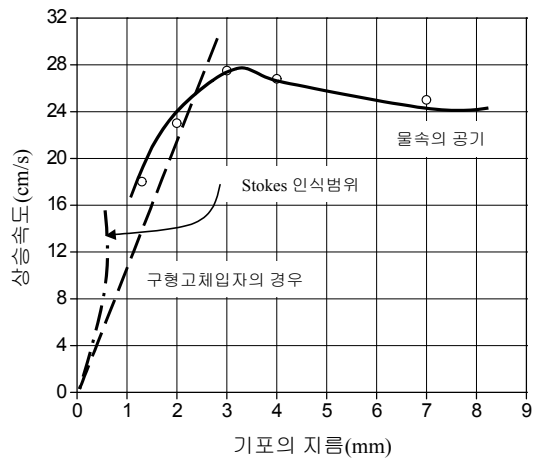


그림 1-5 70°F의 물속에서 상승하는 공기기포의 속도

기포발생장치인 노즐(nozzle)의 중앙부에서 빨리 그리고 연속적으로 생성되는 기포의 흐름은 단일기포보다 상승속도가 빠르는데, 노즐 중앙부의 연속기포가 그 부근의 액체를 상승시키기 때문이다. 이와 비슷한 현상은 전기분해조내에 설치된 수직전극에서 발생하는 기포에서도 관찰된다.

반대로 흡수탑의 기체분산판(gas distributor plate)에서처럼 기포무리가 전체 단면적에서 균일하게 분산되어 발생하는 기포집단의 상승속도는 단일기포의 상승속도보다 작는데, 이는 간섭침강효과 때문이다. 그러나, 어떤 경우에는 소형 흡수탑에서 기포집단의 평균상승속도가 더 크다고 알려져 있다. 이때의 원인은 간헐적으로 기포가 크게 발생하거나, 장치 중심부에 생기는 기체의 슬러그 현상(slugging) 때문인 것 같다.

II. 유체중의 입자운동을 이용한 분리

1. 침강장치의 기초이론

굵은 입자는 침강속도가 크기 때문에 자유침강이나 간섭침강을 이용하여 중력장에서 분급 또는 제거된다. 그러나 입도가 수마이크론 크기의 고운 입자를 액체로부터 분리할 때는 침강속도가 너무 낮기 때문에 높은 침강장치가 필요하게 된다. 따라서 침강처리용량 등이 실제로 분리되는 입자의 크기나 양에 비하여 커지기 때문에, 침강속도를 증가시키는 목적으로 작은 입자들이 큰 입자로 응집(agglomeration 또는 flocculate)되게 하여 침강시킨다. 이러한 장치들을 clarifier 또는 thickener라고 부르는데, 상하수도 처리설비에서와 같이, 침강되는 고형입자량이 액체량보다 훨씬 작을 때 청등조(clarifier)라고 하고, 각종 화학공장에서 슬러리상태의 고체입자를 대량으로 침강분리하는 장치를 농축조(thickener)라고 한다. 이러한 농축조에서 취급하는 입자는 매우 작기 때문에 응집체를 혼입하거나, 기타 액체의 상태를 바꾸는 조치를 취하면 작은 입자들이 엉겨서 큰 입자가 형성되고, 결과적으로 침강속도가 커진다.

1) 응집

콜로이드성 현탁액의 입자들이 덩어리를 만드는 경향은 고체-액체의 분리공정에서 실용적인 중요한 물리적 성질이다. 콜로이드가 덩어리 지는 현상을 응고(coagulation) 또는 응집(flocculation)이라고 부른다. flocculation의 어원은 flock, 즉 떼복숭이라는 말이므로, 콜로이드가 덩어리가 지더라도 구조적으로 영성한 경우를 뜻하고, coagulation은 입자들이 조밀하게 덩어리 지는 경우를 뜻한다. 따라서 후자는 한번 엉어리가 진 것은 잘 부서지지 않고 구성입자의 충전 밀도가 크며, 전자는 쉽게 엉어리가 깨질 수 있고 엉어리가 진 입자의 충전밀도도 작다.

액상에 현탁된 미세입자들은 서로간의 상대적 운동으로 충돌하여 덩어리가 되며 현탁액의 안정성이라 함은 덩어리가지지 않는 성질을 말하는데, 입자들이 충돌할 때 입자상호작용에 의하여 결정되는 성질이다. 입자간의 인력과 반발력은 입자들 사이에 반드시 존재하는데, 입자 주위의 환경조건, 즉 염의 농도 또는 용액의 pH 등에 따라서 반발력과 인력은 다르게 작용한다. 콜로이드입자들 사이에 흔히 생기는 힘에는 van der Waals 힘, 정전기력 및 입자표면에 흡착된 고분자 물질에 의한 힘 등이 있다. 고분자 물질이 흡착되어 있지 않는 경우에는 대개 van der Waals 인력이 덩어리짐(aggregation)에 주로 관여하며, 반대로 콜로이드입자의 안정성은 입자표면에 균등하게 부하되는 전기력에 의한 이중층 사이의 반발작용에 기인한다.

극성을 가지는 액체 속에 현탁되어 있는 대개의 입자는 표면에 전기하전을 띤다. 액속에 있는 반대하전을 띤는 이온은 입자표면으로 끌리고 동일하전을 띤는 이온은 반발하는데, 이때 입자와 액체 사이의 경계면에서는 전기적 이중층(electrical double layer)이 발생한다. 하전된 입자표면으로부터 액상쪽으로 거리가 멀수록 반대하전이온과 동일하전이온의 분포는 균등하게 되어 중화현상이 나타난다.

침강공정에서 중요한 응집현상을 설명하는 데는, 그림 1-6의 Stern 모형의 전기이중층 이론이 적합하다. 이 모형은 이중층을 Stern면(plane)이라 부르는 두 부분으로 나누어 설명하는데, Stern면은 입자표면에서 한 개의 수화이온 반지름에 해당하는 거리에 위치한다. 입자표면으로부터 Stern층 사이에서 포텐셜은 Ψ_0 에서 Ψ_δ 로 변하고, 그보다 더 먼 거리까지는 확산이중층(diffuse double layer)이 형성되고 이 구간내에서 포텐셜은 0까지 감소한다. Stern포텐셜 Ψ_δ 는 전기동력학적 측정에 의하여 결정될 수 있다. 이 측정 방법에는 전기영동법(electrophoresis)이나 흐름포텐셜법(streaming potential)이 사용된다.

전기영동법의 원리는 액체를 고정시키고 입자를 어떤 일정한 전장의 영향하에서 움직이게 할 때, 입자와 함께 움직이는 액체의 얇은 층이 유체역학적 경계면을 형성하여 미끄러지는 면(slipping plane)이 정해지게 되고, 이 면에서의 포텐셜을 제타포텐셜(zeta potential)이라 한다. 대개의 경우는 측정가능한 제타포텐셜을 이론적인 Stern포텐셜로 간주한다. 이러한 제타포텐셜은 액체 속에 현탁된 입자의 응집현상과 원인을 설명하는 이론적인 근거가 된다.

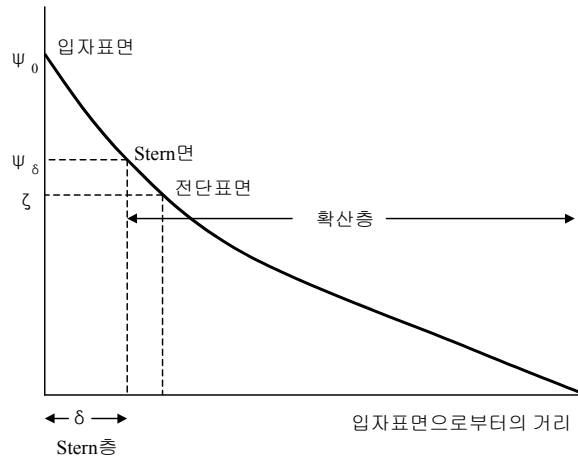


그림 1-6 Stern 모형

침강장치내에 현탁되어 있는 미세입자는 모두 + 또는 - 의 전기적 하전을 띠고 있으므로, 현탁액에 전해질을 가하면 용액 속에 형성되는 이온이 입자표면의 하전을 중화시키게 되고, 표면 하전이 중화된 입자들은 서로 엉겨붙어서 플록(floc)을 형성한다. 원래의 입자가 음으로 하전되어 있을 때는 전해질의 양이온이 플록형성에 유효하고, 반대일 때는 음이온이 적합하다. 어느 경우이나 이온의 원자수가 큰 이온일수록 응집제(flocculation agent 또는 flocculant)의 효과는 높아진다. 응집제로는 계면활성제, 아교(glue), 석탄, 알루미늄, 규산소다, 고분자응집제 등이 쓰인다.

2) 침강현상

응집된 입자는 플록의 복잡한 구조와 복잡한 침강메카니즘의 두가지 침강특성을 가진다. 응집된 전형적 현탁액의 침강현상은 다음과 같이 복잡 미묘하다.

그림 1-7은 현탁액이 메스실린더내에서 침강하는 과정을 시간경과에 따라서 (a)~(e) 순서대로 설명하는데 편리하다.

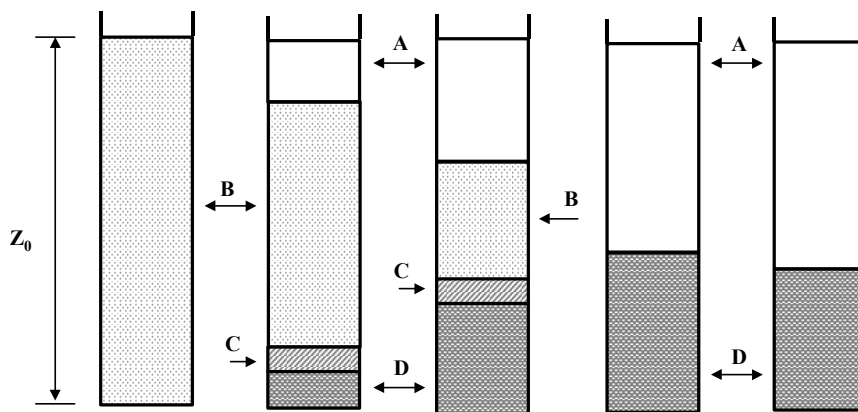


그림 1-14 침강농축과정

(a)는 액체내에 응집물이 균일하게 분산되어서 곧 침강할 현탁액을 표시한다. (b)에서 보는 바와 같이, 응집입자의 하나하나 위에 가볍게 가라앉아 있는 이 고체는 D영역이라고 부르는 어떤 층을 형성한다. D영역 위에 전이영역(transition layer)이라 부르는 C영역이 형성되는데, 이

층을 구성하는 고체의 내용물은 원래의 현탁액 성질에서부터 D영역의 침전물 성질로 차츰 변하는 특성을 나타낸다. C영역 위에 B영역이 존재하는데, 이것은 원래의 현탁액과 같은 농도를 가지는 균일현탁액이다. B영역 상부에 있는 A영역은 입자가 완전히 응집된 경우에는 맑은 액체뿐이고 고체는 없다. 또, 완전한 응집이 일어난 현탁액에서는 A와 B영역의 경계가 매우 뚜렷하게 식별된다.

(c)에서 보면 침강이 진행되는 동안, D와 A영역의 깊이는 증가하고, C영역은 일정하게 유지되며 B영역의 깊이는 감소한다. (d)에서는 침강이 더욱 진행되어 B와 C영역은 사라지고, 모든 고체입자는 D영역에만 존재한다. 침전물의 압축이 처음 분명히 관찰되는 순간을 임계침강점(critical settling point)이라고 한다. 즉 임계침강점은 맑은 액상과 침전물의 두 층만이 관찰되기 시작하는 최초의 시기이다.

마지막에는 고체의 무게가 응집물의 압축력과 기계적 평형에 도달하여 침강과정이 그림 (e)에서처럼 중단된다. 이때 침전물(sludge)은 최종 높이에 도달하는데, (a)~(e)의 모든 과정을 침강(sedimentation)이라고 한다.

3) 침강(sedimentation)속도

침강관의 속에 있는 높이에서 그림 1-8과 같은 미분 두께의 층으로 생각한다. 이 층의 농도는 초기농도에서 시작하여 점차 농도가 진하게 된다. 이 층의 상방에서 입자가 침강하여 들어가고, 하방에서 나오게 되므로 입자가 관류하고 있다.

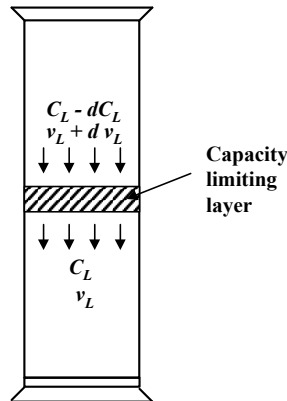


그림 1-8 capacity limiting layer와 material balance

입자의 L층의 고체농도를 일정치 C_L 이라 하고, 이 농도에서의 입자의 침강속도를 v_L 이라 하면, 농도가 얇은 상방에서는 $v_L + dv_L$ 인 침강속도로 농도 $C - dC$ 인 입자가 들어온다. 이 층은 상방에 U 인 속도로 이동하므로, 이것을 고려하면 단위면적에 대한 material balance는 다음 식으로 주어진다.

$$(C_L - dC_L)(v_L + dv_L + U) = C_L(v_L + U) \quad (1-28)$$

변형하여 이차미분항을 생략하면

$$U = C_L \cdot \frac{dv_L}{dC_L} - v_L \quad (1-29)$$

여기서 침강속도 v_L 은 농도만의 함수이며, $v_L=f(c)$ 로 가정하면 $dv_L/dc=f'(c)$ 로 두고,

$$U = C_L \cdot f'(c) - f(c) \quad (1-30)$$

C_L 은 일정하므로 $f(c)$ 와 $f'(c)$ 도 당연히 일정하며, 따라서 U 는 일정하다.

mess cylinder의 단면적 S , 초기농도 C_0 , slurry의 초기높이 z_0 라 하면, 입자의 전체질량은 $C_0 z_0 S$ 이다. L 층은 저부에서 상방으로 이동하고, 최후에 청등계면까지 도달하는 것이므로, 그 사이에 cylinder 속에 있는 모든 고체가 이 층에 관류한다. 농도 C_L 인 L 층이 청등계면까지 도달하는데 요하는 시간을 θ_L 이라 하면 이 층을 관류하는 입자의 전체질량은 $C_L S Q_L (v_L + U)$ 이며, 이것은 $C_0 z_0 S$ 와 같다. 즉

$$C_L S Q_L (v_L + U) = C_0 z_0 S \quad (1-31)$$

θ_L 일 때의 계면의 높이를 z_L 이라 하면 $U=z_L/\theta_L$ 이며, 이것을 위 식에 넣어 다음 식을 얻는다.

$$C_L = \frac{C_0 z_0}{z_L + v_L \theta_L} \quad (1-32)$$

이는 시간 θ 에서의 회분침강곡선의 접선의 구배는 청등계면의 침하속도를 표시하지만, 이 침하속도는 청등계면에 존재하는 입자군의 침강속도, 다시 말하면 그 시간에 청등계면까지 도달한 L 층 입자의 침강속도를 표시하고 있다. 따라서 그림 (1-9)에서

$$v_L = \frac{z_i - z_L}{\theta_L} \quad (1-33)$$

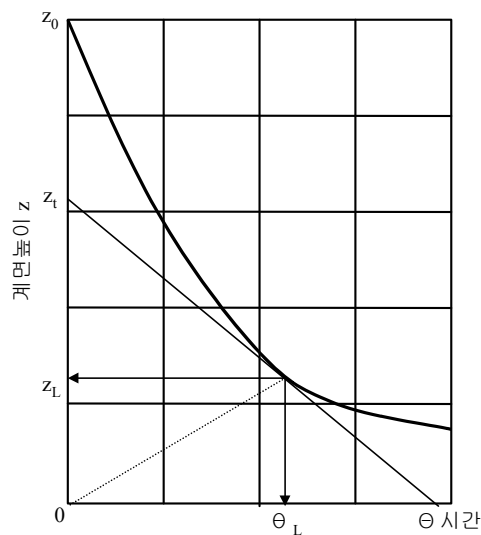


그림 1-9 회분침강곡선에서 v_L 을 구하는 방법

이것을 식 (1-32)에 넣어

$$C_L = \frac{C_0 Z_0}{Z_i}$$

(1-34)

를 얻는다.

2. 중력침강

기계적 분리의 여러 가지 방법은 유체내의 고체 입자나 액적의 유체역학적 원리에 근거를 둔 것이 많다. 유체는 기체나 액체로서 정상상태에 있거나 일정한 유속으로 장치내에서 흐른다. 유체역학적 분리공정의 예는 매우 많은데, 유체내에 섞여 있는 불순물 또는 오염물질을 제거하는 목적으로 유체의 흐름에 섞여 있는 입자를 제거하기도 하고, 입자를 일부러 현탁시켜서 입도나 밀도가 다른 분급물로 입자를 분리하고, 분급된 입자중에서 유용한 입자를 회수하여 다시 사용하기도 한다.

예로서, 공기나 연도가스 중의 먼지나 연기(fume)를 제거하거나 각종 폐액에서 고체를 회수하는 등의 화학공업은 물론, 상하수도 처리, 대기오염 방지의 목적에도 기계적 분리공정은 많이 이용된다.

또 다른 예로서는, 화학공업의 원료나 제품의 정제 목적으로 또는 여러 가지 광물을 분리 정제하는 목적으로 분체의 입도나 밀도가 다른 여러 가지 혼합분체를 유체에 현탁시킨 후, 필요한 입도별로 또는 밀도별로 분리할 수가 있다. 현탁액으로 사용된 유체는 회수하여 재사용하는 경우도 있다.

입자가 침강하기 시작하는 초기 단계의 가속운동기간은 비교적 짧기 때문에 초기가속효과는 입자의 운동범위가 좁을 때 중요하고, 반면에 종말속도는 어떤 장치내에서 입자가 머무는 동안 지속적으로 영향을 미친다. 따라서 식 (1-5)과 식 (1-7)는 가속기간에 적용되고, 식 (1-14)과 식 (1-17)는 종말속도기간에 적용된다.

1) 중력가속도를 이용한 분급기

그림 1-10과 그림 1-11는 입자에 가속운동이 일어나는 짧은 기간에 작은 장치에서 입도별로 분체를 분리하는 지그(jig) 선별기와 테이블(table) 선별기의 개략도이다. 이 두 장치는 모두 입자의 가속도 침강을 이용한 장치인데, 그 원리는 실험용 망체에 크기와 밀도가 다른 분체를 1cm 두께로 깔고 물속에 담가서 아래 위로 또는 옆으로 흔들면 굵은 입자와 밀도가 큰 입자는 아래쪽에 층을 이루고, 고운 입자와 밀도가 작은 입자는 위층에 모이는 현상을 이용한 것이다.

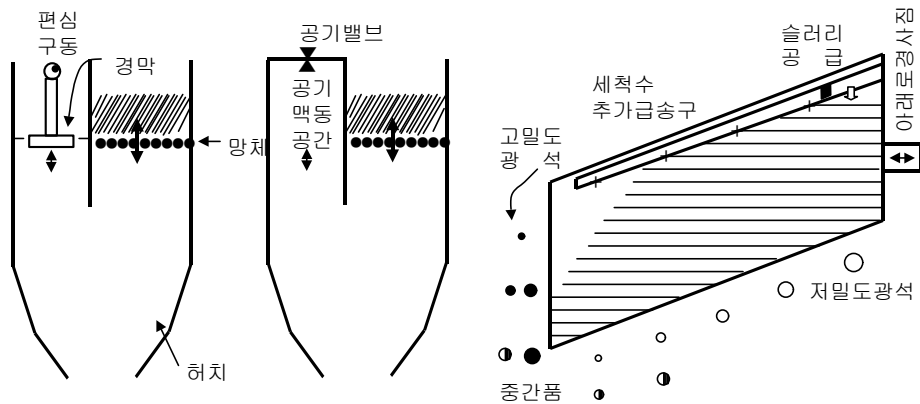


그림 1-10 지그(jig)선별기의 기본형의 개요 그림 1-11 요동테이블을 이용한 분급기의 개요

지그(jig)의 구조는 간단하게 허치(hutch)라고 부르는 탱크로 구성되어 있고, 벽쪽에 탱크의 상부가 분리되어 있다. 한쪽에는 망체가 설치되어 있고, 다른 쪽에는 액체의 맥동(pulse)장치가 설치되어 있다. 그림 1-11의 Harz식(a)은 가장 오래된 장치구조이고, Baum식(b)은 공기를 이용한 맥동발생장치로서 널리 쓰인다.

그림 1-11의 요동테이블(shaking table)은 개발된지 오래인 장치로서 광물의 유효성분을 농축하는데 중요하게 쓰인다.

이 장치는 지그에서보다 고운 입자를 처리할 수 있으나, 용량은 대개 작다. 원료현탁액은 테이블의 위쪽에서 분산 공급되고 흐르는 세척수와 테이블의 요동에 의하여 판위를 흘러내리는 동안에 큰입자와 작은 입자, 그리고 밀도가 큰 물질과 작은 물질이 분리된다. 판은 보통 0~6° 정도 기울어져 있고, 판은 매우 매끄러운 재료로 제작된다. 판위에 여러 가지 모양의 골(riffle)을 배열해서 분리효율을 높일 수 있다. 판의 모양은 직사각형도 있으나, 그림 1-11와 같이 평행 사변형을 쓰면 밀도차 분리 효율이 증가한다.

이 장치 이외에 차례로 설명하는 분급장치는 모두 종말침강속도를 이용하는 분리장치들이다.

2) 중력침강조

현탁유체보다 무거운 입자는 기체나 액체가 들어 있는 큰 통이나 탱크내에서 분리가 가능하다. 다만 장치내에서 유체의 속도는 낮아야 하고, 입자는 침강에 필요한 충분한 시간 동안 장치 내에 체류해야 한다.

그림 1-12의 구조가 매우 간단한 중력침강조는 분리가 완전하지 못하며, 침강된 입자를 침강조 바닥에서 주기적으로 긁어 모으는 등의 노동력이 많이 필요하기 때문에 용도가 상당히 제한되어 있다. 그러나 유체 속에 현탁된 입자가 너무 작아서 여과방법으로 분리하기가 어렵거나, 처리량이 많을 때는 입자의 종류나 크기에 따라서 달라지는 침강속도를 이용한 중력침강조(gravity settler)가 꼭 쓰인다.

그림 1-12처럼 천천히 수평으로 흘러 들어오는 현탁액 중에 있는 크고 작은 입자는 침강장치 내에서 수평방향 속도가 크게 감소하기 때문에 이론에 해당하는 종말속도로 침강하게 된다. 특히 큰 입자는 종말속도가 커서 빨리 떨어질 것이므로 입구쪽에 모이고, 작은 입자는 반대로 출구쪽 바닥에 모이게 된다. 물론 이러한 설명은 너무 간단하므로 실제의 중력침강조를 이용하는 데는 자세한 이론의 검토가 필요하다. 예를 들면 입자의 이차원 운동방정식 등이 고려되어야 하고, 유체의 유속도 장치내의 각 부분에서 균일하지 않으므로 생기는 문제와 침전된 분체를 제거하는 문제 등이 고려되어야 한다. 또 분리된 분체의 입도별 분리성능도 양호하지 않기 때문에, 입도분리라는 용어보다는 분급(classification)이라는, 보다 모호한 용어가 사용된다.

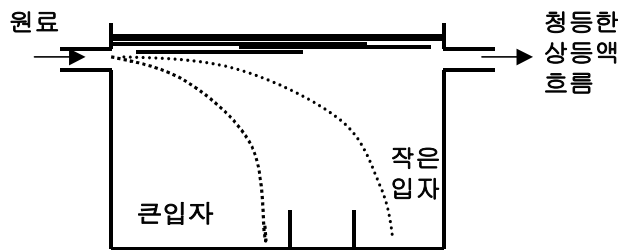


그림 1-8 단순한 중력침강조

소형의 중력침강설비로서 비록 오래는 되었지만 대표적인 장치는 Spitzkasten이라고 부르는 크기가 다른 원뿔형 장치 몇 개가 직렬로 배열된 구조의 것이 있다. 작은 장치에는 큰 입자가 침강하고, 열의 끝에 놓이는 큰 장치에는 입자가 침강한다. 이 장치는 오늘날 많이 사용하지 않

는데, 그 대신에 설치공간에 작은 원뿔분급기(cone classifier)가 많이 쓰인다.

그림 1-39에는 원뿔분급기의 한 예를 나타내었다. 크기가 다른 두 개의 원뿔을 꼭지가 아래로 포개져 놓이게 배열하고, 바깥 원뿔의 위쪽에 액체의 배출구가 마련되어 있다. 원료 현탁액(pulp)은 내부 원뿔에 공급되는데, 큰 입자는 아래쪽에 침강되어 주기적으로 또는 연속적으로 제거되고 고운 입자는 액체 배출구로 나간다. 이중 원뿔의 벽면간격을 조절하면 상층액의 유속이 조절되므로, 분리되는 입도를 조절할 수는 있으나 분리효율은 양호한 편이 못된다.

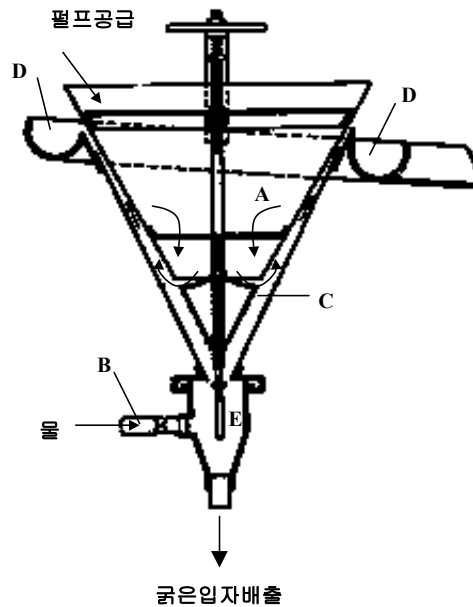


그림 1-9 이중원뿔식 분급기

중력침강조는 액상현탁액을 많이 취급하는 장치이지만, 입도가 약 200mesh 정도되는 카본 블랙(carbon black) 등의 분체를 생산하는 경우를 포함하여, 연소가스 중에 현탁된 대량의 고체입자를 분리 수거하는 데도 많이 쓰인다. 이러한 분진침강장치는 침강효율을 높이도록, 그리고 집진된 입자를 쉽게 배출할 수 있도록 하기 위해서 내부구조의 변경을 시도하는 경우도 있다. 침전된 입자가 기류에 다시 날리지 않도록 유속을 조절하는 것이 중요한데, 장치내에서의 공기 유속은 보통 3m/s이하를 유지한다.

3) 중력분급기(gravity classifier)

화학공정에 쓰이는 대부분의 분급기는 입도를 기준으로 입자를 분리하는 장치이다. 이러한 경우는 큰 입자나 작은 입자나 모두 동일한 밀도를 가지기 때문에 물질을 단순히 입도별로 분리하는 경우이다.

기계적 분리장치에서 취급되는 비교적 굵은 입자들을 편의상 모래(sand)라고 부르고, 고운 입자의 현탁액 또는 슬러리(slurry)는 슬라임(slime)이라고 불러서 구별하여 사용한다. 충분한 시간이 지나면 분급장치의 바닥에 모래가 가라앉고 슬라임은 배출액에 섞여서 분급장치를 나간다.

전형적인 기계적 분급장치의 예는 그림 1-14라고 할 수 있으며, 이 장치에서 침강조는 약 12°정도 경사진 반원통형 통(trough)인데, 낮은쪽 끝에서 액체가 범람한다. 원료슬러리는 반원통형 통의 중간 적당한 곳에서 연속적으로 공급되며, 슬러리의 유속과 농도는 슬라임의 고운 입자가 침강하지 않고 배출액과 함께 넘쳐 흘러나갈 정도가 되도록 조절된다. 반면에 큰 입자들은 반원통형 통 바닥에 가라앉아서 나선형 컨베이어에 의하여 반원통형 통 위쪽으로 운반 제거

된다.

이와같은 분급기는 정확한 분리가 필요없는 굵은 입자의 분리에 적합하지만, 완전한 분리가 요구되지 않는 경우에도 많이 쓰인다. 이 장치는 8~20mesh의 분쇄물을 생산하는 습식 볼밀(ball mill)이나 룯드밀(rod mill)에 많이 쓰이고, 처리능력도 크다. 침강된 굵은 입자는 분쇄기로 직접 이송되므로 부수적인 컨베어나 엘리베이터가 필요없다. 미분말의 분리목적에는 이 장치가 적당하지 못하므로 다른 미분분급기를 사용해야 하는데, 개량형 침강탱크와 원심침강분리기가 이러한 용도에 적합하다.

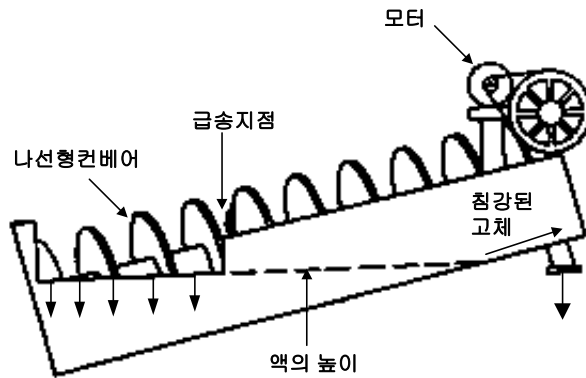


그림 1-14 습식 교차흐름 침강분급기

4. 분별분급기

분별분급기(sorting classifier)는 밀도가 다른 입자를 분리하는 장치들로서 광물의 분리정제 공정에 많이 쓰인다. 이 장치는 침강-부유법(sink-and-float method)과 미분침강법(differential settling method) 두가지 원리 중의 한 가지 방법을 이용한다.

1) 부침법(sink-and-float method)

이 방법은 분별매체(sorting medium)로서 액체를 사용하는데, 이 매체의 밀도는 분별될 구성 성분입자 중 무거운 물질의 밀도와 가벼운 물질의 밀도의 중간 정도 되는 값으로 한다. 무거운 입자는 분별매체에서 침강하고, 가벼운 입자는 매체 위에 떠오르도록 해서 분리가 일어난다. 원칙적으로 이 방법은 두 물질의 밀도 차이만을 이용해서 분리하고 입도는 분리에 영향을 주지 않는 장점이 있다. 따라서 이 방법을 중액분리법(heavy-fluid separation)이라고도 한다.

중액분리법은 보통 10mesh 이상의 비교적 굵은 입자를 처리하는데 사용된다. 이 방법을 사용함에 있어서 첫째 문제는 비중이 적당한 액상 매체를 선택하는 일이다. 즉, 가벼운 물질은 뜨고, 무거운 물질은 가라앉기에 적당한 매체를 구해야 하는데, 순수한 액체나 액상혼합물로서 비중이 1.3~3.5 또는 그보다 무거운 액체를 구하기는 어렵다. 또한 이러한 액체는 값이 싸고, 무독성이어야 하고 부식성도 없어야 사용될 수 있다. 가끔 할로젠화탄화수소가 이러한 목적에 쓰이고, CaCl₂용액은 석탄의 세척에 쓰인다.

그러나, 보다 보편적인 분급매체로는 위와 같은 액체가 아니고, 무거운 광물질을 아주 곱게 분쇄하여 물에 현탁시킨 의사액체(pseudo liquid)가 쓰인다. 자철광(magnetite, sp.gr. = 5.17), 페로실리콘(ferrosilicon, sp.gr. = 6.3~7.0) 및 방연광(galena, sp.gr. = 7.15)이 현탁매체용 분말로 쓰인다.

물과 광물질의 혼합비를 조절하면 분별용 현탁액의 밀도를 자유롭게 광범위하게 조절할 수 있으나, 몇 가지 특수한 준비가 꼭 필요하다. 분별될 혼합물을 공급하는 방법, 침강분과 부상분을 제거하는 방법, 분별용 현탁액의 회수문제 등이 보통의 방법과는 다르게 미리 준비되어야

한다. 특히 분별용 현탁매체의 회수문제는 분별되는 물질보다 더 비싼 경우도 있기 때문에 중요하다.

장치내에서는 분별될 입자가 종말속도로 침강하거나 부상하는데, 간섭침강속도가 종말속도로 이용된다. 침강 및 부유는 그림 1-15의 청정탄 및 선광에서 일반적으로 활용된다. 비중차가 0.1 정도면 분리가 가능하다.

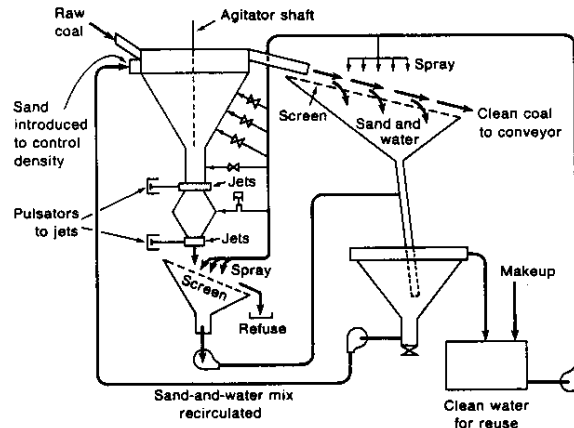


그림 1-15 청정탄의 중매체분리법.

2) 미분침강법(differential settling method)

이 방법은 밀도가 서로 다른 물질의 종말침강속도의 차이를 이용한다. 이용되는 유체의 밀도는 어떠한 두 물질의 밀도보다 작고 보통 물이 쓰인다. 이 방법의 단점은 분리하고자 하는 물질의 혼합물 속에 들어 있는 원료입자의 입도분포가 넓기 때문에, 가볍고 굵은 입자가 무겁고 작은 입자와 같은 속도로 침강하여 혼합물을 얻게 되는 점이다. 즉 미분침강에서는 서로 다른 두 입자가 같은 매체안에서 침강하게 되고, 여기에서 등속침강입자(equal-settling particle)의 개념이 생기게 된다.

원리에 대해 설명하면, A, B 두 가지 물질의 입자가 밀도 ρ 인 유체 속에서 침강한다고 생각한다. 물질 A는 무겁고, 물질 B는 가볍다고 하면, 입도 D_p , 밀도 ρ_p 인 입자의 종말침강속도는 Stokes법칙이 성립하는 범위에서라면 식 (1-14)로 표시된다. 이 식을 물질 A, B에 각각 적용하면

$$u_{tA} = \frac{g D_{pA}^2 (\rho_{pA} - \rho)}{18\mu} \quad (1-35)$$

$$u_{tB} = \frac{g D_{pB}^2 (\rho_{pB} - \rho)}{18\mu}$$

두 물질의 종말속도가 같은 입자의 경우에는 $u_{tA} = u_{tB}$ 이므로

$$\frac{D_{pA}}{D_{pB}} = \sqrt{\frac{\rho_{pB} - \rho}{\rho_{pA} - \rho}} \quad (1-36)$$

한편 Newton의 법칙이 성립하는 범위에서 침강하는 입자들의 경우에는 식 (1-17)에 의하여 다음 식이 성립한다.

$$\frac{D_{pA}}{D_{pB}} = \frac{\rho_{pB} - \rho}{\rho_{pA} - \rho} \quad (1-37)$$

입도분포가 D_{p1} 과 D_{p4} 사이에 있는 A, B 두 물질의 종말속도를 식 (1-27)로 계산하고 그래프를 그리면 그림 1-16이 될 것이다.

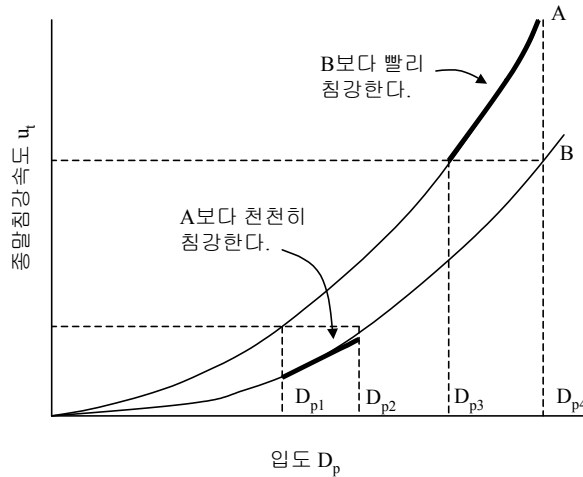


그림 1-16 같은 종말침강속도를 가지는 입자들

이 그림은 성분 A, B에 대해 Stokes 침강의 경우에 있어서 D_p 와 u_t 의 곡선을 나타낸 것이다.

가벼운 B 물질 중에서 입도가 D_{p1} 과 D_{p2} 사이에 있는 입자들은 무거운 물질 A의 어떤 입자보다도 천천히 침강할 것이고, 순수 B 성분을 따로 모을 수가 있으며, 마찬가지로 입도가 D_{p3} 과 D_{p4} 사이에 분포되어 있는 무거운 A 물질의 입자도 B 물질의 어느 입자보다도 빨리 침강하므로, 순수 A 성분을 따로 모을 수가 있다. 그러나 D_{p2} 과 D_{p4} 사이의 가벼운 B 입자와 D_{p1} 과 D_{p3} 사이의 무거운 A 입자는 같은 종말속도로 침강하기 때문에 이 입도범위에 속하는 모든 입자는 혼합물로 얻어질 수 밖에 없다.

종합하여 검토하면, 액체밀도 ρ 가 더 클 때 혼합물의 양이 작아지고, 전체적으로 분리가 개선됨을 알 수 있다. 또한 분리공정에 투입되는 원료입자의 입도분포가 좁으면, 혼합물의 양을 줄일 수 있거나 아주 없앨 수가 있다.

6. 침강장치와 농축조

간접 침강조건 하의 중력분리법을 이용해서, 때로는 미세입자회박 슬러리를 청정화액 또는 농축 부유물로 변환하기도 한다. 이 과정은 침강농축기 또는 청정화기라 부르는 큰 개방탱크에서 수행된다. 농축부유물 또는 슬러지를 여과하여 건조생성물을 만들 수도 있으나, 이 여과과정 비용이 원액 슬러리를 직접 여과하는 것보다 아주 싸야 한다. 청정액은 부유입자가 없거나 거의 없어서 공정수를 재사용하거나 폐수로 배출된다.

1) 농축조(thickener)

공업적으로 침강을 일으켜 고체(sediment)와 액체(overflow liquid)를 분리하는 대규모 장치를 농축조라 한다. 비교적 침강속도가 큰 입자는 회분식침강탱크(batch settling tank)나 연속침강조(continuous settling cone)에서 액체와 분리하는 것이 좋다. 대부분의 농축기는 침강된 슬러

지를 모으기 위한 기계적 교반장치가 설치된 것이 많다.

그림 1-17에 나타난 전형적인 중력식 교반 농축조는 크고 얇은 탱크에 천천히 움직이는 방사형 칼퀴(rake)가 설치되어 있어서, 침전물을 중앙 하부 배출구로 모아 슬러지펌프에 의하여 배출하며, 맑은 상등액을 탱크의 가장자리로 넘쳐 흐르도록 하고 있다. 농축조의 밑바닥은 평평하거나 납작한 원에 흘러들어가서, 원둘레 방향으로 속도가 줄면서 옮겨가는 동안에 고체입자들은 탱크바닥에 침강한다.

칼퀴 팔은 슬러리를 조용히 교반하여 탱크 중앙으로 모이게 하며, 여기서 큰 구멍을 통하여 슬러리 펌프 입구로 간다. 어떤 농축기에서는 칼퀴 팔에 경첩을 달아서, 탱크바닥에 단단한 덩어리와 같은 방해물이 있으면 넘어가도록 한다.

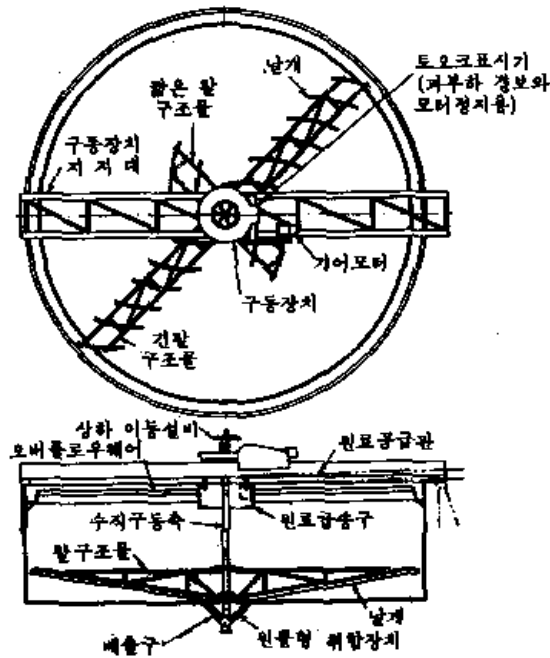


그림 1-17 중력식 교반농축조

Coe와 Clevenger는 침강속도가 고체입자의 농도만의 함수라는 가정하에서 아래의 그림 1-18와 같이 농축조의 개념도인데, 소요면적계산을 하기 위하여 간단한 경우 $C_v=0$, 즉 청등액이 over flow하는 조건을 생각한다. material balance에서

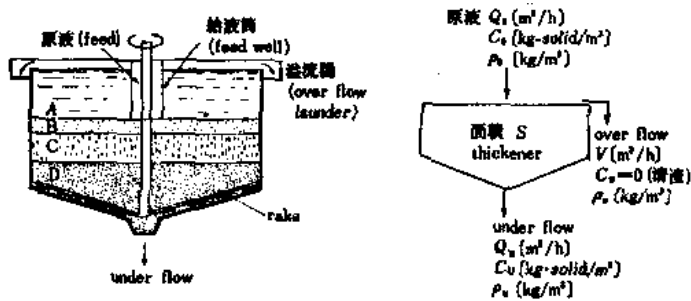


그림 1-18 thickener의 개념도

고체에 대하여 $Q_0 C_0 = Q_u C_u$

액체에 대하여 $Q_0(\rho_0 - C_0) = V\rho_v + Q_u(\rho_u - C_u)$

Q_u 를 소거하여

$$V = Q_0 C_0 \left[\frac{\rho_0}{C_0} - \frac{\rho_u}{C_u} \right] \cdot \frac{1}{\rho_v}$$

(1-38)

양변을 단면적 S 로 나누면

$$\frac{V}{S} = \frac{Q_0 C_0}{S} \cdot \left[\frac{\rho_0}{C_0} - \frac{\rho_u}{C_u} \right] \cdot \frac{1}{\rho_v}$$

(1-39)

여기서 현탁고체입자밀도 ρ_p , 액체의 밀도 ρ 로 하면

$$\rho_0 = \left(1 - \frac{C_0}{\rho_p} \right) \rho + C_0, \quad \rho_u = \left(1 - \frac{C_u}{\rho_p} \right) \rho + C_u$$

이것을 식 (1-39)에 넣어

$$\frac{V}{S} = \frac{Q_0 C_0}{S} \cdot \left[\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_u} \right] \cdot \frac{\rho}{\rho_v}$$

(1-40)

여기서 청등액이 일류할 때 $\rho_p \approx \rho$ 이다. V/S 는 일류청등액의 상향선속도이므로 청등액이 혼탁하지 않으려면 이것이 입자의 침강속도 v 를 넘지 않을 필요가 있다.

$$\frac{V}{S} \leq v \tag{1-41}$$

식 (1-38)를 그림 1-8의 L층에 대해서도 쓸수 있으며, $Q_0 C_0$ 를 $Q_L C_L$ 를 C_L 로 두고

$$\frac{Q_L C_L}{S} = \frac{v}{\left[\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_u} \right] \cdot \frac{\rho}{\rho_v}} \tag{1-42}$$

전에 다루었던 $v_L=f(c)$ 의 관계를 사용하여, v 와 c 의 몇 개의 값에 대하여 단위면적당의 질량 속도 $Q_L C_L/S$ 을 구하고, 이 값이 최소, 따라서 최대 S 의 곳을 thickener의 소요면적으로 취한다.

좀더 정확한 방법은 Talmage와 Fitch에 의하여 제안된 방법인데, 농축조의 여러 위치에서 해당하는 침강속도-농도곡선을 작성하는 방법이다.

under flow 농도 C_u 와 같은 농도에서의 계면높이 H_u , 초기높이를 H_0 라 하면, 고체량에 주목하면 다음의 관계가 있다.

$$H_0 C_f = H_u C_u \quad (2-43)$$

그래서 $H_u = H_0 C_f / C_u$ 의 높이에 대응하는 시간 Θ_u 를 그림 1-19와 같이 구하면 다음의 관계가 성립한다. 좌변은 under flow의 평균유하속도, 우변은 계면의 평균침하속도이다.

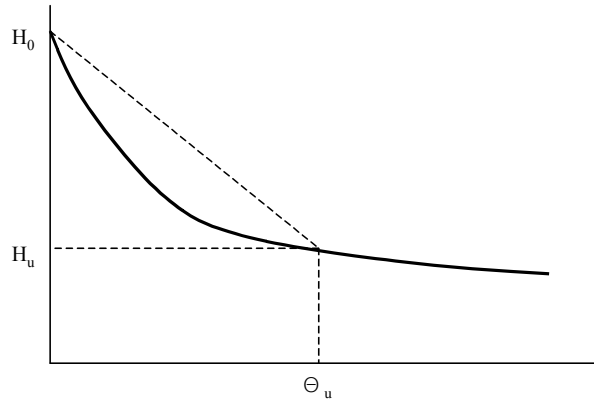


그림 1-19 Talmage, Fitch법

$$Q_u / S = H_u / \Theta_u$$

(1-44)

$H_u = H_0 C_f / C_u$ 와 $C_u Q_u = C_f Q_f$ 를 넣어서

$$S = \frac{Q_u C_u Q_u}{H_0 C_f} = \Theta_u Q_f / H_0$$

(1-45)

연속농축조에서 단위시간당 처리되는 맑은 액체의 부피는 입자침강에 쓰이는 장치단면적에 의하여 결정되나, 액체 깊이에는 별로 상관이 없다. 그러므로 농축조의 단위면적당 처리용량을 높이기 위해서는 다단농축조(multi-tray thickener)가 사용되어야 한다.

다단농축조는 얇은 침강영역을 가지는 농축조가 포개어져서 외관상으로는 원통형 탱크처럼 보이는 장치이다. 그림 1-20은 다단농축조의 예이다. 갈퀴형 교반기는 침전된 퇴적물을 긁어모아 아랫단으로 내려보낸다. 이 장치를 이용하면 향류식 배수세제(countercurrent displacement washing)가 가능하며, 일단식 농축조보다 탱크의 지름을 작게 할 수 있다. 이러한 장치에서 슬러지의 세척효과는 다단추출장치를 이용한 추출농도의 계산법을 이용하여 추정할 수가 있다.

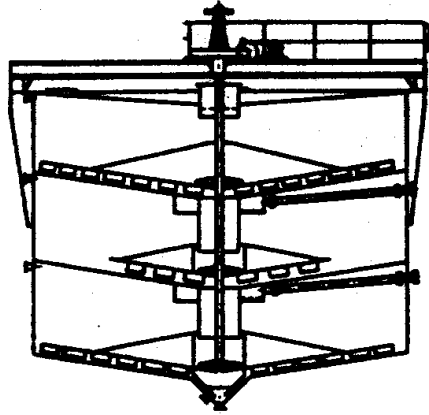


그림 1-20 다단농축조

2) 연속농축조의 특징

슬러지를 하부에서 제거하는 갈퀴(rake)가 설치된 연속농축조에서, 원료펠프(또는 slurry 또는 suspension이라고도 한다)는 장치 중앙부에서 액면 아래 약 1m 위치에서 공급된다. 그림 1-21에서 보는 바와 같이 원료공급 위치의 위쪽은 침등영역으로서 고형입자가 거의 없는 영역이므로, 원료와 함께 공급된 액체의 대부분은 위쪽으로 흘러와서 상등액(overflow)관을 통하여 배출된다. 반면에 고체입자는 공급위치에서 아래쪽으로 침강하며 약간의 물과 함께 장치 밖으로 배출된다.

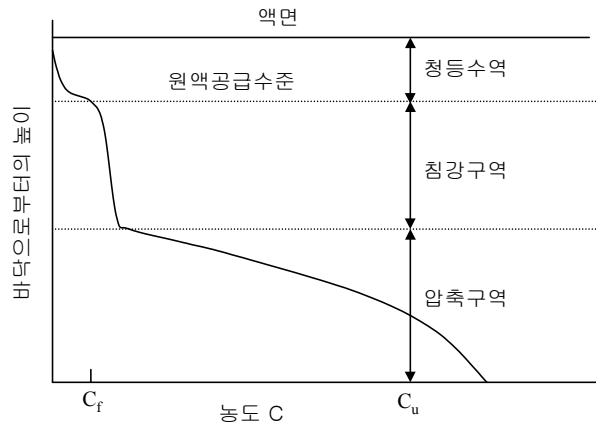
원료공급 위치의 아래쪽 부분을 침강영역(zone settling) 부분이라고 하는데 개개의 응집입자는 서로 느슨하게 접촉하고 있으며, 그 입도에 관계없이 모두 동일한 속도로 아래로 움직인다. 장치의 바닥 부근은 고형물질의 농도가 급격히 증가하여 배출되는 슬러지 농도에 도달하는 압축영역이다. 이 영역은 회분식 농축조의 D영역에 해당하고, 두께는 시간에 따라서 변화하지 않는다. 압축영역인 장치바닥에서 움직이는 갈퀴(rake)는 응집고형물의 구조를 파괴하여 하부로 배출되는 슬러지의 고체농도를 증가시키는데, 이 농도는 회분식 농축조의 D영역의 농도보다 더 크다.

실제로 고체농도는 맑은 영역에서의 액체의 상향속도가 그 영역의 모든 위치에 있는 고형물질의 최저종말속도보다 작을 때, 상층류의 액체는 고형물 입자를 포함하지 않는 맑은 액체상태가 된다. 액체의 속도는 상층류 속도에 비례하고, 만일 상층류 속도가 너무 높으면, 상층류는 입자를 포함하기 때문에 흐려진다. 이러한 현상이 생기는 이유는 농축조에 과부하가 걸린 때문이다.

하층류, 즉 슬러지의 고체농도와 농축 정도는 압축영역에 있는 물질의 체류시간(retention time)에 좌우된다. 즉 압축영역의 깊이에 비례한다. 압축영역의 깊이는 장치를 더 깊게 제작함으로써 증가시킬 수 있는데, 처리물질의 체류시간을 충분히 길게 조절함으로써 도달할 수 있는 최종고체농도보다 약간 낮은 배출물 고체농도에 도달하는 데는 경제적인 제약조건이 수반된다. 즉 농축슬러지의 농도증가와 장치높이는 상반되는 비용효과이므로 최적슬러지농도는 장치설계에서 결정되어야 한다.

그림 1-21
연속농축조내에서
의 고체농도 분포

농축조의 지름은
필요한 액체와 고
체의 유량을 감당
하기에 충분히 커
야 한다. 청등효과
가 중요한 경우에
는, 농축조의 지름
을 청등영역의 수



평단면적으로 결정할 수 있다. 이 수평단면적은 충분히 크므로, 이 영역의 상승액속도가 제거할
가장 작은 고체입자의 침강속도보다는 작아야 한다. 농축조에서, 장치의 단면적 또는 지름은
압축영역이나 침강영역(zone settling)중의 한 곳에서 고체물질의 제한된 유량 G 로 결정된다.
고체물질의 제한된 유량(the limiting flux of solid)이라 함은 주어진 시간에 주어진 장치의 단
면적을 통해서 침강하는 고체의 질량이다.

연속침강조에서 하향하는 고체의 총유량은 두 부분으로 구성되어 있다. 즉 하향하는 액체에
의하여 운반되는 고체의 유량과 액체내에서의 고체의 침강으로 인하여 추가되는 유량이다. 후
자는 침강유량(the settling flux), 전자는 이동유량(the transport flux)이라고 한다.

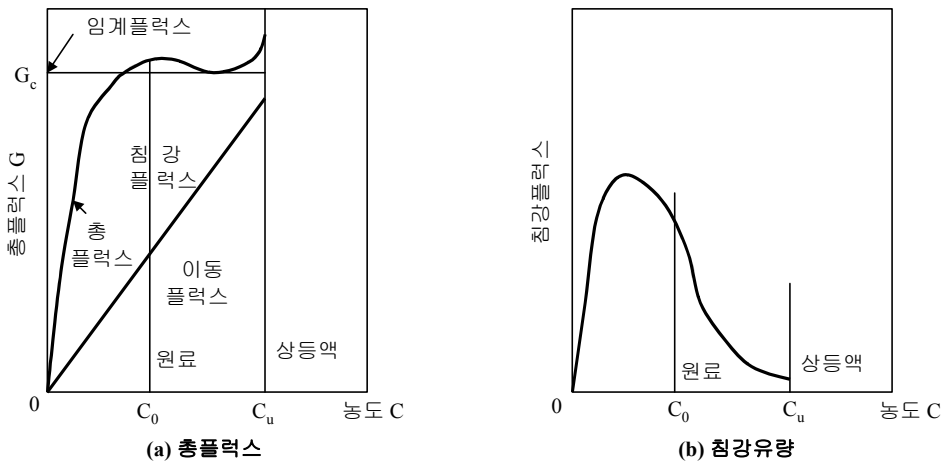


그림 1-22 침강조에서 농도에 따르는 유량변화

그림 1-22(a)에 나타난 것처럼 이동유량은 어떤 주어진 하향유속에서 농도에 직선적으로 증
가한다. 한편, 침강유량은 고체가 포함되어 있지 않는 상등액(overflow)에서는 0이고, 청등영역
에서는 농도와 더불어 급격히 증가하여 농도가 공급액의 것과 같거나 비슷한 영역에서 최대유
량이 되었다가, 농도가 더 증가하고 간섭침강현상이 증가하면 다시 하락한다. 그러므로 전체 유
량은 그림 1-22(a)에 설명된대로 농도가 증가함에 따라서, 최대가 되었다가 다시 유량점을 형성
하면서 변한다. 만일 농축조에서 배출되는 하향류의 농도 C_u 가 이 최저임계유량의 농도보다 더
크다면, 농축조의 어느 위치에서도 이 유량을 초과하지 않을 만큼 농축조의 면적은 충분히 커
야 한다.

연습문제

1. 입도 14.08~68.33[μm]의 입도 분포를 갖는 quartz와 galena의 혼합물을 순성분으로 분리하고자 한다. 비중분리하는 것으로서 액체의 밀도는 얼마로 할 것인가? 단, quartz의 $\rho_p=2,560[\text{kg}/\text{m}^3]$, galena의 $\rho_p=7,500[\text{kg}/\text{m}^3]$ 로 한다.

2. 고체농도 120[g · solid/l · slurry]의 slurry를 10[ton · dry-solid/h]로 처리하여 450[g · solid]의 sludge와 청등수를 만드는 데 필요한 thickener 면적과 깊이를 구하여라. 단, 회분침강 시험결과는 다음 표와 같다.

침강시간[h]	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	∞
계면의 높이 [cm]	100	89	78	67.4	56.8	47.8	40.6	35.2	31.4	28.8	27.4	26.4	25.0

3. 석탄석 세정이수처리용 thickener를 설계하기 위하여 90.5[g · solid/l · slurry]의 slurry에 대하여 회분침강 시험을 하여 다음과 같은 data를 얻었다.

시간[min]	0.87	1.77	2.70	3.65	4.65	5.61	6.61	7.61	8.65	9.65	10.68	10.72	12.82	13.85	14.95	16.07
계면의 높이 [cm]	28.5	27.5	26.5	25.5	24.5	23.5	22.5	21.5	20.5	19.5	18.5	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5
시간[min]	17.1	18.5	19.9	21.7	24.3	26.0	27.9	29.87	32.2	33.4	34.4	35.5	37.1	41.0	48.05	
계면의 높이 [cm]	12.5	11.5	10.5	9.5	8.5	8.0	7.5	7.0	6.5	6.3	6.1	5.9	5.7	5.5	5.3	

7.5[ton · dry-solid/h]를 thickener에 공급하고, 300[g · solid/l · slurry]의 농축 sludge를 만드는 데 필요한 thickener 소요면적을 구하여라.