

# 23. 기계적 분리



단위 조장의 분리기구 또는 조작용리에 의한 분류

① 서로 다른 상간의 물질이동에 의한 분리조작 : 증발, 증류, 흡수, 흡착 등

=> 액체나 기체의 혼합계를 대상

② 기계적인 기구에 의한 분리조작 : 체분류, 여과, 원심분리, 집진 등

=> 고체, 특히 분립체 및 분산계를 대상 => 「기계적 분리」라고 총칭

## 23-1 분리효율

각종 분리조작의 가능성이나 분리장치의 성능 등을 정의

### 23-1-1 종합분리효율

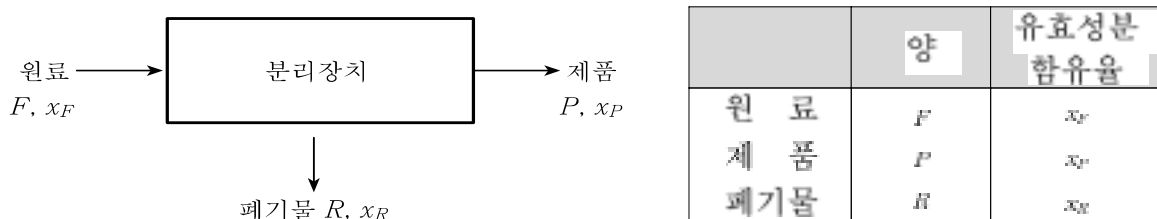


그림 23-1 2성분계의 분리공정

물질수지 :

$$F = P + R \quad (\text{전량의 수지})$$

$$Fx_F = Px_P + Rx_R \quad (\text{유효성분의 수지})$$

원료에 대한 제품의 비율을  $y$ , 유효성분의 비율을  $r$ 이라고 하면

$$y = \frac{P}{F} = \frac{x_F - x_R}{x_P - x_R} \tag{23.1}$$

$$r = \frac{x_P P}{x_F F} = \frac{x_P (x_F - x_R)}{x_F (x_P - x_R)} \tag{23.2}$$

$r$  : 유효성분 회수율 => 값이 클수록(즉,  $r$ 의 값이 1에 가까울수록) 유효성분의 회수율이 좋게 된다. 전혀 분리가 안되는 경우에도  $r=1$ 이므로 이  $r$ 만으로 분리의 좋고 나쁨을 결정할 수는 없음.

제품 중에 혼입된 불요성분의 원료 중의 불요성분에 대한 비율을  $w$ 라고 하면

$$\text{원료 중의 불요성분의 양} = (1-x_F)F$$

$$\text{제품 중의 불요성분의 양} = (1-x_P)P$$

식 (23.1)과 연립시켜

$$w = \frac{(1-x_P)P}{(1-x_F)F} = \frac{(1-x_P)(x_F-x_R)}{(1-x_F)(x_P-x_R)} = \frac{(1-x_P)}{(1-x_F)} y \quad (23.3)$$

$w$  : 불요성분 혼입률이라고 한다.  $w$ 가 0에 가까울수록 좋은 분리  $\Rightarrow w=0$ 으로 하는 것을 실제로는 거의 불가능하므로 결국  $r$ 과  $w$ 를 동시에 고려

$(r-w)$  : 종합분리효율  $\eta$ 이라 하면

$$\eta = r-w = \frac{x_P}{x_F} y - \frac{(1-x_P)}{(1-x_F)} y = \frac{y(x_P-x_F)}{x_F(1-x_F)} \quad (23.4)$$

### 23-1-2 부분회수율

원료를 몇 개의 미소한 입자지름 범위로 나누고

$m_F$  : 각각의 범위에 속하는 부분의 질량

$P_F$  : 회수 또는 분리된 부분의 질량

$(P_F/m_F) \times 10$ 을 부분회수율 [%]

그림 23-2(a) : 여러 가지 입자지름  $D_p$ 에 대해서 플롯

그림 23-2(b) : 어느 입자지름  $D_p$ 에서의 부분회수율이 100%일때 부분회수율 곡선은 수직  $\Rightarrow$  이 곡선이 경사 정도에 의해서 분리의 예민

표시법 : ① 부분회수율 50%에 해당하는 지름, 즉, 50% 입자지름에 해당하는 점에서의 곡선의 경사를 이용.

② 25% 입자지름과 75% 입자지름에 해당하는 곡선상의 두 점을 이은 직선의 경사를 이용.

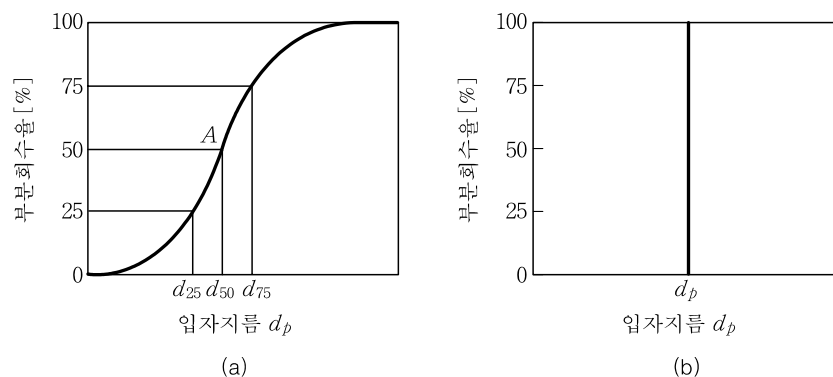


그림 23-2 부분회수율 곡선

## 23-2 체분류(선별)

### 23-2-1 체분류기의 종류

- (1) 막대체
- (2) 회전체
- (3) 동요체
- (4) 진동체

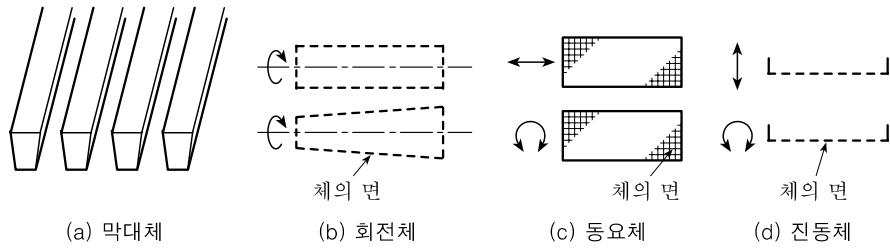


그림 23-3 여러 가지 체

### 23-2-2 체의 종류

#### 【1】 체눈의 모양에 의한 분류

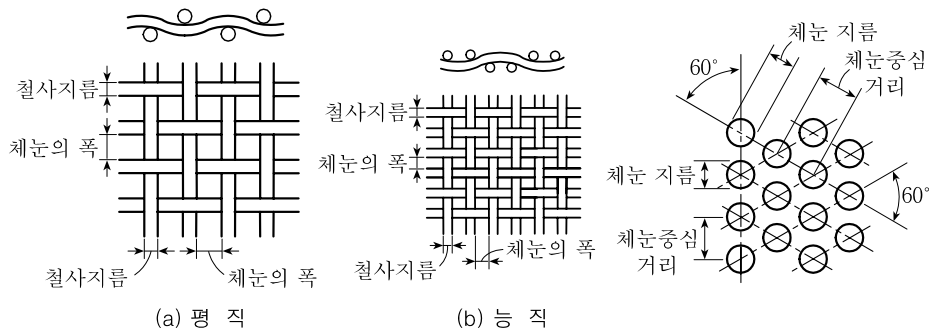


그림 23-4 체눈의 모양

망목체 : 경량이지만 수명이 짧음

다공판체 : 튼튼하지만 비교적 무거워 취급이 힘들.

#### 【2】 재질에 의한 분류

금속체의 강, 철합금, 동합금 등과 합성섬유, 전직 등

### 23-3 분 급

분급 : 유체 중에서의 입자의 침강속도 또는 운동속도의 차이를 이용해서 분립체를 입자지름 또는 밀도가 다른 입자군으로 분리하는 조작

#### 23-3-1 습식분급

##### 【1】 기계적 분급

분립체와 물을 혼합시켜 큰 통 안에 일정 유량으로 공급하고 침강하는 거친 입자는 일정한 간격으로 기계적으로 배출시키는 것과 동시에 물에 현탁한 미립자는 물과 같이 연속적으로 일류시킴. 도르(dorr)분급기(또는 rake 분급기)

##### 【2】 수력분급

원액을 아래 또는 수평으로 흘리고 아래에서 가압된 물을 송입해서 그 수력에 견디고 알맞은 입자군과 물의 흐름과 같이 일류하는 입자군으로 분리. 수력분급기의 예이며, 도토의 정제, 전분의 정제 등에 이용

기계적인 분급 => 거친 입자에 가는 입자가 부착되는 것을 피하기 어려움  
 수력분급 : 부착 방지할 수 있으므로 깨끗한 분리

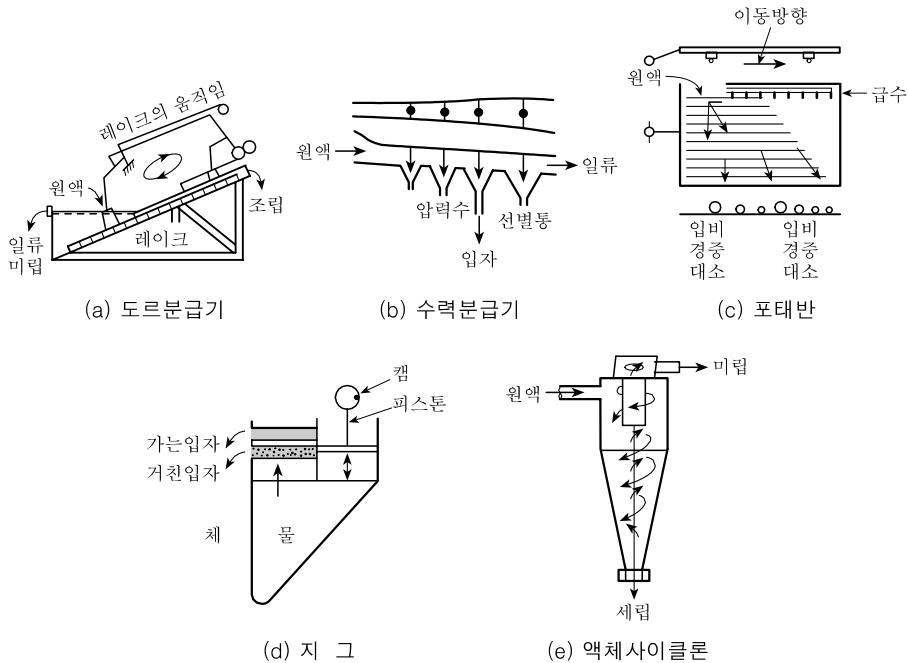


그림 23-5 습식분급기

### 23-3-2 건식분급

건식분급 : 체분류에서는 분류되지 않는 미세한 입자군을 분리하는 경우.

문제점 : 입자가 작을수록 기벽에의 점착이나 입자의 응집 등 분리를 방해하는 현상이 현저하므로 단지 중력이나 부력 등에 의한 분리는 곤란 => 원심력을 이용

#### 【1】 미크론 세퍼레이터 => 회전체형 건식분급

입자군+공기, 아래쪽 송입 => 고속 회전하는 회전자(로터)에 의한 원심력 =>

거친 입자는 장치 벽에 충돌해서 응집되어 아래

미립분은 회전자의 중심부에 흡인되는 공기류에 따라 장치의 위

특징 : 원심력과 중심부로 향하는 공기류의 압력과의 균형에 의해 분리가 이루어지므로 이원적인 조절이 가능하고 분리능력이 큼.

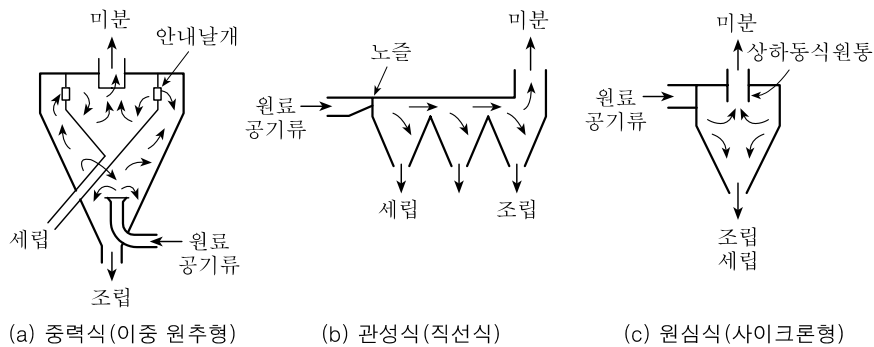


그림 23-6 주요한 건식분급기(역학적 원리별)

#### 【2】 에어 세퍼레이터 그림 23-6(c)

원료는 위쪽의 회전축의 주변에서 공급 => 고속으로 회전하는 분리판에 의한 원심력 => 비교적 거칠고 큰 입자군은 안쪽의 벽면부근에 강한 힘으로 운반되고 응집되어 침강  
미립자군은 위쪽의 날개차의 순환류에 따라 바깥쪽의 통의 벽부근에서 응축, 침강

#### 【3】 기 타

중력, 관성력, 자력 등을 이용하는 방법

### 23-4 여 과

여과(filtration) : 다공성의 물질로 만들어진 격벽을 통해서 현탁액에서 고체 미립자를 분리하는 조작

여재 : 여과에 쓰이는 다공성의 물질을 여재,

케이크(cake) : 여재 위에 퇴적하는 고체물질

여액 : 고체가 분리된 액체

여과조제 : 여과를 하기 쉽게 하기 위해 원래의 혼합물에 혼입하는 물질

### 23-4-1 여과의 종류

#### 【1】 여과에 쓰이는 힘의 종류에 의한 분류

중력여과 : 현탁액에 중력만이 작용하는 경우

압력여과 : 현탁액에 기계적으로 압력을 가하는 경우

진공여과 : 여액층을 감압하는 경우(=감압여과)

여과면에 작용하는 힘의 세기 : 압력여과 > 진공여과 > 중력여과

#### 【2】 외부여과와 내부여과

외부여과 또는 표면여과 : 여과가 주로 여재의 표면에서 되는 경우

내부여과 : 여과가 여재층의 내부에서 되는 경우

#### 【3】 케이크 여과와 침징여과

케이크 여과 : 케이크를 얻는 것이 주목적인 경우 또는 현탁액 중의 고형분이 비교적 많은 경우의 여과

침징여과 : 현탁액 중의 고형분의 양이 비교적 적은 경우 => 응집제나 흡착제 등의 여과조제를 병용

#### 【4】 그 외의 분류

- 정압여과 : 대략 일정한 압력하에서 이루어지는 여과
- 정속여과 : 대략 일정량의 여액을 얻는 여과
- 회분여과 : 회분식의 여과로서 현재 이 방식이 많음.
- 연속여과 : 연속식으로 비교적 거칠고 점착성이 적은 케이크에 대해서 여러 가지 방식이 고안되고 있음.

### 23-4-2 여과에 관한 기초적인 고찰

여과속도  $u$  [ $m^3/s \cdot m^2$ ] :

$$u = \frac{dv}{d\theta} = \frac{g_c \Delta P}{r\mu} \quad (23.5)$$

여기서  $\Delta P$  : 케이크 및 여재를 통한 압력강하 [ $kg/m^2$ ]

$\mu$  : 여액의 점도 [ $kg \cdot m/s$ ]

$g_c$  : 중력환산계수  $9.80665 [kg \cdot m/kg \cdot s^2]$

$r$  : 비례상수 [ $l/m$ ]

$v$  : 단위 여과면적 ( $1m^2$ )을 통과하는 여액량을 [ $m^3/m^2$ ]

$\theta$  : 여과시간 [s]

비례상수  $r$  :

$$r = r_m(\text{여재의 저항}) + r_c(\text{케이크의 저항}) \quad (23.6)$$

$$u = \frac{dv}{d\theta} = \frac{\Delta P g_c}{(r_m + r_c) \mu} \quad (23.7)$$

○  $r_m$ 은 시간에 따라 변화가 없지만  $r_c$ 는 케이크의 증가에 따라 증대하여 결국  $r_m$ 보다도 상당히 크게 됨

케이크 중 고형분의 양을  $W$  [kg], 여과면적을  $A$  [m<sup>2</sup>]라고 하면

$$r_c = \alpha(W/A) [l/m] \quad (23.8)$$

비례상수  $\alpha_c$  [m/kg] : 물질 특유의 상수로서 여과의 비저항

압축성 물질 :  $\alpha$ 가 압력에 따라 변하는 물질

비압축성 물질 :  $\alpha$ 가 압력에 따라 변화하지 않는 물질

### 23-4-3 주요한 여과기

공업적 여과기 : 중력에만 의한 것보다 압력식 또는 진공식이 많음

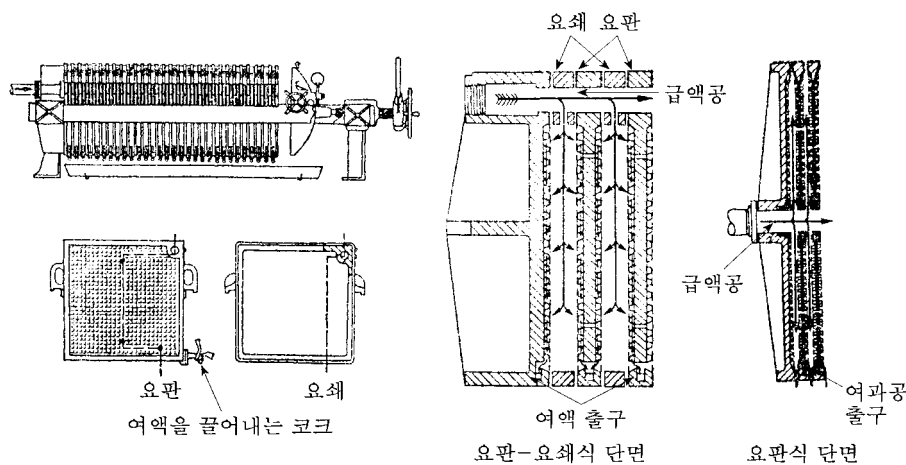


그림 23-7 압여기

【1】 압여기 => 필터 프레스, 그림 23-7

특징 : 구조가 간단하고 용량에 융통성이 있으며, 수명이 길며, 가장 널리 보급

종류 : 요판, 요솜식과 요판식이 있지만, 요판식은 케이크의 양이 비교적 적은 경우에만 사용.

【2】 열상 여과기 => 그림 23-8

특징 : 압여기의 요판, 요솜 대신에 여열과 이것을 다수 수용하는 원통형 용기를 쓴 것으로 여

액의 채취가 주목적인 경우에 많이 사용.

조업방식 :

- o 압여기는 회분식이지만 이 방식은 여과와 수세방향을 반대로 하면 연속적으로 작업
- o 외기와외 차단, 보온이 필요한 경우에도 이 방식이 편리하지만 그 구조상, 특히 고압이 될수록 값이 높아지는 결점

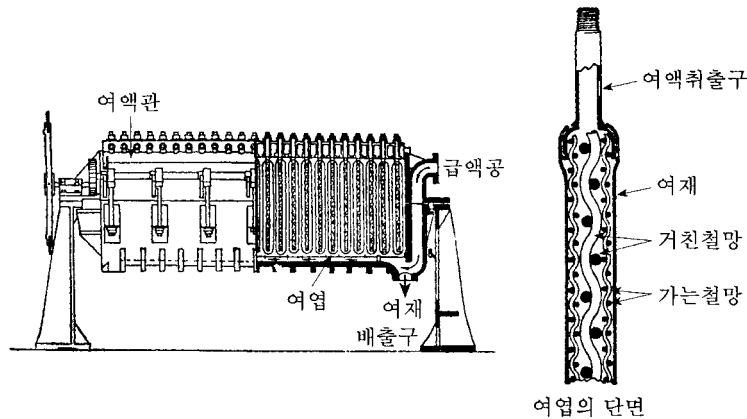


그림 23-8 압상여과기

【3】 회전원통형 진공여과기 => 그림 23-9, 오리버 여과기

특징 :

- o 여과 원통이 1회전하는 사이에 여과, 수세, 건조, 긁어내기 등 연속적 조작
- o 대량처리에 적당하지만 진공식이므로 압력이라는 점에 한계

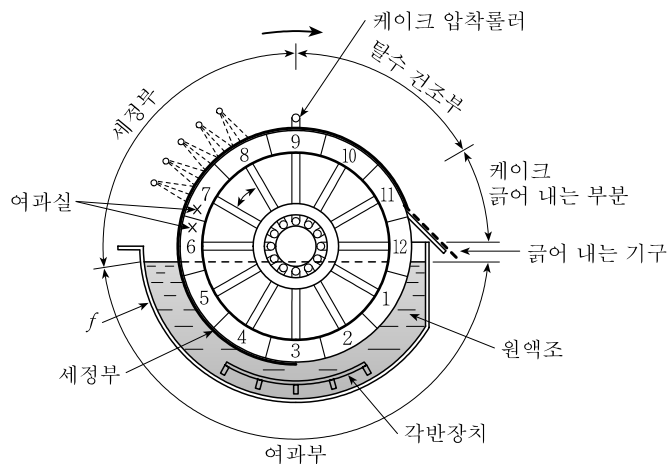


그림 23-9 오리버 여과기

【4】 회전원관식 진공여과기 => 그림 23-10, 미국식 여과기

특징 : 압여기에 대한 염형 여과기와 같이 원통형 여과기의 여과면을 증대.



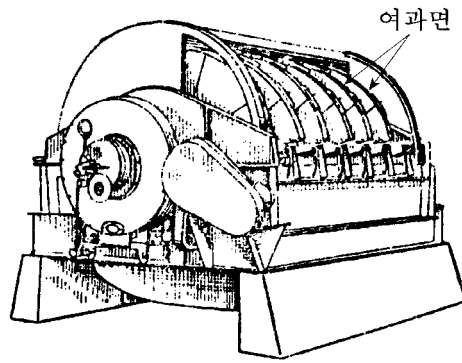


그림 23-10 회전원관식 진공여과기

### 23-5 원심분리

원심분리 : 침강, 여과 등의 중력 대신에 원심력을 이용한 분리법, 강력하고 고능률

#### 23-5-1 원심효과

질량  $m$  [kg]의 물체가 반지름  $r$  [m]의 원주상을  $\omega$  [rad/s]의 각속도로 회전할 때 원심력  $F_c$  [Kg] :

$$F_c = \frac{r\omega^2 m}{g_c} \quad (23.9)$$

원심효과 : 침강·여과 등의 조작용 중력 대신에 원심력으로 하는 경우의 효과의 기준 실용적인  $Z$ 의 범위는 1000~60,000 정도

$$Z = \frac{\text{원심력}}{\text{중력}} = \frac{F_c}{m\left(\frac{g}{g_c}\right)} = \frac{r\omega^2}{g} = \frac{4\pi^2 r n^2}{3600g} \approx \frac{r n^2}{900} \quad [-] \quad (23.10)$$

여기서  $n$  : 회전수 [rpm]

o 입자의 중력장에서 침강속도가  $u_{tg}$  [m/s]이면 원심효과가  $Z$ 의 원심력장에서 침강속도  $u_{tc}$  [m/s] :

$$u_{tc} = Z u_{tg}$$

#### 23-5-2 주요한 원심분리기

[1] 원통형 원심침강기 => 그림 23-11, 샤프레스형

볼의 지름은 5~10cm 정도, 회전수는 15,000~50,000 rpm, 원심효과는 13,000~60,000 정도.

**[2] 분리판형 원심침강기 => 그림 23-12, 드레블형**

총지름 30~50 cm, 회전수 5000~6000 [rpm], 원심효과 7000 정도

능력 : 샤프레스형에 비해서 원심효과는 적지만 처리능력은 비교적 큼.

특징 : 분리판이 보통 1mm 이하의 미소한 간격으로 장치 => 경액, 중액이 층류로 되어 분리효과를 높여줌.

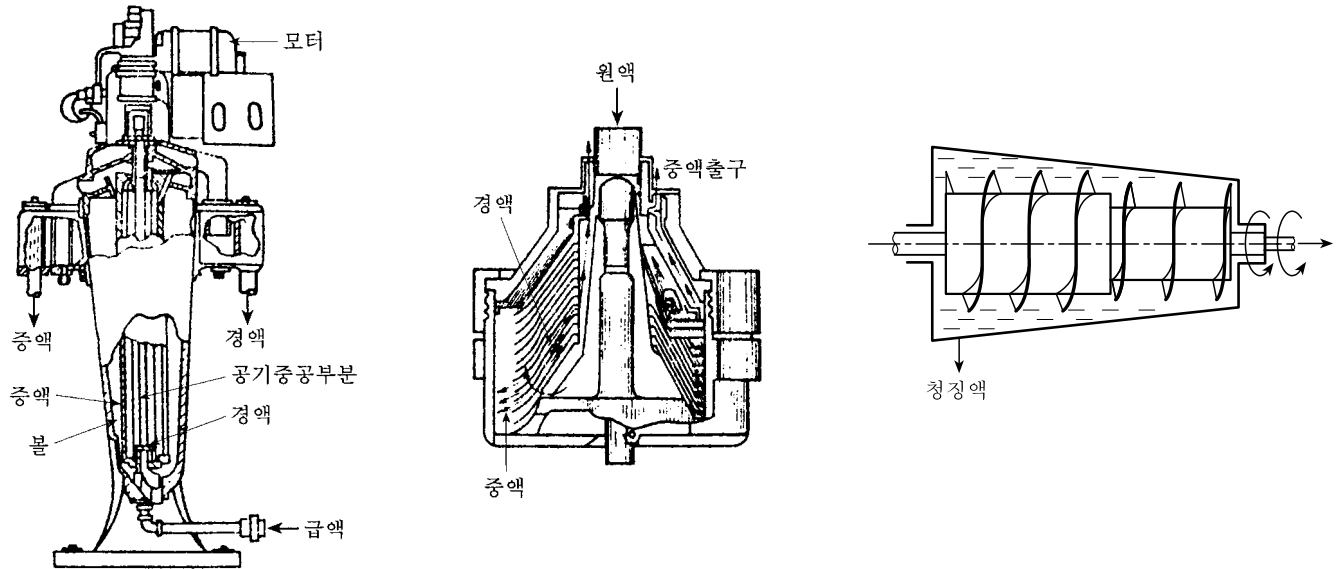


그림 23-11 샤프레스    그림 23-12 드레블 원심분리기    그림 23-13 수평축형 데켄터

**[3] 원심경사기(데켄터) => 그림 23-13, 수평축형**

특징 : 샤프레스형, 드레블형은 고형분이 많은 현탁액의 처리에는 적합하지 않지만 데켄터는 다량의 고형물을 포함한 액의 처리에 알맞음. 원심효과는 500~2000 정도.

**[4] 원심여과기 => 그림 23-14, 바스켓형 분리기**

원심여과기 : 여과장치를 비치한 원심분리기

특징 : 회전축의 방향에 따라 수직식, 수평식의 구별이 있고 수직식은 소규모 회분식의 경우에, 수평식은 비교적 대규모인 연속식의 경우에 알맞음.

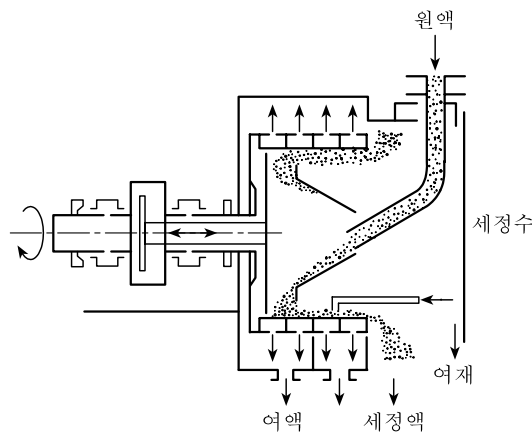


그림 23-14 수평축형 원심여과기

23-6 집진

분진 또는 더스트 : 기체 중에 고체 미립자군이 부유되어 있는 혼합계  
 집진 : 더스트 중에서 고체 미립자를 포집하는 분리조작

23-6-1 사이클론

사이클론 : 기체가 원통상의 용기 내를 고속으로 선회하면 그 중에 포함된 고체 미립자는 원심력 때문에 기벽의 주변에 침강하는 현상을 이용한 집진장치

포집 미립자 : 20~5 $\mu$

선회기류의 주속도를  $v$  [m/s], 반지름을  $r(=D_c/2)$  [m]라고 하면

$$Z = \omega^2 r / g, \quad u = v / r = 2v / D_c \text{에서}$$

$$Z = \frac{2v^2}{gD_c} \tag{23.11}$$

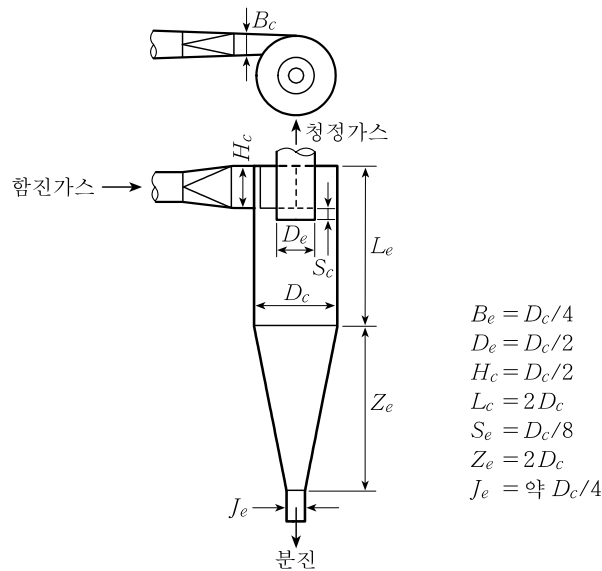


그림 23-15 사이클론의 표준적 치수

분리효율(사이클론의 경우는 원심효과에 거의 비례) :

송풍속도를 크게, 통지름을 작게 할수록 좋지만  $v$ 가 너무 크면 일단 침강한 미립자가 재차 비산·유동

멀티클론 : 대량의 분진을 취급하는 공장(예를 들면, 시멘트 공장)에서는 소형의 사이클론을 다수 병렬로 설치

23-6-2 스크러버

스크러버 : 더스트를 물 또는 기타 액체와 접촉시킴으로써 고체 미립자를 포집하는 장치 => 집진효율이 높음.

【1】 물 제트 스크러버 => 그림 23-16

함진가스를 물의 분류(제트)로 흡인해서 고체 미립자를 수중에 포집하 => 수중에 포집된 고체 미립자는 침강조 기타에서 분리되고 사용한 물은 순환펌프에 의해서 다시 이용.

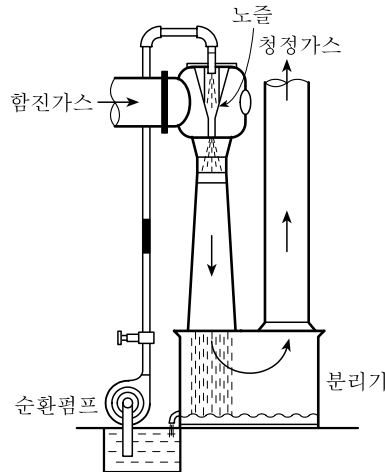


그림 23-16 물 제트 스크러버

【2】 사이클론 스크러버 => 그림 23-17

특징 : 사이클론 내부에는 그 중심 축방향으로 다수의 분수구멍을 비치한 원판이 삽입되어 있고 이 원판에서 분사된 액적과 더스트의 충돌에 의해서 고체 미립자를 잡아서 사이클론의 분리효과를 높인 것이다.

범위 : 입자지름이 2 $\mu$  정도되는 미립자의 포집에 쓰이지만 노즐, 수압, 풍량 등의 조절에 따라 1 $\mu$  정도 포집.

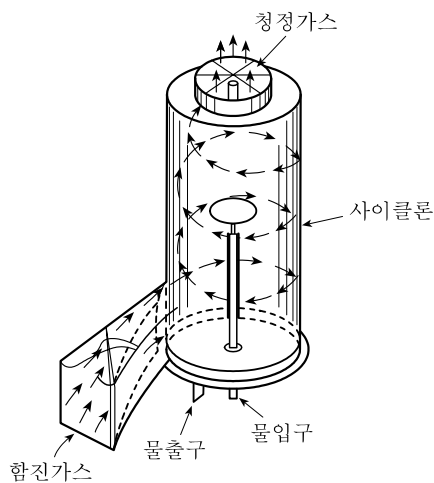


그림 23-17 사이클론 스크러버

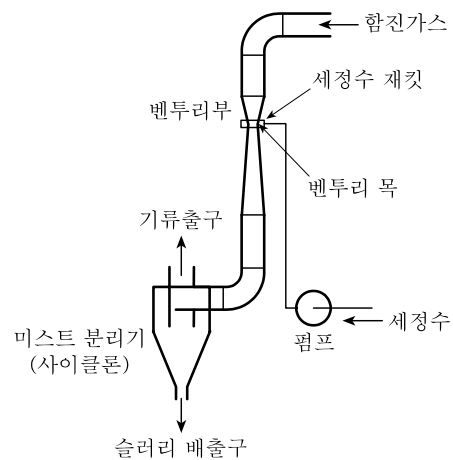


그림 23-18 벤투리 스크러버

【3】 벤투리 스크리버 => 그림 23-18

특징 : 사이클론의 앞에 벤투리관을 설치하고 벤투리관 경부의 고속부분에 물을 주입하는 방식으로 사이클론에 의한 포집효과를 높임.

효과 : ①기류의 고속부에서 주입된 물이 미립화되고 더스트와의 접촉, 충돌기회가 많아짐.

② 벤투리관의 확대부에서 기체, 액체, 고체의 3상의 혼합계가 난류로 되어 고체 미립자의 응집, 액적에의 부착 등이 한층 촉진.

범위 : 0.1~1 $\mu$  정도의 미립자

23-6-3 여과에 의한 집진

o 포대에 의한 방법과 고체 미립자나 섬유 등의 여재의 충전층에 의한 방법

=> 넓은 범위 입자지름에 걸쳐서 사용.

o 이외에도 전기, 음파, 자성력, 기타에 의한 방법이 있음.

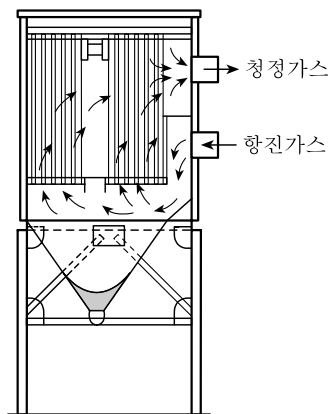


그림 23-19 백 필터