

입자제어 장치(Particulate Control Equipment) (I)

집진장치의 선정이 이루어지기 전에 먼저 많은 요인들이 결정되어야 한다. 고려되어야 할 가장 중요한 자료들 중에는, 입자의 물리적 화학적 성질, 기체흐름의 체적유량의 범위, 예측되는 입자농도의 범위, 유동의 온도와 압력, 습도, 기체의 속성(부식성 및 용해성 등과 같은 특성), 그리고 다루어지는 유출물의 요구조건 등이 있다. 이들 중에서 마지막 항의 정보가 단일 장비이거나 연결된 여러개의 조작에 의해 당면하게 되는 집진효율을 나타내기 때문에 가장 중요하다. 많은 경우에 있어서, 위의 고려사항들은 기술자로 하여금 한개 혹은 두가지 종류의 기본장비를 선택하게 한다.

다음의 5가지의 입자집진장치를 나타낸 것이다.

- 1) 중력침전용기
- 2) 원심분리기
- 3) 습식집진기
- 4) 직물필터
- 5) 전기집진기

어떤 종류에 있어서는, 장치들이 그들 각각의 조작법이나 구조의 차이에 의한 다른 명칭을 가질 수도 있다. 다음의 장치들에 대한 자세한 설명은 문헌이나 장치 제작자들로부터 얻을 수 있다.

1. 중력침전용기

침전용기 내의 침전속도가 약 25ft/min

생산기술연구원
(기술개발본부)
교수 오명도

(13cm/s)보다 큰 경우에, 중력을 이용하여 입자를 제거할 수 있다. 일반적으로, 이 방법은 입자밀도가 낮은 경우에는 50 μ m보다 큰 입자를, 밀도가 충분히 큰 경우에는 10 μ m의 입자를 침전시키는데 이용할 수 있다. 이보다 작은 입자의 경우에는 더 긴 수평유동거리를 필요로 하게 되는데, 이는 과대한 침전용기의 부피를 초래한다. 그림 1-1은 중력침전용기의 한 예를 보여준 것이다. 중력용기가 침전된 입자의 재부유를 방지하는데 효과적인 작용을 하기 위하여는, 기체의 속도가 균일하고 비교적 낮아야 하는데, 약 10ft/s(300cm/s)이하이거나 1ft/s(300cm/s)이하이면 더욱 좋다.

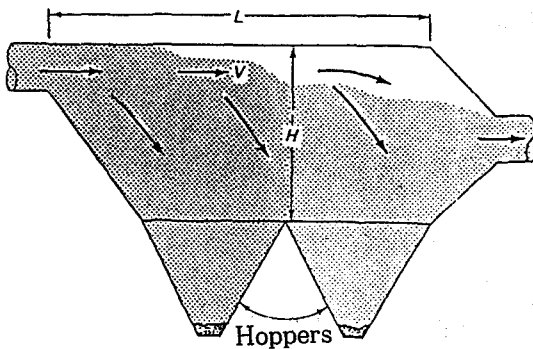


그림 1-1 중력침전용기

이론적으로, 100% 효율로 제거될 수 있는 최소입자의 크기는 다음과 같은 방법으로 알아낼 수 있다. 그림 1-1에서, 직경이 dp 인 입자가 높이 H 를 떨어지는데 필요한 시간 즉, 기체유동으로부터 이탈하는데 필요

한 시간은 수평거리 L 만큼 이동하는데 필요한 시간과 같거나 작을 것이다. 100% 제거되는 최소입자의 경우, 이들 두 시간은 동일하다. 그러므로, 거시적인 혼합이 없는 균일한 관유동의 경우,

$$t = \frac{H}{V_t} = \frac{L}{V} \quad (1-1)$$

여기서 모든 입자는 기체속도 V 로 용기를 통과한다고 가정한다. 입자크기 dp 를 알기 위하여 dp 와 침전속도 V_t 의 관계를 필요로 한다. 상온에서 구형입자에 관한 일반적인 해는 그림 1-2로부터 얻을 수 있다. 그러므로

$$V_t = f(dp) = \frac{VH}{L} = \frac{Q}{LW} \quad (1-2)$$

$$V_t = \frac{gd_p^2 \rho_p}{18 \mu g} \quad (\text{유선선동}) \quad (1-3)$$

여기서 Q 는 체적유량이고 W 는 용기의 폭이다. V , H , L , Q 와 W 를 알고 있으므로 V_t 를 계산할 수 있다. 이 값은 그림 1-2와 같이 최종속도에서의 입자크기를 결정하는데 사용된다. 이때의 dp 값은 100%의 집진 효율을 얻을 수 있는 최소입자 크기의 대략적인 값이 된다.

100% 효율을 얻을 수 있는 최소입자크기를 구하는 첫번째 접근방법으로 식 1-3과 같은 Stokes' law를 사용할 수 있다(일반적

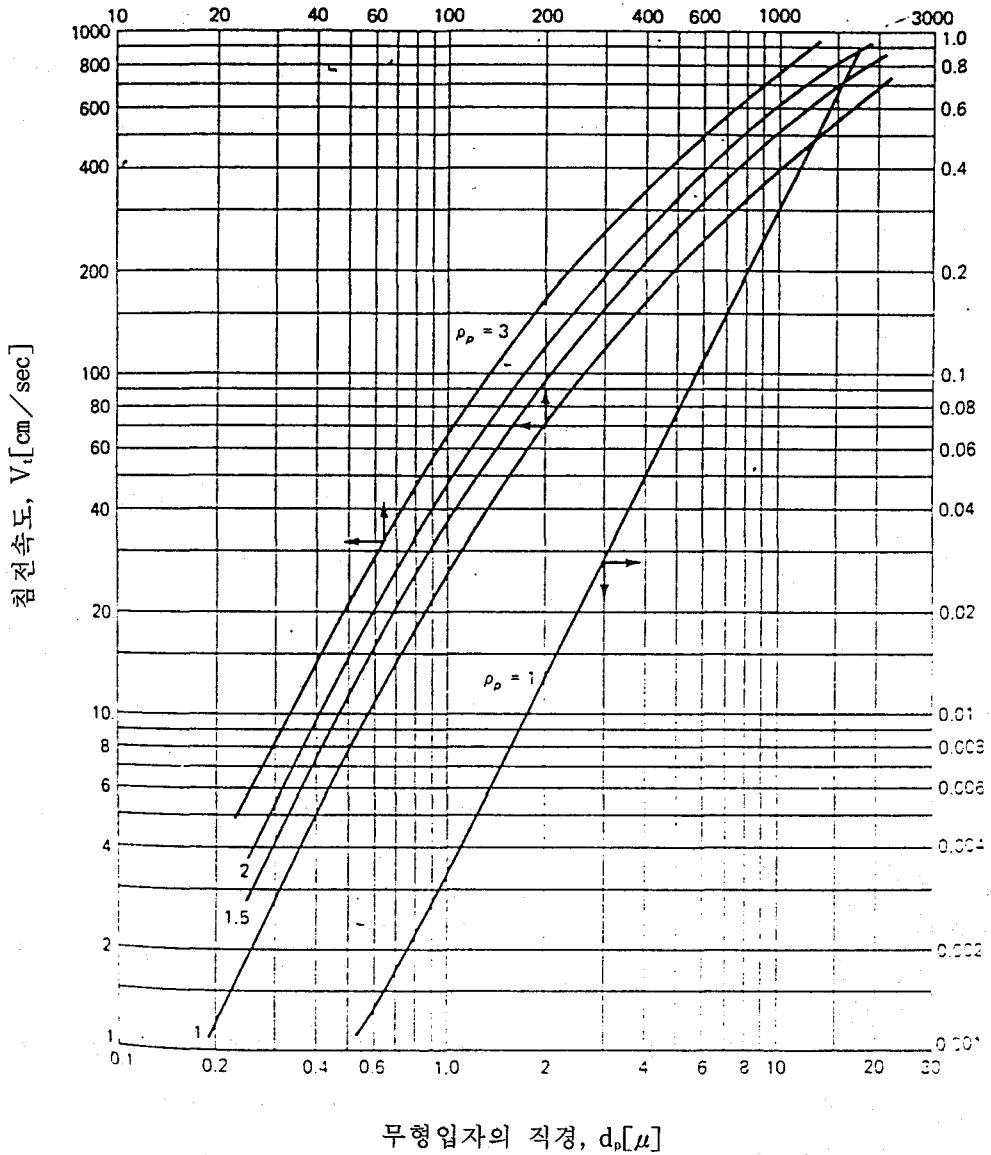


그림 1-2 상온 대기압 하에서의 구형입자의 침전속도

으로 Stokes' law는 d_p 가 $50\mu\text{m}$ 이상인 경우에는 유효하지 않다). 식 1-3을 식 1-2에 대입하면,

$$d_p = \left[\frac{18\mu HV}{g L \rho_p} \right]^{1/2} \quad (1-4)$$

위 식에서 기체밀도 ρ_g 는 무시되었다.

식 1-4로부터, 100%의 효율로 제거되는 최소입자크기는 H/L 의 값을 기하학적으로 줄임으로써 더 작은 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한개의 낮고 긴 용기보다는 어

는 정도 높고 짧은 용기에 수 인치 간격으로 떨어진 수평격판들을 설치하여 사용할 수 있다. 이러한 것은, 비록 효율은 높지만 제작비가 많이 소요되며 세척이 어렵다. 상업적으로 이용되고 있는 이러한 장치들은 실제로 다수의 중력 침전용기들을 병행으로 설치하여 사용되고 있다. 식 1-2와 1-4에 주어진 것보다 작은 크기의 입자인 경우에, 주어진 입자크기 dp 의 집진효율은 균일관유동의 경우 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\eta_d = \frac{V_t L}{HV}(100) = \frac{V_t LW}{Q}(100) \quad (1-5)$$

여기서 η_d 는 백분율로 나타낸다. 수평격판이 있는 침전용기의 경우, 윗식은 100% 집진의 최소입자 크기에 대한 1-2와 관계하여 다음과 같이 된다.

$$V_t = \frac{VH}{nL} = \frac{Q}{nLW} \quad (1-6)$$

여기서 n 은 유로의 수, 혹은 격판의 수와 바닥면의 수를 합한 것이다. 이 경우, 부분 효율식은

$$\eta_d = \frac{nV_t L}{HV}(100) = \frac{nV_t LW}{Q}(100) \quad (1-7)$$

침전용기내에서의 난류는 거시적인 혼합

이 없는 균일한 관유동으로부터 입자의 침전속도와 방향을 변동시킨다. 집진면위에 입자가 재부착되는 것 또한 고려되어야 한다. 공학적인 접근방법으로 계수 2를 곱함으로써 입자의 최종속도를 감소시키는 것이 이론과 실제에 더욱 근접하는 것임이 밝혀졌다. 그러므로 좀더 신중한 평가를 하고자 하면 식 1-2의 마지막 두 값에 2를 곱해야 한다. 마찬가지로 식 1-4의 계수 18은 36으로 바뀌어야 한다. 최종적으로, 100%의 집진효율을 갖는 최소입자의 크기를 계산하는데 타당한 접근방법을 사용하려면, 부분집진효율을 나타내는 식 1-5 역시 분모에 2를 곱해야 한다. 수평격막을 갖는 침전용기의 성능평가에도 같은 설명이 유효하다. 산업현장에서의 기체유량은 일정하지 않으므로 침전용기의 전체효율은 저부하에서는 증가하고 과부하에서는 감소한다.

입자의 밀도를 매우 크게 선택하였기 때문에, 100%의 효율을 갖는 최소입자의 크기가 작다. 밀도가 $1g/cm^3$ 라 하면, dp, min 은 $60\mu m$ 가 될 것이다.

앞의 설명에서는 실제 침전용기에서의 난류효과를 해석하기 위하여 경험적인 수정계수 2를 도입하였다. 또 다른 접근방법으로는 유동을, 집진트레이(collection tray) 근처의 층류층과 함께 “잘 혼합된(well-mixed)” 혹은 “잘 저어진(well-stirred)” 상태로 모델화 하는 것이다. 이 층으로 유

입되는 입자는 모두 포집된다고 가정되며, 난류나 잘 혼합된(well-mixed) 유동영역으로 돌아가지 않는다. 잘 혼합된 유동영역과 관련된 기본 가정은, 난류영역내에 모든 입자크기에 대하여 균일한 입자분포가 존재한다는 것이다. 주어진 입자크기 dp 에 대한 집진효율을 정의하기 위하여는, 침전용기내의 어떠한 위치 x 에서 기체의 흐름 중에 남아 있는 크기 dp 인 입자의 수 N_p 의 관계를 알아야 한다. 물리적인 상태가 그림 1-3에 설명되어 있다. 두께 y^* 의 층류가 바닥의 트레이를 따라 존재하는 반면에, 잘 혼합된 난류 영역이 높이 H 의 유로 전역을 거의 채우고 있다. 침전용기의 전체길이와 너비는 각각 L 과 W 이다. 거리 dx 를 흐르는 동안, 층류층에 도달하여 중심유동으로부터 제거되는 전체 입자수의 분수값은 dN_p/N_p 이다. 유동이 거리 dx 를 흐르는 데 필요한 시간은 dx/V 이다. 이 동일한 시간안에 크기가 dp 인 입자가 최종속도 V_t 로 떨어진다. 입자가 지나가고 층류저층에 이르는 y 방향의 수직 최대거리는 tV_t 이다. 그러므로, $y/V_t = dx/V$ 이다. 그러나 잘 혼합된 계에서는, y/H 의 비는 층류층에 도달하여 중심유동으로부터 제거되는 입자의 분수값을 나타낸다.

$$\frac{dN_p}{N_p} = \frac{y}{H} = - \frac{V_t dx}{VH} \quad (1-8)$$

결과적으로 음의 부호는 x 가 증가함에 따라 입자의 수는 감소함을 나타낸다. 식 1-8을 적분하면,

$$\ln N_{p,L} = - \frac{V_t x}{VH} + \ln C$$

여기에 (1) $x=0$ 에서 $N_p=N_{p,0}$, (2) $x=L$ 에서 $N_p=N_{p,L}$ 의 2개의 경계조건이 적용된다. 이 조건을 위 식에 대입하면

$$N_{p,L} = N_{p,0} \cdot \exp\left[- \frac{V_t L}{VH}\right] \quad (1-9)$$

여기에 (1) $x=0$ 에서 $N_p=N_{p,0}$, (2) $x=L$ 에서 $N_p=N_{p,L}$ 의 2개의 경계조건이 적용된다. 이 조건을 위 식에 대입하면,

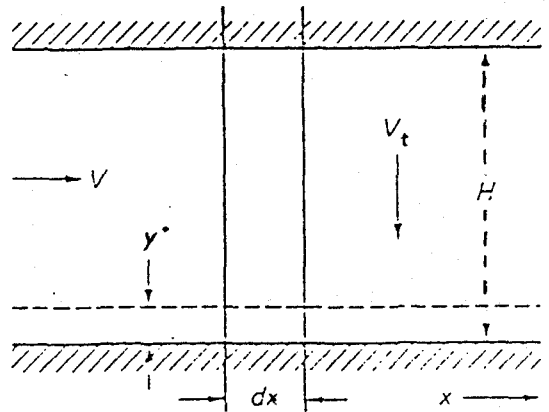


그림 1-3 중력집진기에서의 난류유동시 입자분리에 관한 개략도

여기서 첨자 p 는 이 식이 크기 dp 인 입자에 적용됨을 나타낸다. V_t 가 dp 의 함수라는 사실이 이 점을 강조한다. 결과적으로,

크기가 dp 와 $dp+d(dp)$ 사이인 입자의 집진효율은 다음과 같은 관계로 주어진다.

$$\eta_b = 1 - \frac{N_{p,1}}{N_{p,0}} = 1 - \exp\left[-\frac{V_t L}{VH}\right] \quad (1-10a)$$

$$= 1 - \exp\left[-\frac{LV_t W}{Q}\right] \quad (1-10b)$$

여기서 Q 는 체적유량이다.

중력침전용기는 다음과 같은 근본적인 특성이 있다. (1) 매우 낮은 에너지비, (2) 낮은 유지비, (3) 낮은 설치비, (4) 높은 신뢰성, (5) 큰 부피, (6) 낮은 효율, 결과적으로, 침전용기는 주로 기체흐름으로부터 거친 입자를 경제적으로 예비정화하는 목적으로 주로 사용된다. 예비정화는, 매우 많은 먼지가 부유하고 있거나 거친 입자들이, 병렬로 연결된 침전용기의 하류집진기에 손상을 줄 수 있을 때 많은 도움이 된다. 비록, 용기들이 거의 모든 재료들로 제작될 수 있지만, 큰 공간을 필요로 하기 때문에 거의 사용되지 않는다.

2. 원심분리기

원심분리기는 기체의 회전유동으로 인하여 발생하는 원심력을 이용하여, 기체로부터 입자를 분리시켜 기체를 정화하는 장치이다. 분리장치는 한개의 큰 용기, 병렬 또는 직렬로 연결된 다수의 튜브형 용기, 혹은

송풍기와 유사한 동적 장치가 될 수도 있다. 직렬구조의 장치가 제거효율을 증가시키는 반면, 병렬구조의 장치들은 체적용량을 증가시킨다. 원심분리기에는 바람개비형식과 나선형식이 있다. 이 두가지 종류의 차이점은 기체에 충분한 회전운동을 주기 위하여 원통형 용기에 기체를 유입시키는 방법에 있다. 그림 2-1(a)에 나타난 전식 원심분리기에서는 접선방향의 기체유입에 의해 회전운동이 발생한다. 직사각형의 나선형 유입통로는 원통과 접선방향의 내벽을 가지고 있으며, 그 입구는 180° 의 나선에 걸친 원통과 점차적으로 합쳐지게 되어 있다. 그림 2-1(b)는 바람개비형 원심분리기를 보여주고 있다. 이 경우, 원심운동은 바람개비들의 고리에 의하여 오염기체가 감소하는 축방향으로 부가된다. 이 두 경우 모두 작용은 입자가 기체흐름의 방향이 변할 때 직선방향으로 운동하려는 경향에 기인한다. 높은 회전률에 의한 이 원심력은 더러운 입자를 원통과 원추의 외벽 쪽으로 밀어낸다. 입자는 벽을 미끄러져 내려가 저장 깔대기에 모이게 된다. 점차적으로 정화된 기체는 하류의 나선을 역행하여 상승하는 작은 나선을 형성한다.

원심분리기는 일반적으로 크기가 $10\mu\text{m}$ 이상의 입자를 제거하는데 사용된다. 그러나, 전형적인 원심분리기는 입자의 크기가 $25\mu\text{m}$ 이상이 아니면 90%의 효율을 얻기 어렵

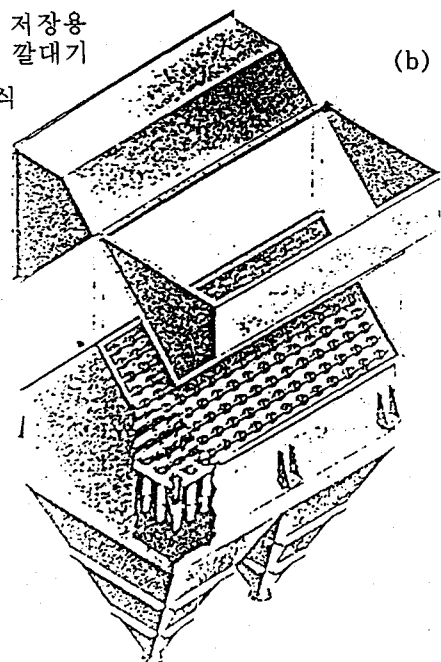
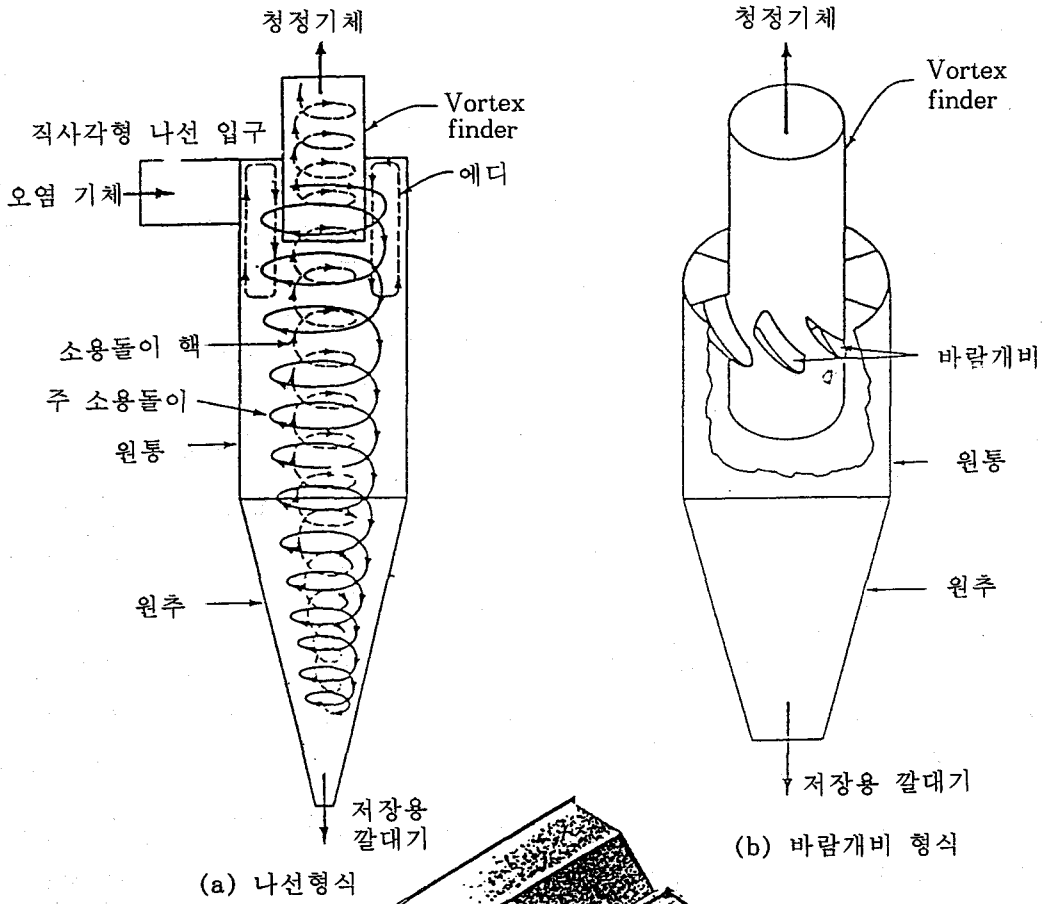


그림 2-1 (a) 원심분리기의 개략도 (b) 다관식 원심분리기

다. 입자가 5 μm 이하의 경우에 효과적인 고효율 원심분리기도 유용하다. 설계와는 관계없이, 입자의 크기가 임의의 값을 넘어서면 어떠한 원심분리기도 부분적인 집진효율이 급격히 감소한다. 이것이 그림 2-2에 나타나 있는데, 이 그림은 여러 종류의 장비에 대한 전형적인 곡선을 보여준다. 체적을 크게 설계하면 집진효율을 감소시킨다. 이것은 기체가 다른 집진장치를 통하기 전에 큰 입자를 제거하는 예비정화기로 사용될 수 있다. 원심분리기의 대표적인 전체 집진 효율이 표 2-1에 나와 있다. 주어진 원심분리기는 하나의 종류 이상에 속할 수도 있지만, 집진되는 입자의 크기와 운전방법에 의하여 분류된다.

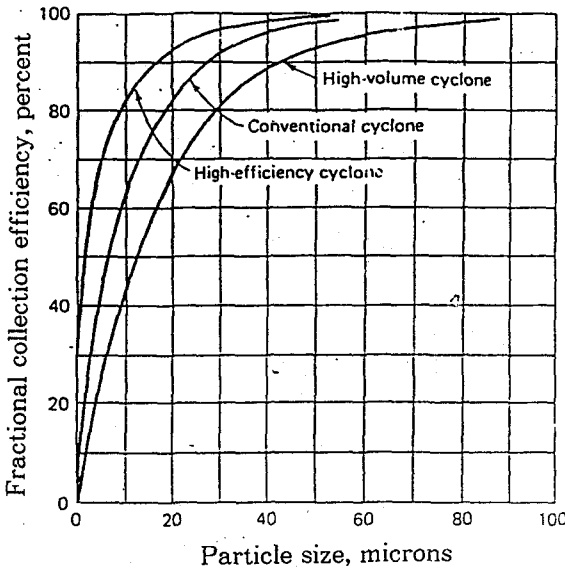


그림 2-2 여러 종류의 원심분리기의 부분집진효율

원심분리기의 부분집진효율에 영향을 주는 주요변수는 다음에 제시된 간단한 식을 통하여 확인될 수 있다. 먼지를 실은 기체가 원심분리기로 들어가면, 내부 소용돌이로 들어가기 전에 외부 소용돌이에서 Ne의 회전수로 회전을 한 후, 원심분리기의 출구 쪽으로 간다. 회전수 Ne는 다음과 같이 주어진다.

$$Ne = \frac{1}{H} \left[L_1 + \left(\frac{L_2}{2} \right) \right] \quad (2-1)$$

표 2-1 원심분리기의 전체집진효율

입자크기 (μm)	일반 원심분리기	고효율 원심분리기
<5	<50	50-80
5-20	50-80	80-95
15-20	80-95	95-99
>40	95-99	95-99

여기서 L_1 은 상부원통의 높이, L_2 하부 원추의 높이, 그리고 H는 오염기체가 유입되는 직사각형 입구의 높이이다. 원심분리기의 입구에서 입자의 분포는 균일하다고 가정한다. 100%의 효율로 집진되는 직경이 d_p 로 주어진 먼지의 경우, 내측 반경 R_i 의 원심분리기 입구로 유입되는 모든 입자는, 회전수 Ne의 회전이 끝나기 전에 원심력에 의하여 외측 반경이 R_o 인 외벽으로 밀려난다. 중간 크기의 반경 R(R_i 와 R_o 사이)로

유입되는 모든 입자 역시 100% 효율로 집진될 것이다. Ne의 회전수에서 완전히 집진이 안되는 크기 dp 의 경우에는 $R_o - R^*$ 의 거리 안에 위치한 입자만이 집진될 것이다. R^* 는 크기 dp 의 입자가 회전수 Ne의 회전수로 회전하는 동안 외벽으로 도달하는 최소 반경이다. 그러므로, 일반적으로 부분집진효율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\eta_d = \frac{R_o - R^*}{R_o - R_i} \quad (2-2)$$

$(R_o - R^*)$ 는 직사각형 입구의 너비인 W 와 같다.

거리 $(R_o - R^*)$ 는, 기체유동에 직각방향인 입자속도와 기체가 외부 소용돌이안에 있는 시간의 곱에 직접적인 관계가 있다. 반경방향에서의 원심력과 항력을 동일하다고 가정하면 법선(반경방향)속도를 구할 수 있다. 한 예로, 입자의 운동을 Stokes유동이라 가정한다. 구형 입자의 경우, 힘의 평형식은 다음과 같다.

$$3\pi d_p \mu V_n = \rho_p \left[\frac{\pi d_p^3}{6} \right] \left[\frac{V_t^2}{R} \right]$$

혹은

$$V_n = \frac{\rho_p d_p^2 V_t^2}{18\mu R} \quad (2-3)$$

여기서 V_n 과 V_t 는 각각 입장의 법선과

접선방향의 속도를 나타낸다. 실제로 V_t 는 R 의 함수이다. 간단한 가정으로, V_t 는 기체의 속도 V_g 로 대체할 수 있으며 R 은 R_o 와 R_i 의 평균값을 취할 수 있다. 또한, 입자가 바깥쪽으로 이동하는 동안 V_n 이 일정하다면, 위에서 논의한 바와 같이 $V_n = (R_o - R^*) / \Delta t$ 이다. 그러므로,

$$R_o - R^* = \frac{\rho_p d_p^2 V_g^2 \Delta t}{18\mu R}$$

입자가 외부 소용돌이안에 남아 있는 시간은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta t = \frac{2\pi R Ne}{V_g}$$

여기서 Ne는 유효회전수이다. 위의 두 식에서 Δt 를 소거하면

$$R_o - R^* = \frac{\pi Ne \rho_p d_p^2 V_g}{9\mu} \quad (2-4)$$

이 식을 식 2-2에 대입하면,

$$\eta_d = \frac{\pi Ne \rho_p d_p^2 V_g}{9\mu W} = \frac{\pi Ne \rho_p d_p^2 Q}{9\mu H W^2} \quad (2-5)$$

여기서 Q 는 체적유량이다.

식 2-5는 집진효율에 영향을 주는 변수를 설정하여 준다. 그러나 이 식은 한가지 큰 결점이 있다. 주어진 기하학적 조건과 유동상태에서, η_d 는 dp^2 에 비례하여 변한다.

그리고 100%의 집진효율을 만족하는 입자의 크기 d_p 에 제한이 있다. 그러나 d_p 가 증가함에 따라 부분집진효율은 지수함수적으로 증가한다는 것이 실험적으로 증명되었다. 이 문제를 극복하기 위하여 여러 학자(H. L. Green and W. R. Lane)들은 50%의 효율로 집진되는 입자의 크기와 관련되는 방정식을 도입하였다. Lapple은 식 2-5를 기초로 한 집진효율에 관한 경험식을 마련하였다. 만약 앞에서 정의한 ηd 가 0.5라고 하여 d_p 를 구하면,

$$d_{p,50} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N e V g \rho_p} \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{9\mu W^2 H}{2\pi N e \rho_p d_p Q} \right]^{1/2} \quad (2-6)$$

모든 변수는 앞에서 이미 정의되었고, $d_p, 50$ 는 50% 효율로 집진되는 입자의 크기이다. Lapple은 유사한 크기의 원심분리기에서 얻은 자료를 관련시켰으며 그림 2-3에 나와 있는 바와 같이 일반화된 곡선형태의 결과를 발표하였다. 이 곡선은 “표준크기”의 원심분리기와 더욱 관련이 있다. 표 2-2는 원심분리기의 크기를 외경 D_0 의 표현으로 나타내었다. 그림 2-3에서 곡선의 의미는, 부분효율곡선은, 초기에 정립된 간단한 이론에 의하여 예상되었던 것과는 달리 100%에 접근적으로 도달하고 있다. 비록 Lapple에 의한 관계가 실험적인 자료에

의한 것이지만, 원심분리기 제작자에 의해 제시된 일부 곡선들은 Lapple이 제시한 $d_p/d_p, 50$ 의 값보다 다소 낮은 값을 보이고 있다.

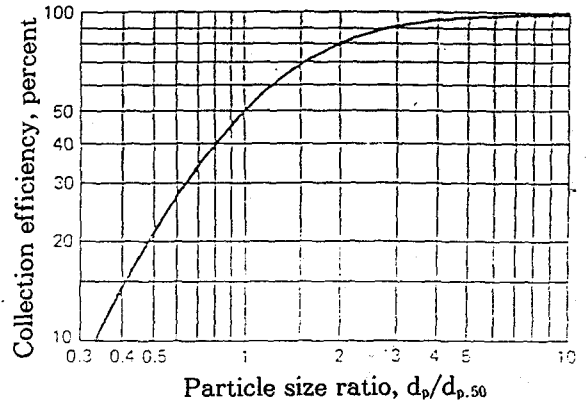


그림 2-3 원심분리기의 효율과 입자크기의 비

표 2-2 원심분리기의 표준크기

원통의 길이	$L_1 = 2D_0$
원추의 길이	$K_2 = 2D_0$
입구의 높이	$G = D_0/2$
입구의 너비	$W = D_0/4$
출구원통의 직경	$D_c = D_0/2$
먼지출구의 직경	$D_d = D_0/4$

원심분리기의 집진효율은 식 2-3의 오른쪽 항이 증가함에 따라 증가함이 밝혀졌다. 즉,

$$\eta_{col} \propto \frac{\text{centrifugal force}}{\text{drag force}} \propto \frac{V_p \rho_p d_p^2}{R \mu_g} \quad (2-7)$$

첫번째 접근방법으로, 집진효율은 입구나 접선방향의 속도, 입자의 밀도 그리고 입자의 직경이 증가함에 따라 증가하고, 기체의 점도와 원심기의 직경이 증가함에 따라 감소함이 밝혀졌다. 식 2-7은 효율이 입자직경의 제곱에 비례하기 때문에 작은 입자들은 효율적으로 집진이 안되는 이유를 명백히 보여주고 있다. 또한 원심기의 길이와 먼지의 양이 증가하면 효율 역시 증가함이 실험적으로 밝혀졌다. 벽 근처에서 난류의 효과를 피하는 것이 좋기 때문에 원심분리기 내벽의 매끈함 역시 중요한 변수가 되고 있다. 결과적으로, 위에서 기술한 관계들은 작은 직경의 원심분리기가 큰 직경의 것보다 더 효과적임을 나타낸다. 그러나 이것은 원심분리기의 물리적 차원의 비가 고정되어 있을 경우에만 타당하다. 임의의 차원을 변경함으로써, 큰 직경의 원심분리기가 작은 직경의 것보다 효율이 더 좋을 수도 있다. 그러나, 효율의 증가는 동일한 유량조건에서 전체 크기의 증가와 압력강하의 증가를 의미한다.

이러한 장단점의 평형은 원심분리기의 설계방법을 들로 갈라지게 하거나 논쟁의 여지가 있으므로 매우 중요한 요인이다. 그러므로 집진효율과 압력손실 사이의 절충안이 필요하다. 물론 압력강하는 에너지 소비와 직접적인 관계가 있다. 또한 일반적으로 높은 집진효율은 더 큰 압력손실이 따른다.

이러한 점은 압력 손실에 관한 식이 식 2-7과 같은 효율과 비교됨을 경험적으로 쉽게 알 수 있다. 이러한 관계의 한 예(Air Pollution Manual)는 다음과 같다.

$$\Delta p = \frac{KQ^2 p \rho_s}{T} \quad (2-8)$$

여기서 Δp 는 압력강하(단위 : in, water)이고, Q 는 기체의 체적유량(단위 : ft^3/min), p 와 T 는 각각 대기압과 Rankine 단위의 기체의 압력과 온도, ρ_s 는 기체의 밀도(단위 : lb/ft^3), 그리고 K 는 표 2-3에 주어진 바와 같은 경험적 설계계수이다.

표 2-3 원심분리기의 직경에 대한 압력강하변수

원심분리기 직경(in.)	29	16	8.1	4.4
K	10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-1}

원심기의 직경에 대한 계수 K 는 log-log 스케일에서 직선상에 위치한다. 만일 기체가 공기라면, 식 2-8은 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$\Delta p = \frac{39.7KQ^2 P^2}{T^2} \quad (2-9)$$

여기서 단위는 윗 식의 단위와 동일하다. 기체속도가 Q 에 직접적으로 비례하기 때문에 압력강하는 속도의 제곱에 정비례한다. 만일 초기에 입자의 속도가 기체의 속도로

상품화되어 있다. 설명을 간단히 하기 위해서 습식집진기의 세가지 주된 형태에만 국한하기로 하겠다. 즉,

- 1) 분무실 스크러버(충돌 방지판이 有, 無)
- 2) 사이클론 스크러버(습식 사이클론)
- 3) 벤츄리 스크러버

Packed tower도 위의 항목에 포함될 수 있지만 그들은 주로 기체흡수에 이용된다. 어떤 경우에는 기체와 오염입자를 동시에 제거할 수 있다.

습식집진기는 건식 장치에서 찾을 수 없는 문제점들이 있다. 가장 중요한 문제는 습식집진기에서 필연적으로 생성되는 폐기물을 어떻게 다루고 처분하는가 하는 것이다. 하지만 어떤 경우에는 실제 응용될 때, 폐기물을 건조한 먼지보다 더 쉽게 처리할 수 있다. 만약에 장치가 자연속에 설치되어 있다면, 추위에 동결되는지의 여부를 고려해야 한다. 수분의 함유는 물질의 부식을 증가시키는 성향을 가지고 있다. 최종적으로 미립자의 높은 집진효율을 얻기 위해 액상은 고부 분포되어야 하고, 이 조건은 비교적 높은 동력을 필요로 한다. 비록 하나 혹은 그 이상의 집진과정이 습식집진 장치의 범위 내에서 사용될지라도, 가장 중요한 조건은 분사의 시작이나 액적으로 입자를 집진하는 것이다. 그 결과 입자, 액적, 그리고 유체의 물성치가 분사에 어떤 영향을 주

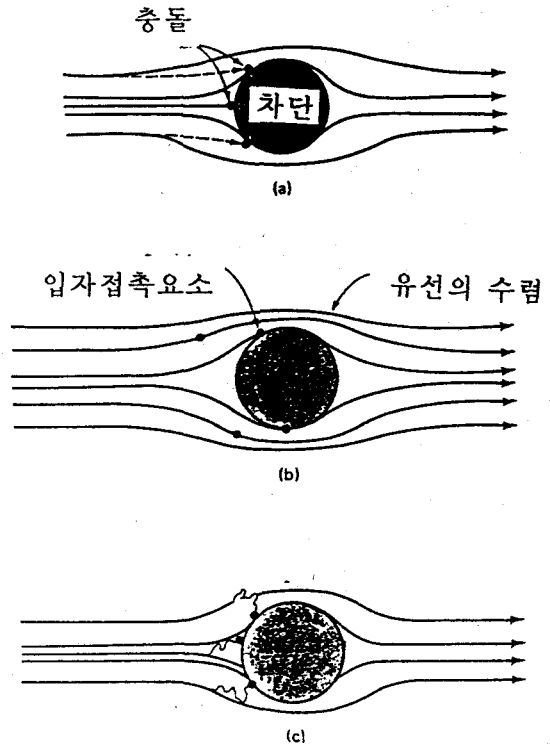


그림 3-1 입자제거의 세가지 메카니즘
(a) 내부충돌 ; (b) 직접차단 ; (c) 확산

는지 결정하는 것이 중요하다. 이 문제에 대한 간단한 접근방법은 다음과 같다. 그림 3-1에 보이는 바와 같이 입자는 액적에 접근하여 최초의 충돌을 한다. 액적으로부터 상류 쪽으로 약간 거리를 둔 위치에서 입자는 기체유동의 유선을 이탈하여 액적으로 이동한다. 이때 입자에는 입자자신의 관성력과 주위 기체에 의한 항력의 두가지 힘이 작용한다(중력, 전기, 자기, 열에 의한 힘을 무시한다). 이 두 힘의 결과로서 마침내 입자는 액적에 정지하게 된다. 입자가

취하여진다면, 식 2-7은 집진효율은 기체의 속도에 비례함을 나타낼 것이다. 그러므로 집진효율과 압력강하는 주어진 장치에서의 속도와 제적률과 직접 연관이 있다. 간단한 원심분리기의 경우, 압력강하의 범위는 0.5-2in. water이고, 고효율 원심분리기의 경우는 2-6in water(1in. water-2.5mbar)이다.

원심분리기의 크기는 6, 8, 9, 그리고 10in.(15-15cm)가 일반적이다. 입구속도는 하나의 관당 500-100(ft/min)의 체적 유량을 가지는 50-60ft/s(15-20m/s)이다. 구동부분이 없으므로 원심분리기는 높은 신뢰성과 단순성을 지닌다. 이것이 가장 경제적인 고효율성 집진기이다. 집진기 중에서 바람개비 형식은 바람개비의 부식과 바람개비 사이의 통로가 막히는 등의 단점이 있다. 나선형 원심분리기의 가장 큰 단점은 효율이 증가함에 따라 크기와 비용이 증가한다는 점이다. 그러므로 운전특성과 필요조건이 상충된다면, 일반적으로 바람개비형 원심분리기를 먼저 선택한다. 바람개비형과 나선형사이에 또 다른 제약조건이 있을 가능성도 있다.

종종 원심분리기를 성능을 설계조건을 벗어난 운전조건에 대하여 평가할 필요가 있다. 특정 원심분리기의 성능곡선이 사용되기도 한다. 그러나, 평가를 목적으로 할 때에는 다음과 같은 관계식이 유용하다(H. L.

Green and W. R. Lane)가 변유량일 경우에는,

$$\frac{100-\eta_a}{100-\eta_b} = \left[\frac{Q_b}{Q_a} \right]^{0.5} \tag{2-8}$$

기체의 유량, 효율, 그리고 기체의 점도가 일정할 때에는

$$\frac{100-\eta_a}{100-\eta_b} = \left[\frac{\mu_a}{\mu_b} \right]^{0.5} \tag{2-9}$$

기체의 밀도가 가변일 때에는,

$$\frac{100-\eta_a}{100-\eta_b} = \left[\frac{\rho_p - \rho_{gb}}{\rho_p - \rho_{gb}} \right]^{0.5} \tag{2-10}$$

부유하는 기체입자가 적절히 변할 때에는,

$$\frac{100-\eta_a}{100-\eta_b} = \left[\frac{C_{bi}}{C_{ai}} \right]^{0.183} \tag{2-11}$$

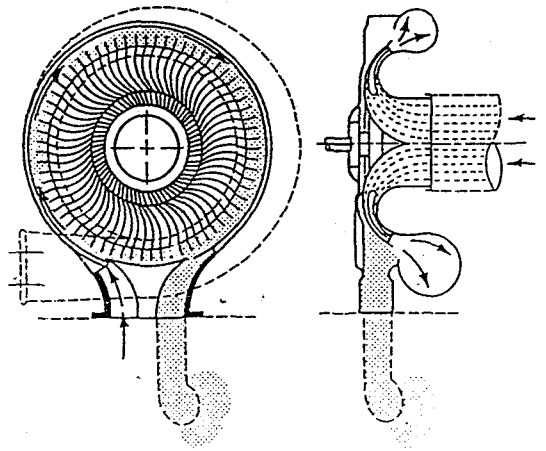


그림 2-4 동적집진기

여기서 a 와 b 는 운전조건이고, η 는 집진 효율, Q 는 체적유량, μ 는 기체의 점도, ρ_p 는 입자밀도, ρ_g 는 기체밀도, 그리고 C 는 단위 체적당 질량의 입자농도이다.

마지막으로 고려의 대상이 되는 원심분리기의 형태는 동적집진기이다. 이 집진기의 집진작용 역시 원심력을 이용한 것인데, 이 원심력은 회전차에 의해 발생한 힘이다. 그림 2-4와 같이, 기체를 외부의 반경방향으로 흐르게 하기 위하여 터빈형상의 원심 회전차의 날개는 오염기체를 축방향으로 흡입하여 90° 로 방향을 전환시킨다. 동일 용량의 경우, 이러한 종류의 장치는 일반적인 원심분리기보다 상향으로의 힘을 7배 정도 낼 수 있다. 먼지 입자는 바깥방향으로 밀려나간 후, 장치의 외부에서 2차 공기회전에 의하여 모아진다. 이 장치는 원심날개나 원동기와 같은 동작을 하므로 장치에 의한 압력강하가 일어나지 않는다. 그러나, 같은 용량의 단순 원심분리기보다는 더 큰 동력을 요구한다. 특히, 미세입자의 집진에 유용한 이러한 종류의 장치는 시뮴, 제약, 그리고 목재산업에 널리 사용되고 있다.

입자제거에 필요한 원심분리기의 구입비, 설치비, 그리고 운전비 등은 일정시간내에 집진되는 입자의 체적에 의해 영향을 받는다. 1979년 기준으로 $100,000\text{ft}^3/\text{min}$ 범위의 표준설계에 따른 제작비용은 ft^3/min 당 $\$0.25$ 에서 $\$2.00$ 정도였고, 설치비용은 제작

비의 100%를 부담하였다. 1000 내지 $5000\text{ft}^3/\text{min}$ 정도의 소형장치의 경우에는, 초기비용이 위에서 언급한 대형의 경우보다 2배 정도 된다. 가벼운 먼지 혹은 무거운 먼지가 집진되는가, 그리고 특수 운전조건이 가능한가에 따라서도 가격이 다양하다. 원심분리기에 대한 추가적인 자료와 동적집진기에 대한 설명이 참고문헌(Air Pollution Engineering Manual/Control Techniques for Particulate Air Pollutants/Air Pollution Manual/H. L. Green and W. R. Lane/A. C. Stern, P. D. Bush and K. S. Kaplan/R. D. Ingebo)에 나와 있다.

3. 습식 집진기(Wet Collectors)

습식집진기에서 액체(주로 물)는 먼지 입자를 집진하거나 에어로졸의 크기를 증가시키기 위해 사용된다. 각각의 경우에 크기가 증가되면 기체의 흐름으로부터 오염을 용이하게 제거할 수 있게 된다. 습식집진기에 의해서 $0.1\mu\text{m}-20\mu\text{m}$ 범위의 고체나 액체 미립자는 기체흐름으로부터 효과적으로 제거될 수 있다. 제거장치에 이용된 실제의 매카니즘은 2절에서 다룰 것 중의 하나이다.

그러나 장치의 가장 중요한 목적은 기상과 액상의 입자(혹은 에어로졸)간의 양호한 접촉을 얻기 위해 액체의 적절한 분산이 이루어져야만 한다. 많은 다양한 기본배열이

유선에서 액적으로 이탈한 지점에서부터 원래 위치까지의 거리보다 정지거리 x_s 가 크면 충돌이 발생한다. 우리는 충돌무차원수 (Impaction number) N_1 을 x_s 에 대한 액적의 지름 d_p 비로서 정의한다. 즉,

$$N_1 \equiv \frac{x_s}{d_p} \tag{3-1}$$

입자와 액적간의 충돌효율 혹은 기체유동에서 입자의 제거는, 충돌수와 관계있다는 것을 알 수 있다.

입자운동에 Stokes법칙이 적용된다고 가정하면 정지거리에 대한 표현을 유도할 수 있다. 입자에 대한 힘의 평형식은

$$F_{inertial} + F_{drag} = 0$$

혹은

$$m_p \frac{dV_p}{dt} + 3\pi V_p \eta_g d_p = 0$$

여기서 V_p 는 액적에 대한 입자는 밀도 ρ_p 를 가진 구로 가정하고

$$\frac{dV_p}{dt} = \left[\frac{dV_p}{dx} \frac{dx}{dt} \right] = V_p \frac{dV_p}{dx}$$

임을 이용하면

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} V_p \frac{dV_p}{dx} + 3\pi V_p \mu_g d_p = 0$$

정리하면

$$- \int_{v_{p,0}}^0 \frac{d^2 v_p \rho_p}{18 \mu_g} dv_p = \int_0^{x_s} dx$$

좌변은 기체유동에 대한 입자의 초기 상대속도 $V_{p,0}$ 에서 0까지 적분이고, 우변은 0에서 정지거리 x_s 까지 적분이다. 적분의 결과는

$$x_s = \frac{V_{p,0} d_p^2 \rho_p}{18 \mu_g} \tag{3-2}$$

또한 대부분의 경우에 $V_{p,0}$ 는 초기에 액적에 대한 입자의 상대속도를 나타낸다. 식 (3-2)를 식 (3-1)에 대입하면 N_1 은 대략 다음과 같다.

$$N_1 = \frac{V_{p,0} d_p^2 \rho_p K_c}{18 \mu_g d_p} = \frac{d_p^2 \rho_p K_c (u_p - u_D)}{18 \mu_g d_D} \tag{3-3}$$

여기서 U_D 는 액적의 속도이고 U_p 는 유동 방향의 입자속도이다. Cunningham 수정계수 K_c 는 N_1 에 대한 식에 더해진다. 5-5절에 소개된 바와 같이, 이것은 입자의 지름이 5 μm 미만인 경우에 적용이 가능하다(여기서 주의할 점은, 일부 학자들은 식 (3-1)에서 충돌수는 정지거리 입자의 곡률과의 비로 정의하는 경우가 있다는 것이다. 이 경우에 식 (3-3)의 분자에 있는 상수 18은 9로 바뀐다. N_1 에 대한 정의 변화는 문헌에서 해석과 표현을 변화시킬 것이다. 따라서 이

러한 데이터를 인용할 때에는 주의가 필요하다. 충돌수는 무차원수이므로 우변의 항목에 대한 적절한 차원이 선택되어야 한다. 주어진 크기와 밀도의 입자에 대해서 충돌수는 상대속도 $V_p, 0$ 에 비례하고 액적이 지름에 반비례한다. 따라서 고상, 액상간의 큰 상대속도, 그리고 미세하게 분산된 액상은 큰 충돌수를 얻기 위해 매우 필요한 인자들이다. 충돌수의 물리적 해석에 기초하여 일반적으로 우리는 N_1 의 값이 클수록 관성이 나 충돌 집진효율이 높을 것이라 예상하는데 이것은 이론과 실험을 통하여 확정된다 (Walton 등의 문헌(Int. J. Air Pollu. 3, 1960 : 129)의 문헌을 참조). 이론적으로 충돌효율은 충돌수의 항목으로 점성유동과 비점성유동 모두에 대해 유도될 수 있다. 구와 원통에 대한 이론과 실험결과를 그림 3-2에 나타내었다.

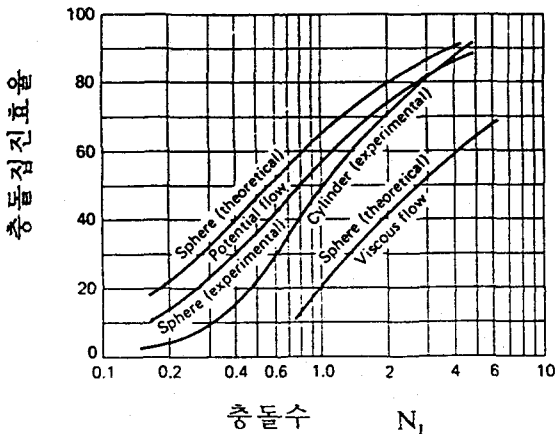


그림 3-2 구와 원통에서 충돌집진효율에 관한 이론과 실험결과의 비교

집진과정이 벤투리 스크러버처럼 관성력에 의존한 것이든지 분무용기에서처럼 증력에 의존한 것이든 간에 그림 3-2에서 집진효율은 실제 성능을 대표하는 것은 아니다. 그 이유는 충돌수에서 상대속도는 주어진 하나의 입자크기에 대해서 액적의 전 범위에 걸쳐 일정하지 않기 때문이다. 벤투리 스크러버와 같은 고속시스템에서는 작은 액적이 큰 액적보다 더 쉽게 운반기체의 속도

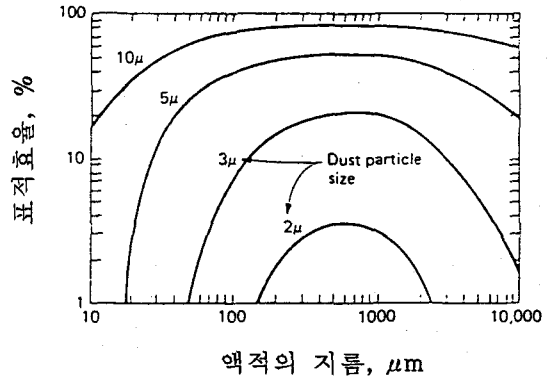


그림 3-3 증력분무탑에서 표적효율과 액적 크기(자료출처 : Air Pollution Manual. Part II - "Control Equipment." Detroit, Mich. : American Industrial Hygiene Assoc., 1968)

에 의해 가속된다. 따라서 먼지입자와 액체 집진입자간의 상대속도는 액적의 크기에 따라 다르다. 분무용기에서도 같은 종류의 현상이 발생한다. 이 경우, 기체의 속도는 액적의 속도에 영향을 주지 않으며 증력은 액적의 속도에 영향을 주게 된다. 큰 액적의 종단속도는 크며 따라서 기체유동에 포함되

어 운반된 입자와 낙하하는 액적간의 상대 속도는 큰 액적일수록 크다. 각 경우에서 전체적인 효과는 액적의 크기가 작아지면 집진효율이 낮아진다는 것이다. 이 효과는 그림 3-2의 일반예측과 연관되어 주어진 먼지 입자에 대해서 최대치의 집진효율을 얻는 최적의 액적크기가 존재한다는 중요한 결과를 유도한다. 그림 3-3은 증력분무탑에서 $2g/cm^3$ 의 밀도를 가진 입자에서의 최적점을 보여 준다. 주목할 만한 점은 액적의 크기가 $100\mu m$ 이하로 떨어질 때 효율이 급속히 낮아짐을 알 수 있다. 또한 입자크기의 증가에 따라 충돌효율이 증가함을 알 수 있다.

분무실 스크러버(SPRAY CHAMBER SCRUBBERS)

입자의 습식집진에서 가장 간단한 장치중의 한가지는 그림 3-4에서와 같은 원통형 혹은 사각형의 분무탑이다. 오염된 기체는 상방향으로 흐르고 입자는 유로에 연하여 설치된 적절한 노즐에 의해 생성된 액적과 충돌한다. 기체가 유량이 적으면 오염된 액적은 증력에 의해 분무탑의 바닥에 침전될 것이다. 분무탑 상부에 미스트(mist) 제거 장치가 설치되어 크기가 미세하기 때문에 기체유동에 의해 운반된 액적을 제거한다.

이상에서 설명한 역류(Counter flow)형

이외에도 교차류(Cross flow)형이 있다. 용기의 상부에서 물이 분무되고 오염된 기체는 수평으로 용기를 통과한다. 입자는 관성 충돌이나 확산에 의해 집진되고 큰 액적은 증력에 의해 바닥으로 모인다. 또한 바닥의 수면에 도달하지 못한 잔류액적을 제거하기 위해 분무부분뒤에 제습장치가 설치되어 있다. 핵심이 되는 기술은 분무부분뒤에 수직의 방지판을 설치하는 것이다. 분무영역내

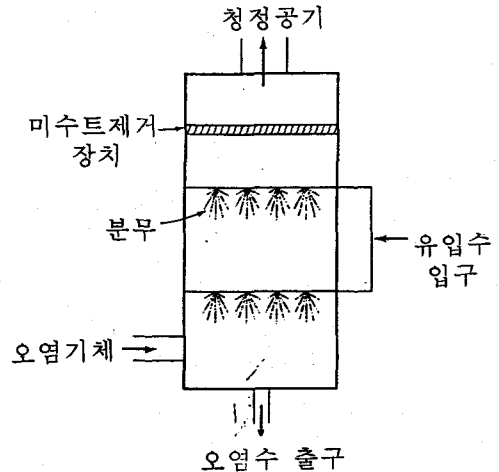


그림 3-4 분사탑 스크러버

에 추가적인 수직의 방지판을 설치하여 교차류스크러버의 집진효율 증대를 도모한다. 그림 3-5에 보인 장치는 습식 충돌판 스크러버로 알려져 있다. 충돌판 스크러버의 수직류(Vertical flow)분무탑 또한 유용하게 이용된다.

스크러버를 통과하는 물의 유량은 $1000ft^2/min$ 의 기체유동에 대해 $2-10gal/min$ 이

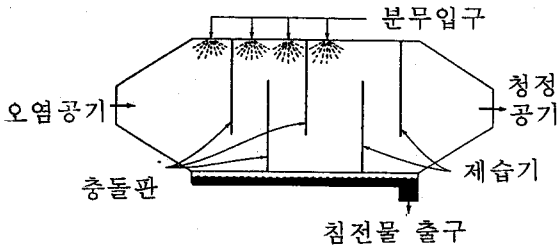


그림 3-5 습식 총돌판 스크러버

다. 기체유동내에서 증발된 물을 보충해야 되는데 대부분의 경우 사용된 물은 회수된다. 따라서 물을 저장하는 부분이 있어야 되고, 재사용된 물은 청정하지 못하기 때문에 특수한 노즐을 사용하여 분무노즐에 오물이 고착되거나 부식되는 것을 방지한다. 이런 유형의 장치에서 압력강하는 매우 적는데 통상 1-2인치 정도이다. 입자의 크기가 10 μ m를 넘는 경우 집진효율이 아주 좋다. 일반적인 분무탑의 효과는 94%(5 μ m 입자)-99%(25 μ m)까지이다. 방지판을 사용하면 기체와 액체의 접촉시간을 증가시켜서 5 μ m 입자에 대해 97%의 효율을, 25 μ m의 입자에 대해서 거의 100%의 효율을 갖게 한다. 고압 포그(fog)분무장치를 이용하면 입자가 1 μ m이하인 경우에도 고효율을 얻을 수 있다. 그러나 동력이 많이 필요하게 되고 재사용된 물로 노즐이 막히는 현상이 있을 수 있다.

사이클론 스크러버[습식사이클론]

(CYCLONIC SCRUBBERS : WET CYCLONS)

사이클론 스크러버의 가장 간단한 형태는 일반적인 건식사이클론의 내부에 환상의 노즐배열을 삽입시킨 것이다. 분무는 입자에 바깥쪽을 향하는 와류로 작용하고 먼지를

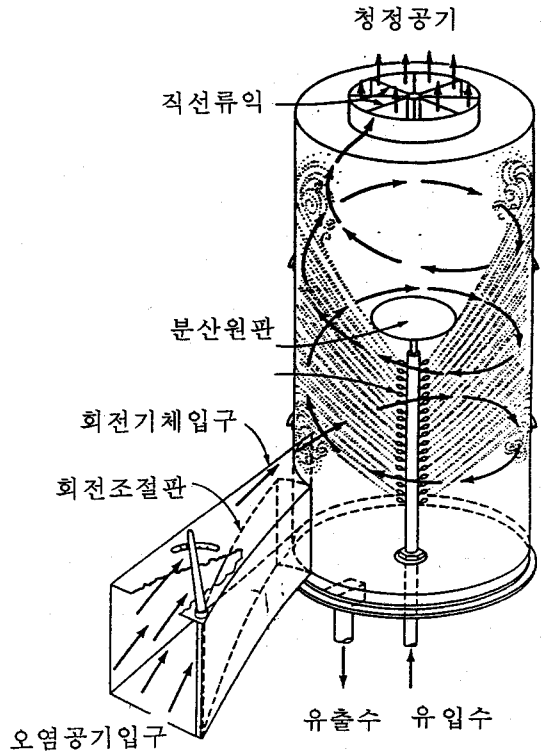


그림 3-6 사이클로닉 분사탑

(자료출처 : Air Pollution Manual. Part II - "Control Equipment." Detroit, Mich. : American Industrial Hygiene Assoc., 1968)

함유한 용액은 용액이 제거되어지는 바닥을 향해, 물의 분사장치는 사이클론의 입구에 위치한다. 일반적으로 출구에서는 미스트 제거 장치가 필요하다. 그림 3-6에 보이는 또 다른 형태의 사이클론 스크러버는 수직

원통의 하방으로 오염기체가 유입된다. 물은 축방향으로 설치된 다중노즐에서 유입되는데 노즐은 나선형의 기체유동에 의하여 물을 반지름 방향으로 분사시킨다. 분무지역 상방에 충분한 높이가 있다면 원통의 상부는 미스트 제거 장치의 역할을 하므로 출구에 미스트 제거 장치를 설치할 필요가 없게된다.

습식 사이클론에서 물의 순환량은 1000ft³의 처리기체에 대해 1-8gal의 범위이다. 압력강하는 장치내부구조에 의해 결정되는 변수이다. 일반적으로 습식사이클론은 100μm이상의 액적에 대해서는 100%, 50-100μm는 99%, 5-50μm는 90-98%의 집진효율을 가진다. 사이클론을 벤츄리 스크러버와 직렬로 사용하는 경우에 관한 설명은 다음 소절에 있다.

벤츄리 스크러버(VENTURI SCRUBBERS)

벤츄리는 사각이나 원형의 유로로서 단면이 좁은 목부분으로 축소되어 다시 원래 단면적으로 확대되는 것이다. 단면이 축소되는 부분에서 유체와 관계되는 일은 운동에너지로 변환되고 정압은 낮아지며 유속은 증가한다. 유속은 목부분에서 160-600ft/s (50-180m/s) 정도이다. 입구와 목부분의 면적비는 보통 4:1이다. 확대부분의 각은 양호한 정압회복을 위해 5°-7° 정도된다.

목부분(최적임) 혹은 축소부의 시작점에 물을 유입시켜 오염입자를 제거한다. 그림 3-7은 수직하방사각형의 목부분 분사 벤츄리 스크러버를 보여주고 있다. 목의 양쪽에 있는 노즐의 배열에서 고속의 기체유동으로 물을 분사한다. 오염입자 제거용 액체는 벤

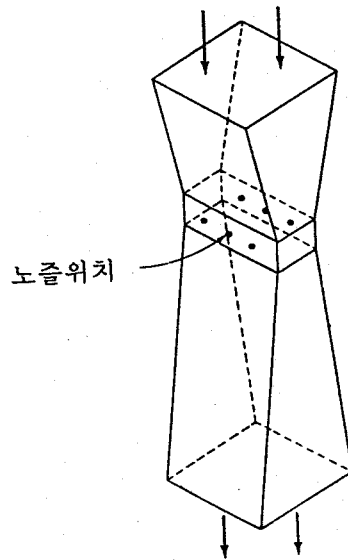


그림 3-7 목분사를 하는 수직하향 벤츄리 스크러버

츄리목의 양쪽에 위치한 칸막이나 선을 통하여 기체유동으로 분사되기도 한다. 고속의 기체는 기체유동에 분사되는 액체를 분산시킨다. 관성력에 의한 충돌을 충분히 발생시키기 위해서는 양호한 액적의 분사가 필수적이다. 일반적으로 벤츄리 목으로 유입하는 미립자의 속도는 기체유동의 속도와 같다고 가정한다. 반대로 청정용액체의 액

적은 초기에 축방향의 속도가 없으며 기체 유동의 항력에 의해 가속된다고 가정한다. 액적에 의한 미립자의 집진은 액적이 가속되는 동안 관성력에 의한 충돌에 의해 이루어진다. 액적의 속도가 기체의 속도와 같아지면(즉, 액적과 기체의 상대속도가 0이 되면) 목의 하류에서 관성력에 의한 충돌의 확률은 급속히 감소한다. 상대속도의 증가가 충돌 집진효율을 높게 하기 때문에 고속의 기체유입이 필수조건이다.

Ingebo(Drag Coefficients for Droplets and Solid Spheres in Clouds Accelerating in Airstreams, NASA Tech, Note 3762, 1965)는 액적의 가속은 액적지름의 함수임을 보여주고 있다. 액적의 속도를 기체속도의 90%까지 가속시키는데 필요한 거리 x 를 판정기준으로 설정하면, 근사치로서 다음 관계가 성립한다.

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{2d_1}{d_2} \quad (3-4)$$

여기서 1과 2는 $d_1 > d_2$ 의 서로 다른 크기를 의미한다. 예를 들어, $100\mu\text{m}$ 의 액적이 100ft/s 의 기체유동에 분사되는 경우에 액적이 기체유속의 90%에 도달하는 거리는 대략 16in 이며, $50\mu\text{m}$ 의 경우는 4in 이다. 이 데이터로부터 기체와 액체 사이의 큰 상대속도가 높은 충돌효율의 조건이라는 중요한 결과를 얻을 수 있다. 또한 충돌에 의한 집

진의 대부분은 확대부의 처음 몇 인치내에서 이루어짐을 알 수 있다. 나머지 길이는 적절한 압력의 회복에 필요한 것이며 전체 효율에 거의 영향을 주지 않는다.

벤츄리 스크러버에서 고속기체 유동의 에너지는 액체의 분무를 증가시키고 액적을 가속시키기 위해 이용된 것이기 때문에 다른 건식, 습식 집진기와 비교하여 큰 압력강하가 있는 것은 당연한 사실이다. 벤츄리 스크러버에서 압력강하를 측정하는 한 방법으로 Calvert등(Wet Scrubber System Study : Vol. I, Scrubber Handbook, PB 213-016, 1972)에 의해 개발된 방법이 있는데, 그것은 기체에너지의 감소분은 모두 벤츄리 목에서 액적을 가속시키기 위해 소모되었다고 가정한다. 벤츄리목에서 유동방향으로 dx 만큼의 요소에서 힘의 평형을 고려하면

$$dp = -\rho_L u_G \left[\frac{Q_L}{Q_G} \right] du_D$$

여기서 u_G 는 속도, Q 는 체적유량, L 과 G 는 액체와 기체를 D 는 액적을 의미한다. $x=0$ (액체 분사점)에서 x 방향으로 액적의 속도가 0으로 가정되는 점까지 적분하면

$$\Delta p = -\rho_L u_G \left[\frac{Q_L}{Q_G} \right] u_{D2}$$

여기서 u_{D2} 는 하류 x_2 지점에서 액적의 속도이다. 주어진 목길이에서 압력강하를 구

하기 위해 U_{D2} 와 x_2 사이의 관계식이 있어야만 된다.

벤츄리목에서 모델링을 위한 가정은 다음과 같다. (1) 기체속도 u_G 는 일정하며 목에서의 속도와 같다. (2) 유동은 1차원, 비압축성, 단열과정이다. (3) 모든 단면에서 액체가 차지하는 면적은 작다. (4) 액적의 증발은 무시한다($d_D = \text{일정}$). (5) 액적주변의 압력은 대기압이라 가정하여 압력힘은 0이다. 이러한 가정하에서 액적에 대한 힘의 평형을 취하면

$$m \frac{du_D}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_G (u_G - u_D)^2 A_D C_D \quad (3-5)$$

여기서 A_D 는 액적의 유동에 수직한 단면적이고 C_D 는 항력계수이다. 구형의 액적에서 이 식은

$$\frac{du_D}{dt} = \frac{3\rho_G C_D}{\Delta\rho_L d_D} (u_G - u_D)^2 \quad (3-6)$$

이 식을 거리에 관한 식으로 바꾸기 위해 $du_D/dt = u_D (du_D/dx)$ 따라서

$$\frac{du_D}{dx} = \frac{3\rho_G C_D}{\Delta\rho_L d_D u_D} (u_G - u_D)^2 \quad (3-7)$$

이 식을 풀기 위해 C_D 를 u_G 의 함수로 표현해야 한다. 분사점에서의 C_D 값을 C_{D0} 라 하면 Hollands와 Goel의 관계식("A general Method for Predicting Pressure Loss in Veturri Scrubbers" Ind. Eng. Chem. Fundam.

14, 1975 : 16-22)에서

$$C_D = C_{D0} \left[\frac{u_G}{u_G - u_D} \right]^{0.5} \quad (3-8)$$

여기서 C_{D0} 는 다음과 같이 주어진다.

$$C_{D0} = 0.22 + \frac{24}{Re} [1 + 0.15(Re)^{0.6}]$$

식 (3-8)은 레이놀즈가 10-500의 범위에서 적용되어 질 수 있다. 식 (3-8)을 식 (3-7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{u_D du_D}{(u_G - u_D)^{1.5}} = \frac{3\rho_G C_{D0}}{\Delta\rho_L d_D} (u_G)^{0.5} dx \quad (3-9)$$

적분의 범위는 (1) $x=0$ 에서 $u_D=0$

(2) $x=L$ 에서 $u_D=u_{DL}$

여기서 L 은 목부분의 전체길이이다. 적분하면

$$u_{DL} = 2u_G [1 - m^2 + (m^4 - m^2)^{0.5}] \quad (3-10)$$

여기서

$$m = \frac{3\rho_G C_{D0} L}{16\rho_L d_D} + 1 \quad (3-11)$$

벤츄리 목에서의 압력강하 식 (3-5)를 이용하여 무차원화 하면

$$\frac{p_1 - p_2}{1/2\rho_G u_G^2} = \Delta \left[\frac{p_L}{p_G} \right] \left[\frac{Q_L}{Q_G} \right] [1 - m^2 +$$

$$(m^4 - m^2)^{0.5}] \quad (3-12)$$

여기서 $1/2\rho_G u_G^2$ 는 “단일속도 수두”이다. 벤튜리의 목이 충분히 길다면 u_{DL} 은 u_G 에 일치할 것이다. 이 경우 식 (5-12)의 [] 내의 값은 0.5가 되어서

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -p_L u_G^2 \left[\frac{Q_L}{Q_G} \right] \quad (3-13)$$

압력강하를 수두로 표현한다면

$$\Delta p = -1.02 \times 10^{-3} u_G^2 \left[\frac{Q_L}{Q_G} \right] \quad (3-14)$$

여기서 Δp 는 cm 단위이며 u_G 는 cm/s, Q_L 과 Q_G 는 같은 단위로 표현된다. 많은 종류의 벤튜리 스크러버를 통한 실험결과를 기초로 하며 Hesketh(“Fine Particle Collection Efficiency Related to Pressure Drop, Scrubbant and Particle Properties, and Contact Mechanism.” J. Air Pollu. Control Assoc. 24, No. 10, 1974 ; 939-942)는 압력강하를 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\Delta p = \frac{V_{gt}^2 \rho_g (A)^{0.133}}{507} (0.56 + 0.125L + 2.3 \times 10^{-3} L^2) \quad (3-15)$$

여기서 Δp 는 벤튜리의 압력강하로서 inch 단위이고 V_{gt} 는 목에서의 기체속도(ft/s), ρ_g 는 벤튜리목에서 하류쪽의 기체밀도

(pounds/ft³)이다. A는 벤튜리목부분의 단면적(ft²)이며 L은 액체와 기체의 비로서 gal/1000ft³이다. 식 (3-14)와 식 (3-15)는 벤튜리 스크러버에서 널리 사용되는 압력강하식이다.

벤튜리 스크러버는 기체유동으로부터 입자를 제거하는데 광범위하게 응용되고 있으나 신뢰할만한 집진효율에 관한 식이 부족하다. Calvert(Wet Scrubber System Study : Vol. I, Scrubber Handbook, PB 213-016, 1972) 등은 액적의 크기, 관성충돌 변수, 벤튜리 목에서의 액적의 농도, 입자와 액적간의 연속적으로 변하는 상대속도 등을 고려한 해석에 근거를 둔 입자침투(Particle Penetration)에 대한 발전을 정리하였다. 입자침투(Pt)는 다음과 같이 정의된다.

$$Pt = 1 - \text{efficiency} \quad (3-16)$$

이것은 집진효율이 100%에 근접할 때 유용한 변수이다. 여러가지 단순화하는 가정을 적용시킨 Calvert 등에 의한 결과식은

$$Pt = \exp \left[- \frac{6.1 \times 10^{-11} \rho_L \rho_P K_c d_P^2 f^2 \Delta p}{\mu_g^2} \right] \quad (3-17)$$

여기서 Δp 는 벤튜리 압력강하로서 cm이다. μ_g 는 기체점성(kg/m.s)이며, ρ_L 은 액체의 밀도(g/cm³), ρ_P 는 입자의 밀도(g/cm³), d

ρ 는 입자의 지름(μm)이다. 또한 f 는 실험계 수로서 0.1~0.4이다.

Calvert 등의 최근연구("Venturi Scrubber Performance Model." Environ Sci. Tech. 12, No. 4'1978 ; 456-459)에서 입차침투에 대한 또다른 표현들이 있다. 미소체적에서 입자의 농도변화 dC 는

$$-\frac{dC}{C} = \frac{1.5(u_G - u_D)}{u_G d_b} \left[\frac{Q_L}{Q_G} \right] \eta dx \quad (3-18)$$

여기서 η 는 단일액적에 대한 효율이다. 이것은 다음과 같은 물리적 해석으로부터 주어진다. 직경 0인 유속선에 크기 d_p 인 하나의 액적이 있고 크기 d_p 의 균일하게 분포된 입자들이 있다고 생각하자. 액적이 가속되어도 입자 일부는 액적이 기체 혹은 입자의 속도 u_G 에 도달하기 전에 액적에 포집된다. 이 일부는 단일액적 효율 η 으로 정의된다. 실험적 고찰로부터 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\eta = \left[\frac{2N_1}{2N_1 + 0.7} \right]^2 \quad (3-19)$$

여기서 N_1 은 식 (3-3)에서 정의된 바와 같다. 세번째로 요구되는 식은 액적의 속도에 대한 식 (3-10)이다. 이 세가지 식은 특성속도 u_{G0} 를 입구 기체속도로, $2d_b \rho_L 1.3D_0 = \rho_G$ 를 특성길이로, 그리고 입구 입자농도 C_i 를 특성입자농도로 이용하여 무차원화할

수 있다. 무차원화된 식을 적분하면, (참고문헌 "Venturi Scrubber Performance Model" (Environ, Sci. Tech. 12, No. 4' 1978 ; 456-459)을 보라) $(\ln P_t)/B = I_n(C_L/C_i)/B$ 의 형으로 표현되는 복잡한 식이 되는데 여기서 B 는 $B = Q_L \rho_L / Q_G \rho_G C_{D0}$ 이다. 이 식 대신 $(\ln P_t)/B$ 와 무차원 목길이 $L^* = 3C_{D0} \rho_{GL} / 2d_b \rho_L$ 을 그림 3-8에 나타내었다. 이 그래프에서 목길이 L 이 길수록 스크러버의 총돌효율이 높다는 것을 보여준다. 이 관계는 큰 값의 N_1 , 즉 큰입자에서 더욱 잘 나타난다. 일반적으로 L^* 는 2-3이면 충분함을 알 수 있다. 이보다 더 큰 L^* 에서는 스크러버 성능의 증가가 적음을 알 수 있다.

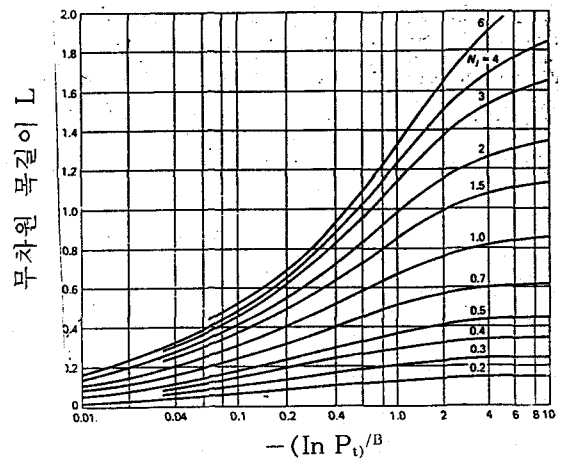


그림 3-8 벤투리 스크러버의 입차침투

실험데이터로부터 Hesketh("Fing Particle Collection Efficiency Related to Pressure Drop, Scrubbant and Particle Properties,

and Contact Mechanism.” J. Air Pollu. Control Assoc, 24, No. 10, 1974 ; 939-942) 는 벤튜리 스크러버는 5 μ m 이상의 입자는 100%의 효율을 가지고 있다고 결론을 내리고, 따라서 5 μ m 이하의 미립자의 침투에 관하여 연구하였다. 이 연구로부터 그는 직경 5 μ m 이하의 입자의 집진효율은 침투값으로 표시하면, 다음 식과 같이 벤튜리를 통한 압력강화와 관계가 있다는 것을 발견하였다.

$$Pt = \frac{C_o}{C_i} = 3.47(\Delta P)^{-14.3} \quad (3-20)$$

여기서 C_i 는 벤튜리 스크러버로 유입되는 5 μ m 이하의 입자 중량농도이고 C_o 는 벤튜리 스크러버에서 유출되는 5 μ m 이하의 입자 중량농도이다. 또한 ΔP 는 inch단위의 압력강하 수두이다.

Hesketh는 또한 스크러버에서 가습용제가 사용된 경우 하전된 입자의 집진과 침투에 관하여 식 (3-17)과 유사한 식을 발표하였다.

벤튜리 스크러버에서 물의 순환비는 2-12gal/1000ft³이다. 그러나, 다른 전·습식 집진기에서와 마찬가지로 이 장치에서 더 중요한 점은 압력강하이다. 압력강하는 3~100in. water인데 요구되는 제거효율에 의존하는 값이다. 벤튜리 스크러버의 가장 중요한 잇점은 매우 작은 입자일지라도 큰 통

풍손실을 이용하여 높은 효율을 갖는다는 것이다. 1 μ m 이하의 입자는 99%까지 5 μ m의 입자는 99.5%까지 효율을 얻을 수 있다. 벤튜리 스크러버에서 집진효율과 입자크기의 관계는 그림 3-9에 보인 바와 같다. 입자크기가 1 μ m 이하의 범위에서는 높은 제거효율을 얻기 위해 높은 압력강하를 필요로 한다는 것을 명백히 할 수 있다. Shaheen(Environmental Pollution. Mahomet, Ill. : Engineering Technology, Inc., 1974) 등에서의 데이터는 그림 3-9보다 약간 낮은 효율을 나타낼 수 있으나 같은 압력강하에 대해서 그 경향은 같다.

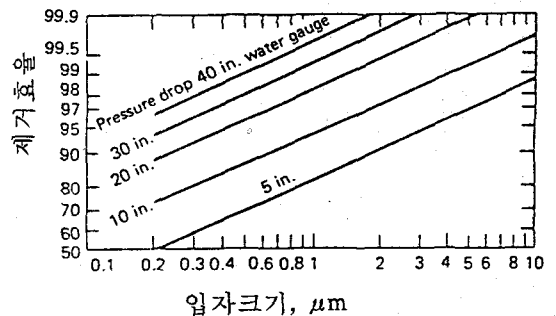


그림 3-9 벤튜리 스크러버에서 집진효율과 입자크기의 관계

(자료출처 : Air Pollution Manual. Part II - "Control Equipment." Detroit, Mich. : American Industrial Hygiene Assoc., 1968)

집진장치로부터 위와 같은 효율을 얻으려면 먼지를 함유한 액적이 벤튜리 스크러버를 통과한 후 기체유동에서 제거되어야만 된다. 먼지를 함유한 액적을 제거하는 일반

적인 방법은 기체유동을 벤츄리 통로에 연결된 사이클론 분리기를 통과시키는 것이다. 또 다른 방법으로서 기체를 유체침전대(fluidized packed bed)로 통과시키는 방법이 있다. 그림 3-7과는 다른 벤츄리 설계의 변형이 가능한데 예를 들면 다른 벤츄리와 평행하며 flooded-disk 벤츄리로 알려진 형상으로 위어를 넘쳐 흐르는 물을 공급하게 되어 있는 제트 주입기가 사용될 수 있다.

우리는 습식집진기의 세가지 기본형태(그리고 충돌판에 의한 모사)에 대해서만 설명하였으나 다른 형태들도 유용하다. 팩드베드(Packed-Bed) 벤츄리는 분무탑과 유사한 장치인데 구형 등의 다양한 패킹을 포함하고 있다. 물은 기체유동과 반대방향으로

패킹을 통과하여 하방으로 흐른다. 물에 젖은 표면이 넓을수록 기체가 패킹부를 통과하면서 많은 먼지를 제거하게 된다. 팩드베드의 종류로서 고착베드, 유체화베드, 범람베드 스크러버 등이 있다. 침수 오리피스(submerged orifice)와 원심팬 스크러버는 일반적인 기계식 스크러버의 범주 뿐만 아니라 두가지 다른 중요한 범주에 속한다.

습식 스크러버의 크기는 500N120,000ft³/min 그리고 비용은 1979년 현재 ft³/min의 청정용량에 대해 \$0.35~\$5.00 가량 소요된다. 매년 설치비는 100% 이상, 운전비는 ft³/min 당 \$0.75~\$2.50 가량이다. 부식성 물질을 집진하는 경우에는 유지비가 많이 들 수도 있다.

정부시책

한국전력 전기요금 인상
 -월 3백 KW이상 소비가정 증과-
 <전기요금 조정내역>

(단위=원·Kwh)

구	분	현	행	조	정	인상률(%)
가 정 용	0~ 50 Kwh	30.7	현	행	-	-
	50~100 "	68.5	"	"	-	-
	100~200 "	89.5		102.9	15.0	
	200~300 "	129.4		148.8	"	
	300~ "	"		215.0	66.2	
업 무 용 (6 ~ 8 월 限)	저 압	54.5		74.4	36.5	
	고 압 A	53.2		72.8	36.8	
	고 압 B	52.1		71.1	36.5	
산 업 용 甲 (6 ~ 8 월 限)	저 압	37.7		45.5	20.7	
	고 압 A	37.5		45.3	20.8	
	고 압 B	37.1		44.9	21.0	
乙	고 압 A 주간	44.2		60.9	37.8	
	고 압 B 주간	42.6		58.8	38.0	

※ 주 : 농사용·심야전력·가정·업무·산업용의 기본요금은 동결.