

입자제어장치 (Particulate Control Equipment) (II)

생 산 기 술 연 구 원
(기계기술실용화센터)
부교수 오 명 도

4. 직물 필터 (Fabric Filters)

여과법은 carrier gas로부터 미립자를 분리시키는 가장 오래되고 가장 널리 사용되는 방법중의 하나이다. 필터는 일반적으로 carrier gas가 필터의 틈을 통과하면서 미립자를 포획하는 과립상이거나 섬유질의 다공성 재질이다. 필터는 carrier gas와 미립자에 적합한 물질로 이루어져 있으며, 깊은 침상(deep beds), 매트(mat), 또는 섬유상(적물)으로 배열되어 있다. 매트와 깊은 침상의 필터는 총부피의 97%에서 99%에 달하는 많은 틈공간(void space)을 가지고 있다. 이것들은 매우 작은 먼지부하에 사용되고 오랜기간동안 유지되도록 설계되어 있다. 일반적으로 이것들은 주기적으로 비교적 짧은 기간으로 세정되어진다. 직물 필터는 보통 원통형 튜브로 형성되어 있고, 가스통로에 대해 큰 표면면적을 제공하기 위하여 다중으로 줄을 지어 매달려 있다. 직물 필터는 $0.5\mu\text{m}$ 입자들을 포집할 때에는 99%나 더 좋은 효율을 가지고 있고, 상당한 양의 $0.01\mu\text{m}$ 입자들을 제거할 수 있다. 다룰 수 있는 전형적인 먼지 부하는 0.1에서 $10\text{gr}/\text{ft}^3$ 의 가스(0.23 에서 $23\text{g}/\text{m}^3$)이다.

직물조직은 보통 air-space-to-cloth area ratio를 1:1에서 5:1로 가지고 있으며 따라서, 간단한 걸림작용(seive action)이 아닌 어떤 현상이 초기 입자분리를 맡고 있다.

앞서 논의된 미립자 포집의 6가지 일반적인 메카니즘들 중에서 중요한 여과 메카니즘들은 관성충돌작용(inertial impaction), 직접차단작용(direct interception)과 확산작용(diffusion)이다. 정전기적 인력은 어떤 형태들의 먼지들과 어떤 역할을 한다. $1\mu\text{m}$ 보다 큰 입자들은 주로 충돌과 확산에 의해 포집되고, 반면에 0.001 에서 $1\mu\text{m}$ 는 주로 확산과 정전기적 인력에 의해서 제거된다. 서로 다른 메카니즘에 의해 포집된 먼지의 상대적인 크기들은 현재 계산될 수 없으며, 부가적인 연구가 이 방면에 필요하다.

직물 필터의 단점들중의 하나는 타당치 않은 압력감소를 피하기 위하여 비교적 빈번한 세정이 필요하다는 것이다. 결과적으로 공업적 필터의 기본설계는 비교적 용이한 세정을 제공하는 형상으로 예측될 수 있다. 그러나, 또 다른 기하학적 고려는 오염된 가스의 체적유량율에 대해 큰 표면면적을 가져야 한다는 것이다. 이 비율의 역수 값은 air-to-cloth ratio 또는 filtering ratio로 알려져 있고, 최적값들은 1에서 8ft/min(0.5에서 4cm/s)의 범위에 있다. 이것은 또한 가상 가스속도(superficial gas velocity)이다. 이러한 기준들을 만족시키는 하나의 기본적인 방법은 그림 4. 1에 보여진 bag house에 근거한 포집시스템이다. 지름이 5에서 14in 길이가 최고 40ft인 직물 cylinder(내부적으로 어떤 방식으로 지지되는)가 수직으로 줄

지어 배열되어 있다. 큰 가스 부피들이 청정화될 때 많은 개개의 bag들이 한 개의 bag house를 구성한다. 큰 자동 주물공장에서로부터 한 시간당 6톤의 먼지와 연기를 제거할 수 있는 큰 bag house는 지름이 7.64in이고 길이가 22.5ft인 총 4000 Dacron bag들을 가지고 있는 16개의 칸막이방(compartment)들로 구성되어 있다. 이러한 bag house 설계의 하나의 본질적인 단점은 장비의 전체 크기가 다른 경쟁적인 형태들의 제거장치들에 비하여 크다는 사실이다.

일반적으로 더러운 가스가 밑바닥에서 bag으로 들어오고 직물을 통과하고 동시에 미립자는 bag안에 침전된다. 비록 다양한 bag house 설계들이 있지만 이것들은 일반적으로 세정방법과 작동이 주기적(또는 간헐적)이고 연속적인 자동이나에 따라 분류될 수 있다. 주기적인 작동은 세정을 위하여 규칙적인 간격으로 bag house의 일부분이 작동을 중단해야 한다. 연속적인 자동 작동은 주기적인 작동중지가 바람직하지 않거나 실용적이지 않는 경우에 필요하다(간헐적인 작동은 filter cloth를 세정하기 위하여 전체 프로세서의 작동을 중단해야 한다. 더러운 가스는 세정 사이클중에 장치를 비켜 지나가게 된다. 이러한 형태의 설계는 매우 작은 방출물들이 세정없이 대기중으로 방출될 수 있기 때문에 제한되게 사용된다.). 세정은 기계적인 진동(mechanical

vibration) 또는 요동(shaking), 펄스 제트(pulse jet)와 역기류를 포함하는 다양한 방식으로 수행되고 있다. 기계적인 요동을 가지고 있는 bag house는 그림 4. 1에 보여지고 있다. 이러한 형태의 세정은 종종 단위 체적유량을당 가장 낮은 비용을 제공하게 된다. 직물조직을 가지고 있는 shaker bag house에 대한 최대 여과 속도는 2에서 3.5ft/min(0.6에서 1.0m/min)의 범위에 있다.

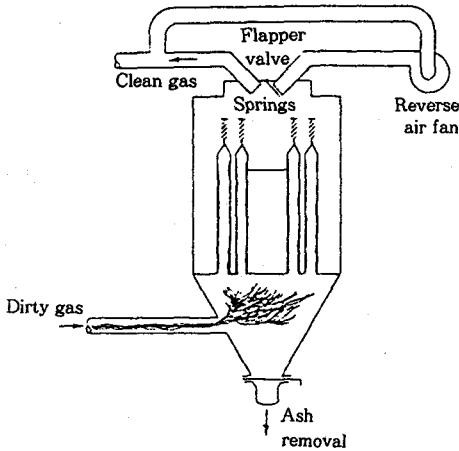


그림 4. 1. 기계적인 요동을 하는 전형적인 bag house. (Courtesy of Wheelabrator Frye, Inc. Mishawaka, Ind.)

역기류시스템은 그림 4 .2.에서 보여지고 있다. 미립자는 기계적 요동방법과 유사하게 bag내에서 포집된다. 적당한 때에 오염 공기의 유동은 칸막이로부터 차단되고 세정 공기는 반대방향으로 bag을 흘러 간다. 역류 세정에서 20ft(6-7m) 또는 더 긴 bag을 사용하는 것이 경제적이다. Bag 지름은

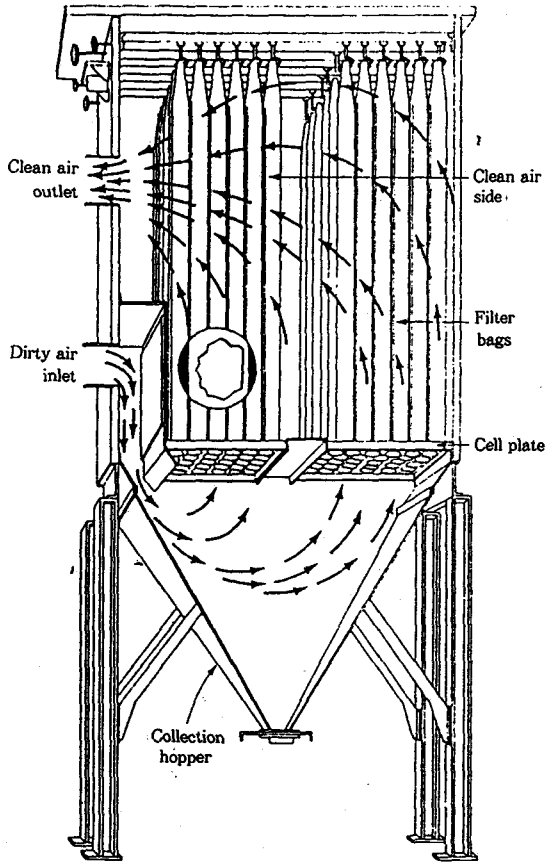


그림 4. 2. 역류에 의한 세척을 하는 bag house

전형적으로 8에서 12in 범위에 있으며, 여과 속도가 약 6에서 12ft/min(2에서 4m/min) 정도가 추천되고 있다. 그림 4.3.은 펄스 제트 시스템을 보여주고 있다. 미립자는 bag의 바깥에 포집된다. 적당한 때에 짧은 펄스의 압축공기가 bag의 상단에서 벤튜리를 통하여 아랫방향으로 흐르게 된다. 그 펄스는 bag의 아래로 빠르게 흐르고 bag으로부터 큰 먼지층에 부딪히게 된다. 이러한 많은 양의 먼지는 중력에 의해 bag

house의 바닥에 가라 앉게 된다. 한개의 bag을 세정하는 시간은 매우 짧고 오직 bag들의 일부분만이 한번에 세정이 되기 때문에 연속적인 유동이 bag house를 통하여 유지되어야 한다. 펄스제트시스템에서의 전형적인 여과 속도는 5에서 15ft/min의 범위내에 있다. 후자의 bag 높이는 보통 15ft (5m)보다 작다. 왜냐하면 아주 긴 bag들의 밑바닥은 잘 세정되지 않는다는 것이다. 이러한 시스템들의 더욱 자세한 내용은 문헌 (NAPCA, Air Pollution Manual, R.D.Ross)에 나타나 있다.

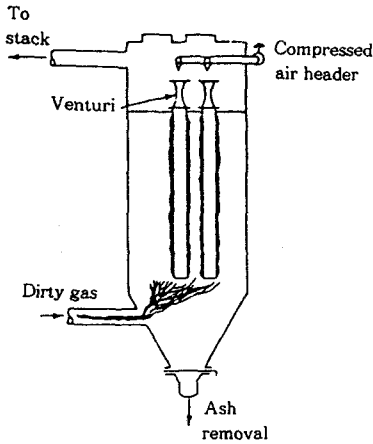


그림 4. 3. 펄스제트에 의한 세척을 하는 bag house

다양한 직물들을 사용할 수 있다. 보통 사용되고 있는 것들중에서 모직물(wool), 무명(cotton), 나일론, 유리섬유(glass fiber), 폴리에스테르, 방향족의 폴리아미드

(aromatic polyamides) 등이 있다. 직물의 선택은 미립자의 물리적이고 화학적인 조성 뿐만 아니라 가스의 화학조성, 온도와 습기 함유량에 의존한다. 가스유동과 미립자 둘다의 화학조성은 직물이 닳아버리는 율에 영향을 미친다. 무명 또는 모직물 직물의 경우는 온도가 175°에서 200°F(300°K)의 가스에 대해서 채택될 수 있는 반면에 유리섬유는 가스온도가 500°에서 550°F(약 550°K)까지의 범위일 때 더욱 적당하다. 현재 이 온도 구간을 증가시키기 위해 섬유개발연구를 계속하고 있지만, 후자의 범위의 온도는 현재 한계점이다. 보다 높은 작동온도의 잇점은 열적 제어 요구조건들이 부수적으로 감소하는 데 있다. 즉, 직물 필터 장치로 들어가기 전에 뜨거운 가스유동의 예냉각을 덜 해도 된다는 것이다. 게다가 과도한 가스 냉각은 보통 허용되지 않는 데 그 이유는 bag house는 일반적으로 이슬점 아래로 냉각된 가스에 대해서는 작동하지 않기 때문이다. 그러나 더 적은 가스 냉각을 통하여 얻어진 절약은 필터를 지나가는 가스 부피가 온도증가로 커지기 때문에 다소 상쇄되어 진다.

Filter bed로의 관성충돌에 대한 포집이론은 습식 집진기(wet collector)에 대해 일찌기 개발된 간단한 이론보다 훨씬 더 복잡하다(Section 3을 보라). 이 후자의 경우에서는 어떤 상대속도를 가지고 있는 두개의 구

형의 물체들 사이에서 발생하는 것처럼 충돌을 모델화시키는 것이 적당하다. 직물여과법(직물 filtration)의 경우에는 초기 모델이 정지하고 있는 실린더에 다가가는 이동하는 구의 경우였는지도 모른다. 그러나 일단 한개의 초기의 먼지층이 섬유에 붙기만하면 형상은 매우 복잡해진다. 그 직물 섬유뿐 아니라 붙어 있는 먼지는 부가적인 미립자의 침착에 대한 표적으로 작용한다. 분명히 표적들은 계속적으로 시간에 대해 공간적으로 변하고 있다. 그럼에도 불구하고 여과모델에 대한 타당한 시작점은 구들의 실린더로의 충돌을 고려하는 것이다.

지름 d_f 의 실린더형의 섬유에 다가가는 먼지가 적재된 가스를 고려하자(예를 들어, 섬유의 단위길이당의). 섬유의 단면적을 유동에 평행한 방향으로 상류에 투영한다면 투영된 면적내에 있는 교란되지 않은 유동 상류에 있는 입자들만이 곧바로 실린더에 충돌할 수 있다. 결과적으로 이 경우에서의 충돌 또는 표적 효율은 상류에 있는 투영된 면적을 통과하여 실린더의 포집면적을 부딪히는 주어진 크기를 가진 입자들의 부분으로서 정의되어 진다. 이 효율은 약간의 입자들이 가스유동의 유선들을 따라서 실린더 주위로 옮겨져서 실린더주위에서 떨어져 버린다는 간단한 이유때문에 100%가 안된다(그림 4.4.(a)를 보라). 효율은 주어진 크기에 대한 것이고, 따라서 관성의 질량에

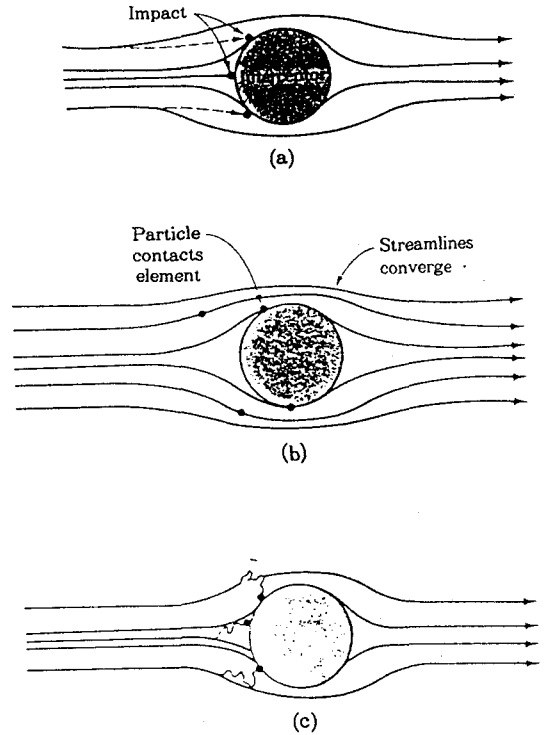


그림 4.4. 기계적 미립자제거에 대한 세가지 메카니즘 (a) 관성충돌작용 ; (b) 직접 차단작용 ; (c) 확산작용

대한 의존성때문에 크기에 따라 상당한 변할 것이라는 것을 기억해야 한다. 습식집진기에 대해서 앞서 개발된 이론과 유사한 방식으로 표적효율은 식(3-3)에 의해 주어진 충돌 또는 분리수(separation number) N_1 의 함수라는 것이 밝혀져 있다.

$$N_1 = \frac{V_p d_p^2 \rho_p K_c}{18 \mu_s d_f} \quad (4-1)$$

여기서, 액적지름 d_p 는 이 경우에는 섬유 지름 d_f 로 대체되어 졌다. Stokes'law가 입자운동에 유효하다고 가정하면 충돌 또는 표적효율 대 충돌갯수에 대한 하나의

실험상관관계가 실린더형 표적에 대해서 그림 3-1과 같다. 주어진 입자크기와 밀도와 가스유동물성치들에 대해서 이 상관관계는 가장 높은 표적효율은 필터가 작은 지름을 가진 섬유들로 구성될 때 달성될 것이라는 것을 보여주고 있다.

또다른 중요한 고찰사항은 직물여과기를 가로지르는 압력강하이다. 필터 "cake"가 지지하는 직물에 축적됨에 따라 제거효율이 증가되리라 기대된다. 동시에 유동에 대한 저항도 증가된다. 비교적 깨끗한 여과천의 경우에 압력강하는 약 1/2 in. water(1.2 mbar) 근처이고, 제거효율은 낮다. 2에서 3in. water의 draftloss의 경우에는 충분한 cake가 만들어 진 이후에 효율이 99%에 달한다. 압력강하가 5에서 6 in. water에 다 가갈 때 압력강하를 더욱 타당한 값으로 줄이기 위하여 어떤 방법으로 필터를 세정하는 것이 보통 필요하다. 그렇지 않으면 에너지 경비가 과다해진다. 전체압력강하는 먼지층이 기여하는 압력과 직물에 의한 압력의 합이다. 직물과 침전된 먼지층을 통과하는 유동은 점성이라고 가정되어 진다. 그리하여 먼지층과 세정된 필터 둘다에 대한 압력강하는 Darcy's equation에 의해 표현되며 보통 다음과 같다.

$$\frac{\Delta P}{X} = \frac{V\mu_g}{K} \quad (4-2)$$

K는 먼지 또는 필터 투과율(filter

permeability), V는 가상 가스속도, X는 필터두께이다.

Darcy 방정식에 있는 V는 bed를 통과하는 가상 속도 즉, 필터로 다가가는 체적유량을 천면적으로 나눈 것이다. 식(4-2)는 실제로 투과율 K의 정의이다. 왜냐하면 방정식에 있는 모든 다른 것들은 쉽게 결정되는 매매변수들이기 때문이다. K는 다공성(porosity), 비표면적(specific surface area), 기공크기분포(pore size distribution)와 입자크기분포와 같은 침전된 입자의 물성치들의 함수이기 때문에 직접적인 측정없는 예측하기 매우 어려운 양이다.

전체압력강하 ΔP_o 는 필터천과 침전된 미립자를 가로지르는 압력강하의 합이다. 그리하여 이것은 Darcy 방정식에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P_o = \Delta P_f + \Delta P_p = \frac{k_f \mu_g V}{K_f} + \frac{k_p \mu_g V}{K_p} \quad (4-3)$$

여기서 f와 p는 세정된 직물과 미립자 또는 먼지층을 각각 뜻한다. 필터천압력강하, ΔP_f 는 주어진 천재질과 먼지에 대해 근본적으로 상수이어야 한다. 결과적으로 전체압력강하는 먼지층이 세정된 천에 만들어지기 때문에 ΔP_p 의 변화에 우선적으로 의존하게 된다. 주어진 작동조건들(가스점성계수와 가상 속도)에 대해서 ΔP_p 는 우선적으로 먼지투과율 K_p 와 먼지층두께 X_p 의 함수이다. 연이어 먼지층두께는 곧바로 작동시간 t의

함수이다.

먼지층을 가로지르는 압력강하 ΔP_p 의 시간에 대한 변화를 표현하는 식이 첫번째 원리들로부터 개발될 수 있다. 이 사실은(개시후부터) 시간 t 동안 포집된 먼지의 질량이 가스의 체적유량을 \times 시간간격 \times 단위체적당 가스유동내에 있는 먼지의 질량 L_d 와 같다는 것을 인식함으로써 성취될 수 있다. 그러나 포집된 질량도 필터표면상에 있는 미립자의 밀도 ρ_c , X 시간 t 동안 포집된 먼지의 체적과 같다. 이 두개의 양을 같다고 놓으면 아래와 같은 식을 쓸 수 있다.

$$\text{mass collected} = (VA)(t)(L_d) = \rho_c(Ax_p) \quad (4-4)$$

여기서 A 는 필터의 단면적, V 는 필터의 수직방향으로의 가스속도, L_d 는 먼지적재량으로 알려져 있다. 식 (4-4)로부터 $x_p = VL_d t / \rho_c$ 임을 알 수 있다.

그리하여 새로운 먼지침전층을 가로지르는 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P_p = \frac{x_p \mu_g V}{K_p} = \frac{VL_d t}{\rho_c} \left[\frac{\mu_g V}{K_p} \right] = \frac{V^2 L_d t \mu_g}{K_p \rho_c} \quad (4-5)$$

μ_g , ρ_c , K_p 는 주어진 가스유동과 미립자에 대해서 한개의 값들만 존재하기 때문에 이것들을 함께 저항매개변수, R_p 로 합치면 정의에 의해 다음과 같다.

$$R_p = \frac{\mu_g}{\rho_c K_p} \quad (4-6)$$

결과적으로 식 (4-5)는 다음과 같은 형

태로 간단해질 수 있다.

$$\Delta P_p = R_p V^2 L_d t \quad (4-7)$$

L_d 와 V 는 이 개발에서 필터사이클중에 변하지 않는다고 가정한다. 주어진 가스특성치들과 필터 cake 투과율에 대해서 침전된 미립자를 가로지르는 압력강하는 가스유동에 있는 가스적재량과 시간에 따라 선형적으로 변한다는 사실을 알 수 있다. 이것은 또 이러한 이론의 근거에서 가상 가스속도의 제공으로 변한다. 또 다른 곳(F.R. Culhane)에서 지적된 바에 의하면 압력강하는 실제적으로 필터링속도의 제곱함수인 것보다는 지수함수처럼 변한다고 했다.

가상 가스속도 V 에 대한 미립자압력강하 ΔP_p 의 비는 필터항력 S 라고 부른다. 비록 N_{min}/m^3 과 같은 단위라면 적당할런지 모르지만 이것은 in. water/ft/min의 단위로 종종 표현되어지고 있다. 가스유동에 수직인 단위면적당 시간 t 에서의 포집된 먼지의 질량 W 에 대해서 S 에 대한 식을 유도하는 것이 편리하다. 식 (4-7)은 다음과 같은 필터항력에 대한 형태로 표현할 수 있다.

$$S = \frac{\Delta P_p}{V} = R_p V L_d t \quad (4-8)$$

또한, 식 (4-4)와 연결하여 위에서 정의된 W 의 값은 다음과 같이 표현될 수 있다.

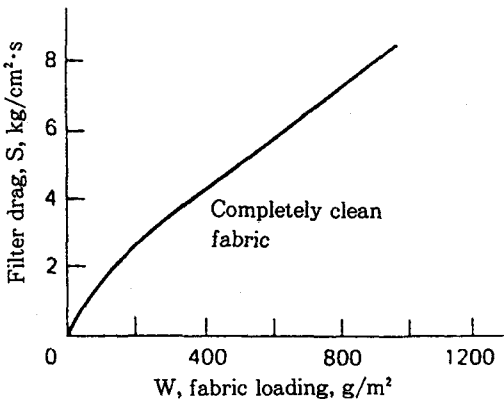
$$W = \frac{\text{mass collected}}{A} = \frac{V A t L_d}{A} = V L_d t \quad (4-9)$$

이 두개의 식을 결합함으로써 필터항력은

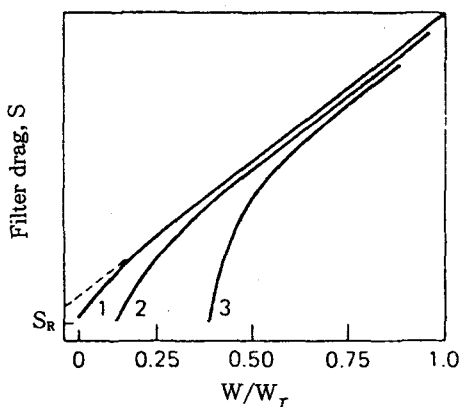
간단히 다음과 같이 주어진다.

$$S = R_p W \quad (4-10)$$

W의 단위는 grains per square foot 또는 grams per square meter일 것이다. 주어진 가스유동의 조건들과 입자 특성치들에 대해서 식 (4-10)은 필터항력이 W에 대해서 선형적으로 변해야만 한다는 것을 나타내어 준다. 현실적으로 그 경향은 그림 4.5.(a)에 있는 곡선과 더욱더 유사하다. 그 곡선



(a)



(b)

그림 4.5. 매개변수 S와 W에 대한 직물 필터의 성능곡선

의 초기의 비선형부분에서 새로운 필터 cake는 세정된 필터층에서 형성되고 있고 유동에 대한 저항은 먼지층에 있는 비균질영역들이 채워질 때까지 급속히 증가한다. 일단 매우 균일한 bed가 만들어지면 필터항력은 면적밀도 W에 대해 선형적으로 변하게 된다.

세정사이클이 시작되면 필터항력곡선의 위치는 보통 그림 4.5.(a) 보여진 것들과는 매우 다르게 된다. 그림 4.5.(b)는 몇가지 가능성들을 보여주고 있다. 곡선 (1)은 최대가능세정이 일어나는 상황이다. 약간의 먼지가 세정후에 직물여과기에 남아있기 때문에 잔여항력 S_R 이 존재한다. 곡선 (2)는 매우 효율적인 woven 직물의 세정을 표시하며 여기서 직물상의 잔여적재량은 최종적재량의 5에서 10%가 된다. 이 경우에 세정후의 W의 값은 약 20에서 50g/m²(0.07에서 0.15oz/ft²)일 것이다. Woven 직물에서 사이클의 끝에서의 W_T 의 값은 750에서 1000g/m²에 달할 수 있다. 그림 4.5.(b)에서의 곡선 (3)은 기계적 요동(mechanical shaking)에 대한 평균세정범위를 의미하며 먼지의 상당부분이 필터표면상에 남아있다. 성능곡선의 실제위치는 제거방법 뿐만아니라 직물의 형태에 의존한다. 이러한 형태의 실험측정값들로부터 침전된 먼지의 투과율은 결정될 수 있다. 잔여항력 S_R 의 값들은 남아있는 먼지가 최소인 세정된 직물의 경

우에 전형적으로 0.2에서 0.8 in. water/ft/min(100에서 500Nmin/m³)까지 변한다.

여과천상에 포집된 먼지는 여과매체로서 작용하기 때문에 세정중에 먼지층의 제거는 포집효율에 영향을 주게 된다. 이 사실은 그림 4.6.에 표시되어져 있으며 여기서 부

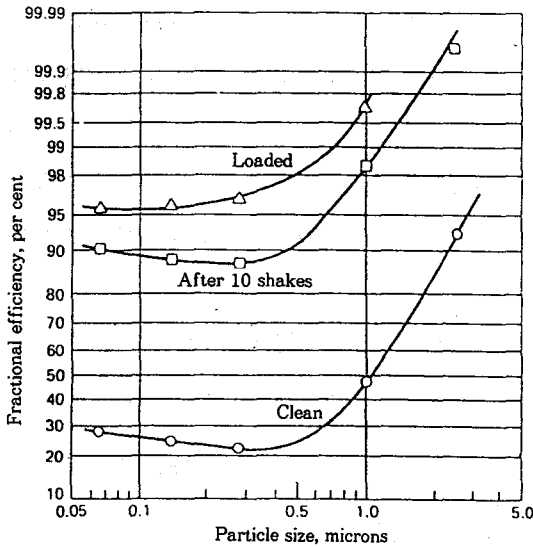


그림 4.6. 직물필터의 부분효율곡선 (Courtesy of the Torit Corporation)

분효율이 세정된 상태와 적재된 상태에 있는 전형적인 직물여과기의 경우의 입자크기에 대해서 그려져 있다. 세정된 상태에서 효율이 0.1과 0.5 μ m 사이의 크기에 대해서 90% 아래로 떨어지지만 1 μ m 이상의 입자들에 대해서는 98% 이상이 남아 있었다. loaded 상태로 다가감에 따라서 부분효율 (fractional efficiency)은 모든 크기에서 95% 이상이었고 1 μ m 이상의 크기에 대해서는 99.6% 이상이었다. 일반적으로 직물 필

터들은 몇번의 세정사이클후에는 90%와 그 이상의 부분포집효율을 가질 것이며 전체효율은 보통 99%를 넘을 것이다.

직물 필터의 잇점들은 다음과 같다.

1. 넓은 범위의 입자크기에 걸친 높은 포집효율
2. 다양한 세정방법들과 필터매개체의 용이성에 의해 제공되는 실제시 높은 유연성
3. 한번 설치에 의한 100에서 5백만 ft³/min의 범위에 걸친 체적용량
4. 적당한 작동압력강하와 출력요구조건들
5. 다양한 고체재질들을 다룰 수 있는 능력

공인된 단점들은 다음과 같다.

1. bag house 설치공간의 제약성
2. bag house 근처에 spark가 있을 경우 폭발의 가능성
3. Hygroscopic material 들은 천 세정문제들때문에 다루어 질 수 없다.

마지막 항목은 직물 필터의 사용을 통하여 세정될 수 있는 가스유동의 특성을 극도로 제한시킨다. 게다가 습기입자들은 장비가 이슬점에 가까운 온도에 있는 폐기가스들을 다룰려고 할 때 필터천에 엉겨 모이게 된다. 폐기가스가 bag house에 다가감에 따라 이 가스로부터의 충분한 열전달이 있으면 물증기의 응축을 일으키고 그 결과로 필

터상의 습기물질들의 침전이 있게 된다. 직물 필터의 또 하나의 단점은 부식성 물질을 포함하는 가스유동에 대해서 제한적으로 사용된다는 것이다.

직물 필터는 효율적인 고체미립자, 특히 작은 먼지들, 제어에 대하여 고에너지가스 세정기(scrubber)와 electrostatic precipitator 들과 경쟁하고 있다. 직물 필터의 초기비용은 아마도 벤츄리 가스세정기의 것보다 약간 더 높지만 운전비용은 더 작다. 1970년대말 이후로 비교적 소규모 설계에서는 강점을 가지고 있으면서 발전소와 같은 매우 큰 프로젝트에 대해서도 electrostatic precipitator 들과 경쟁해 왔다(Future Bright for Fabric Filters). 새로운 화석연료 발전소의 경우에 대해서 미래의 기술은 dry scrubbing에 의해 이산화황의 제거를 포함할 수 있다(dry scrubbing은 세정액적들이 스프레이챔버(spray chamber)를 떠나기 전에 증발하도록 설계된 프로세서이다.). 그리하여 미립자와 SO₂ 모두 직물 필터에 의해 제거될 수 있고 투자와 운전비용에서 약간의 절감이 있다. 평가된 바에 의하면(E. R. Frederick), 먼지와 SO₂에 대한 spray drier-fabric filter dual system은 1978년도에 dollar에 근거해서 \$80/kW의 비용이 들었다. 상대적으로 wet scrubbing(석회-석회석(lime-limestone)) system과 electrostatic precipiator의 결합은 약 \$165/kW에 달한다. 천필터들이 coal-

fired 발전소로부터 재를 포집하는 데 사용될 때 air-to-cloth 속도는 낮게(약 2ft/min 또는 1m/min) 유지되고 역류세정이 사용된다.

bag house의 크기(bag의 갯수)는 filtering system의 비용을 상당히 결정한다. 1970년처럼 초기비용은 장비비용의 0.75에서 1.3배 가량의 설치비용을 가지면서 약 ft³/min 용량당 \$7.00이다. 유지비용은 bag들이 교체되어야 하므로 그 범위는 1년당 초기비용의 10에서 25%이다. 직물 필터의 1micron 보다 작은 입자들의 제어를 위한 사용에 관한 종합적인 심포지움의 회보(proceeding)들이 문헌(Proceedings of a Symposium on Fine Particle Fabric Filtration)에 있다. 연방정부로부터 구할 수 있는 handbook(Fabric Filter System Study, Handbook of Fabric Filter Technology)은 천특성들, 성능, 설계내용들과 직물 필터들의 경제성을 매우 광범위하게 다루고 있다.

5. 전기집진기(Electrostatic Precipitator)

정전 집진법에 의한 입자 및 공기부유입자의 포집은 한 극성을 띤 입자와 그와는 반대의 극성을 띤 전극 사이에 작용하는 상호 흡인력에 그 근거를 두고 있다. 이 기술은 1910년 F. G. Cottrell의 선구자적인 노

력으로 개발된 이래로 산업체에서의 청정화 방법에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 이 방식의 우수한 점은 많은 양의 기체를 다룰 수 있다는 점, 에너지 소모가 적고 유동 손실이 작다는 점, 그리고 상대적으로 높은 온도의 기체도 다룰 수 있다는 점에 있다. 정전집진기는 체적유속이 100에서 4,000, 000ft³/min이고 입자의 크기가 0.05에서 200 μ m인 경우에 잘 적용된다. 적용되는 대부분의 경우 포집효율은 80에서 90%의 범위에 들기는 예사고 어떤 경우에는 99.5에서 99.9%내의 범위에 드는 경우도 있다. 일반적으로 압력손실은 매우 적은데 수두로

환산하면 0.1에서 0.5 in(0.25에서 1.25 mbar)이다. 기체의 온도는 1200°F(920°K)까지, 압력은 150 psi(10bars)까지 되어도 사용할 수 있다. 이와 같은 바람직한 특성들 때문에 정전집진기는 산업체 그 중에서도 특히 전력생산 분야에서 광범위하게 쓰여지고 있다. 덧붙여서 강조해 두고자 하는 점은 폐기가스의 흐름에서 입자를 정전집진기를 이용하여 분리해 내고자 하는 경우 소모되는 에너지는 기류 전체에 작용하는 것이 아니라 단지 입자에만 작용한다는 점이다. 이것은 공기오염분야의 포집장비들 중에서 유일무이한 특징인데 다른 분리원리를

표 5.1 전기 집진기의 응용예

INDUSTRY (APPLICATION)	GAS FLOW (10 ³ acfm)	TEMPERATURE °F(°C)	DUST CONCENTRATION, gr/ft ³ (g/m ³)	TYPICAL EFF, %
Electric power (fly ash)	50-750	270-600 (130-320)	0.40-5 (0.9-12)	98-99.6
Portland cement (kiln dust)	50-1000	30-750 (150-400)	0.50-15 (1.1-35)	85-99+
Steel (open hearth)	30-75	100-150 (40-65)	0.02-0.5 (0.04-1.1)	95-99
Pulp and paper (kraft mill fume)	50-200	275-350 (135-180)	0.50-2 (1.1-4.5)	90-95
Petroleum (catalyst recovery)	50-150	350-550 (180-290)	0.10-25 (0.2-60)	99-99.9

SOURCE : Air Pollution Engineering Manual, AP-40, 2nd ed., EPA, May, 1973.

이용한 장비들의 경우 원하는 효과를 얻기 위해서는 기류 전체에 에너지가 가해져야만 된다. 산업체에서 이용되고 있는 정전집진기에 대한 전형적인 수치가 표 5.1에 제시되어 있다(표 5.1).

정전집진기를 설계하는 데는 몇 가지의 기본적인 형상이 이용된다. 그 중의 하나가 관 모양인데 이 속에 전극이 전선으로 관에 축방향으로 지지되어 있다. 매우 높은 직류 전압이 전선과 관 사이에 걸려 있어서 오염된 기체가 관을 따라 흘러서 전극 사이에 형성된 전기장을 가로지르게 된다. 그림 5.1의 모형도는 보통 크기의 상업용 설비의 설계전형을 보여주고 있다. 단지 두 개의 수직 평판이 보일 뿐이지만 보통은 필요한 체적유량을 감당해 내는데 필요한 평행통로의 숫자에 따라서 여러 개의 평행판이 쓰여진다. 유동은 보통 수평방향으로 흐르고 그 통로는 매우 좁아서 8에서 10 in(20에서 25cm) 정도의 나비를 가진다. 평판의 총 높이는 30에서 40ft 정도이고 길이는 25에서 30ft 가량된다. 고전압 전선은 각각의 가스 통로의 중심선에 정확히 놓여져야 한다. 대부분의 경우 전선은 대기전압보다 20에서 100kV 낮은 전압이 걸리는데 보통 40에서 50kV 정도가 전형적이다(만약 집진기를 떠나는 공기가 있기에 알맞은 영역으로 곧바로 들어가면 가운데 전극은 오존이 과도하게 생기는 것을 피하기 위해 양으로 대

전되게 된다.). 기체의 속도는 일반적으로 1에서 20ft/s 범위 내로 유지된다. 기체가 8ft/s의 속도를 가지고 너비가 9in, 높이가 30ft인 통로를 지나가게 되면 체적유속은 10,800ft³/min가 된다. 체적유속이 높아지면 너비 9in인 판을 여러개 설치하여 그에 맞출 수 있다.(그림 5.1)

전극 사이에 걸리는 매우 높은 전압 때문에 전자는 중심전선에서 흘러가는 기체의 흐름속으로 높은 속도로 움직이게 된다. 이번에는 이 전자들이 집진기 속을 흘러가는 기체분자에 달라붙어서 음이온을 형성한다. 전선에 의해 심하게 이온화된 기체의 모습은 파랗게 눈에 보이는 코로나 효과를 통해 확인해 볼 수 있다. 코로나 입력전력은 1,000ft³/min의 체적유량당 0.05에서 0.5kW 정도의 범위이다. 큰 정전기력하에서 음이온은 접지된 바깥 평판으로 이동하고 양이온은 중심전선(접지된 평판에 대해서는 음의 전위를 갖는)으로 이동하게 된다. 이렇듯 포집메카니즘의 첫번째 단계는 기체이온화이다. 두번째 단계는 기체흐름 속에 있는 먼지입자를 대전시키는 것이다. 이것은 음으로 대전된 기체이온이 입자와 충돌함으로써 이루어진다. 먼지입자를 대전시키는 것은 별로 어렵지 않는데 그 이유는 이온 수가 워낙 많고 그 크기가 마이크로미터 이하의 먼지의 크기보다 몇 단위 더 작기 때문이다. 이론적으로 직경이 약 1 μ m 보다 크

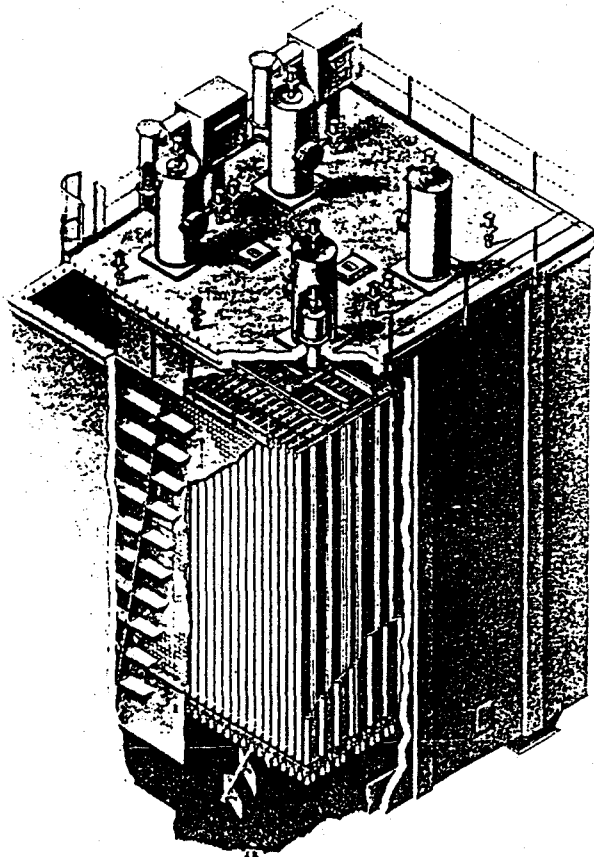
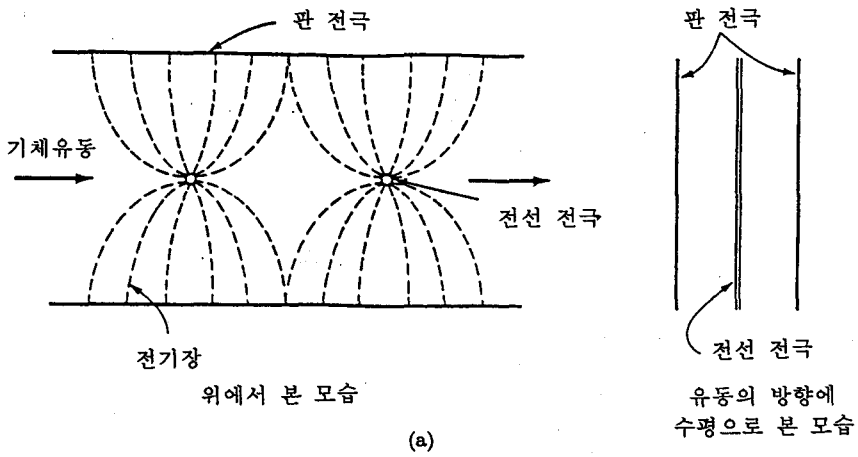


그림 5.1 (a) 전기집진기의 판과 전선의 모형도
 (b) 조립된 전기집진기 (Courtesy of Research-Cottrell, Inc., Bound Brook, N.J.)

고 그 크기가 d_p 인 직경을 가지는 구형입자에 한정된 전하 q 는 다음과 같다.

$$q = p\pi\epsilon_0 E_c d_p^2 \quad (5.1)$$

여기서 $p = 3D/(D+2)$ 이고 D 는 입자의 유전상수(dielectric constant)이고 E_c 는 전계강도이다. 여러 형태의 먼지의 유전상수는 2에서 8사이의 값을 가지므로 식 (5.1)의 p 는 1.50에서 2.40 정도의 값을 가진다.

포집에 있어서 그 다음 단계는 먼지의 포집이 일어나는 평판전극으로 대전된 먼지입자를 보내는 것이다. 이러한 이동이 일어나는 속도를 표류속도(drift velocity), w 라 부른다. 이것은 입자가 집진극을 향해서 기체의 주 흐름에 수직으로 움직일 때 생기는 항력(drag force) 뿐만 아니라 대전입자에 가해지는 전기력에도 좌우된다. 정전기력은 입자의 전하량과 포집장 강도, E_p 에 비례한다. 식 (5.1)을 적용하면 정전기력 F_e 는 다음과 같은 식으로 된다.

$$F_e = qE_p = p_n\pi\epsilon E_c E_p d_p^2$$

스토크스 유동영역(Stokes' flow region)에 있는 입자에 가해지는 항력은 다음 식으로 주어진다.

$$F_d = \frac{3\pi\mu_g d_p w}{K_c} \quad (5.2)$$

여기서 K_c 는 커닝햄 교정계수(Cunningham correction factor)인데 직경이 $10\mu m$ 이하인 입자에 대해서 적용된다. K_c 를 구하는 식은 다음과 같다(W. Strauss, "Industrial

Gas Cleaning", London : Pergamon Press, 1966).

$$K_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left[1.257 + 0.400 \exp \left[\frac{-0.55d_p}{\lambda} \right] \right] \quad (5.3)$$

여기서 λ 는 기체상태의 분자의 평균자유행정(mean free path)인데 그 값은 아래 식으로 주어진다.

$$\lambda = \frac{\lambda}{0.499\rho u_m} \quad (5.4)$$

윗 식에서 μ 는 기체의 점성계수, u_m 은 평균 분자속도, ρ 는 기체의 밀도를 나타낸다. 기체에 대한 동역학 이론에 따르면 u_m 은 다음 식으로 주어진다.

$$u_m = \left[\frac{8R_u T}{\pi M} \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

윗 식에서 M 은 기체의 분자량을 말한다.

전기력과 항력을 같다고 놓으면 스토크스 유동영역에서 구형입자(d_p 가 약 1에서 $100\mu m$)인 표류속도(drift velocity)는 다음 식으로 주어진다.

$$w = \frac{p\epsilon_0 E_c E_p d_p}{3\mu_g} K_c \quad (5.6)$$

여기서 w 는 m/s, μ_g 는 kg/s · m, E 는 Volt/s, d_p 는 m로 나타내고 유전율 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ Coulombs/volt-meter(C/V · m)로 표시한다. 이와 같은 단위를 식 (5.6)에 대입하면 다음과 같다.

$$w = \frac{2.95 \times 10^{-12} p E_c E_p d_p}{\mu_g} K_c \quad (5.7)$$

이 때 μ_g 가 kg/m hr로 표시되고 d_p 가 μm

(micron)으로 표시되면 식 (5.7)의 상수는 1.06×10^{-14} 으로 된다. 실내조건(25°C , 1bar)에서 공기의 점성계수는 0.067kg/m hr 이다. 이 이론식에서 표류속도(migration velocity)는 입자직경 및 전기장 강도의 제곱에($E_c = E_p$ 일 경우) 비례하고 점성계수에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 공기의 점성계수는 본질적으로 압력에는 상관없고 온도가 300° 와 500°K 사이에서 거의 50% 정도 증가한다. 그러므로 표류속도는 온도에 매우 민감하게 변한다. 실제로 표류속도는 식 (5.7)에서 예측되는 이론값과는 상당한 차이를 보인다. 그 주요한 이유는 실제의 전기 집진기를 층류 기체 유동에 직각 방향으로의 정전 물질 전달(electrostatic mass transfer)로 메델링할 수 없다는 데 있다. 실제 현상에서는 관성효과와 함께 다양한 등급의 난류확산 효과가 존재하게 되는 것이다. 이온풍(ion wind)이라고 알려진 현상도 이동에 영향을 주는 것으로 생각되고 있다. 대체로 레이놀즈 수(Re.)가 1보다 크면 층류 유동의 기준인 스토크스 법칙(Stokes' law)은 들어맞지 않게 된다. 이러한 조건은 입자의 직경이 크거나, 압력이 높아서 기체의 밀도가 크거나, 또 전기장의 강도가 세거나 하는 등의 여러 가지 요인이 겹쳤을 때 나타난다. 그럼에도 불구하고 전기집진기의 성능을 예측하려고 하는 모든 이론에서 입자 표류속도는 기본적인 양(quantity)

이다. 가능하면 그 값을 설계하려고 하는 조건과 비슷한 조건에서 동작하는 장비에서 관찰된 값을 사용해야 한다. 입자의 직경이 $5\mu\text{m}$ 이하이면 표류속도는 대개 3m/s 이하로 된다. 플라이애쉬(fly ash, 연소가스 중에 혼입되는 석탄재)는 정전 입자 포집기구에서 관심의 대상이 되는 작은 입자일 때 표류속도가 0.01에서 0.2m/s 까지의 값을 가진다.

정전 입자 포집의 세번째 물리적 메카니즘은 먼지층을 생성시키면서 대전된 입자를 전극에 실제로 침전시키는 과정이다. 입자가 기류 속으로 재비산되는 것을 방지하기 위해서는 접착력, 결합력 및 전기력이 충분해야 한다. 집진기 동작에 중요한 영향을 끼치는 먼지 층의 한 특성으로 전기저항을 들 수 있다. 산업체의 먼지의 특성이 매우 넓은 범위로 변하므로 저항율도 10^{-3} 에서 $10^{14}\text{ ohm}\cdot\text{cm}$ 까지 변한다. 저항율이 $10^4\text{ ohm}\cdot\text{cm}$ 보다 작을 경우에는 침전된 먼지층에서 집진판 쪽으로 전하가 높은 속도로 이동하게 된다. 그래서 포집된 먼지입자들을 결합시키기에는 불충분한 정전하가 먼지입자에 남게된다. 그래서 자주 기류 속으로 먼지 입자가 재비산되고 집진효율은 떨어진다. 산업체의 생산물로서 중요한 흑화탄소가 낮은 저항율을 가지는 먼지입자의 한 예이다. 저항율 범위의 다른 쪽 끝에서는 저항율이 $10^{10}\text{ ohm}\cdot\text{cm}$ 이상이면 집진기의 성

능은 저조하다. 첫번째로 전기적 절연효과로 때문에 두 전극간에는 고저항을의 먼지층을 지나면서 상당히 비율의 전압강하가 생기게 된다. 그래서 작은 비율의 코로나 전력만이 입자를 이온화시키고 대전된 입자를 집진전극으로 몰아부치게 된다. 두번째 문제는 고저항을 때문에 생기는 역코로나 혹은 역이온화이다. 이러한 효과는 먼지층에서의 전압강하가 먼지층의 절연강도를 넘어서게 될 때 발생한다. 포집된 먼지층에 포함된 공기는 먼지층에서의 큰 전압강하로 인하여 이온화된다. 형성된 양이온은 집진전극으로부터 떨어져 나와서 집진판에 접근하고 있는 이온화된 먼지입자들을 중화시킨다. 이 때문에 침전되는 입자의 양은 줄어들게 된다. 또 역이온화 때문에 스파크가 생겨서 포집된 먼지들을 기류 속으로 불어 내기도 한다. 이러한 효과는 집진기의 집진효율을 떨어 뜨린다.

전기집진기는 저항율이 10^4 에서 10^{10} ohm·cm 까지의 범위에 있는 먼지를 가장 효과적으로 포집한다. 산업체에서의 먼지는 대부분 이 범위에 들지 않기 때문에 포집효율을 높이기 위해서는 자주 동작 조건을 바꿀 필요가 생긴다. 온도와 습도는 먼지의 저항율에 상당히 크게 영향을 끼치는 기체 물성이다. 그림 5.2(a)에 시멘트로 먼지에 전형적으로 보여지는 이 두 변수의 영향을 도시하였다. 주어진 모든 습도에서의 온도와 저항

율의 관계를 표시하는 돔 모양의 곡선은 산업체에서의 입자의 전형적인 모습을 보여준다. 습도가 낮아지면 곡선의 정점은 온도를 낮추는 방향으로 이동하는 것에 주의해야 한다. 적당히 건조한 먼지의 경우 일반적으로 저항율의 정점은 420°K 주변에 있는데 그림 5.2(a)의 곡선은 이를 입증해 보이고 있다. 그 곡선의 모양은 온도가 변함에 따라 입자 층 덩어리를 통과하는 전도메카니즘이 바뀌기 때문이다. 420°K 이하에서는 표면전도 메카니즘이 우세하다. 이런 형태의 전도에서는 전하는 입자에 흡수된 표면막으로 흐른다. 온도가 420°K 이상으로 점점 상승하면 흡수현상은 영향을 덜 끼치게 된다. 다른 메카니즘은 체적 혹은 내부전도이다. 체적전도는 입자 사이를 통하는 전하의 통로를 포함한다. 그러한 통로는 분명히 온도와 입자의 성분에 따라 영향을 받는다. 대부분의 물질은 전기저항을 ρ_c 와 절대온도 T 사이에는 내부전도에 의해서 다음과 같은 아레니우스-형(Arrhenius-type)의 관계식이 존재한다.

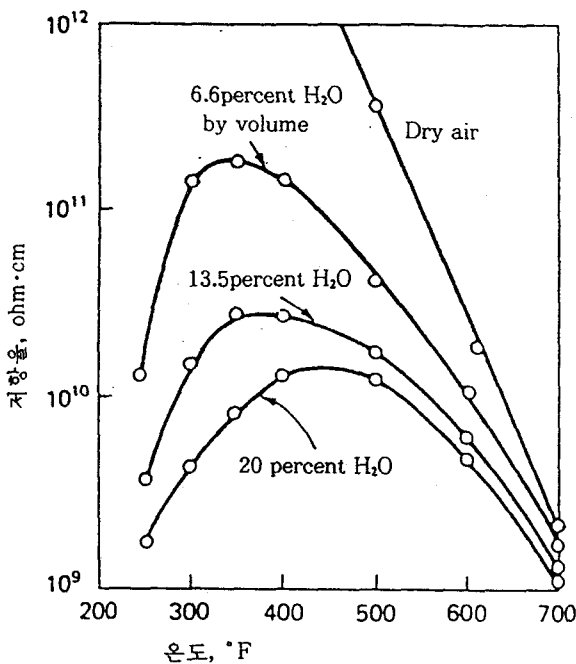
$$\rho_c = A \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (5.8)$$

여기서 A는 상수이고, E는 전자 활성화 에너지(음의 값)이며, k는 볼츠만 상수(Boltzman constant)이다. 그림 5.2의 곡선에서 왼쪽 부분은 이론적 표현과 더 잘 맞지 않는데 이것은 전도가 흡수막을 통하여

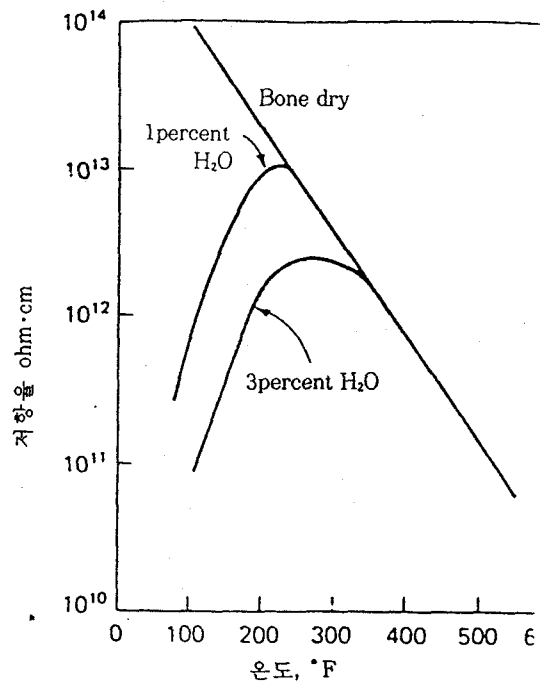
일어나기 때문이다. 그림 5.2(b)에는 조그마한 양이라도 습기가 있을 때 그것의 영향을 나타내고 있는데 이는 플라이애쉬의 속도에 포함되어 있는 수증기량은 5에서 10% 정도의 범위에 있다(그림 5.2, 5.3).

전기저항율을 원하는 범위로 하기 위한 또 하나의 방법은 기류에 조절제를 첨가하는 것이다. 이러한 방법은 표면전도율을 높이기 위해서 온도가 낮은 범위에서 행한다. 부착된 먼지입자에 흡수되면 전해질로 작용하게 되는 SO_3 나 NH_3 를 소량이라도 첨가

하면 저항율은 급격히 감소한다. 오직 이 두 물질과 이것들과 긴밀히 연관된 합성물질들만이 상업적인 측면에서 볼 때, 경제적으로나 기술적으로 가능성이 있는 조절제이다. 그림 5.3(a)는 적은 농도의 황산이 플라이애쉬의 저항율에 끼치는 영향이 어떤지를 보여주고 있다. 이러한 특성의 플라이애쉬에 농도 0.40%의 황산증기를 전형적인 굴뚝가스의 온도가 $420^\circ K$ 일 때 첨가하면 저항율을 10^{10} ohm·cm 영역으로 끌어내릴 수 있는데 이는 집진기를 효율적으로 운전



(a)



(b)

그림 5.2 먼지의 저항율에 대한 온도와 습도의 영향

(a) 시멘트로 먼지의 습도조절

(b) 전형적인 플라이애쉬의 증가되는 전도율에 대한 기체습도의 영향

(출처 : H. J. White, "Resistivity Problem in Electrostatic Precipitators."

J. Air Pollu. Control Assoc. 24(April 1974) : 314.)

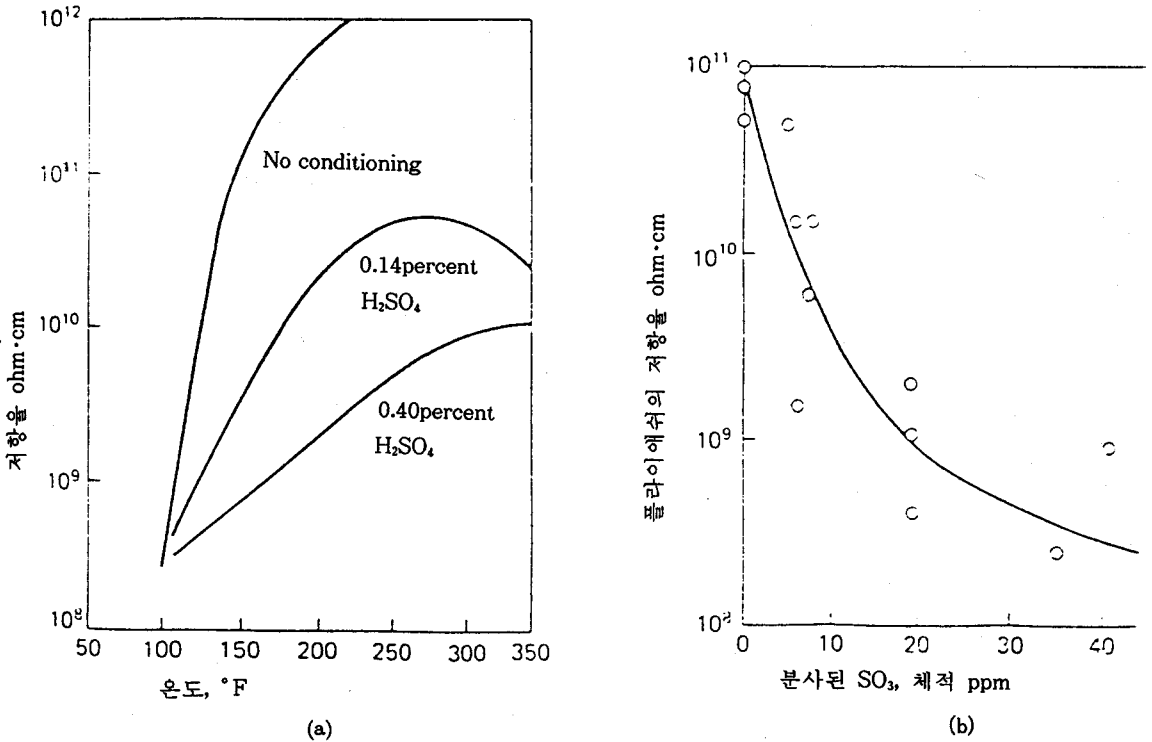


그림 5.3 플라이애쉬의 조절의 영향

(a) H₂SO₄ 증기를 이용한 경우 (b) SO₃를 가스속으로 분사한 경우

(출처 : H. J. White, "Resistivity Problem in Electrostatic Precipitators." J. Air Pollu. Control Assoc. 24(April 1974) : 314.)

하기에 알맞은 값이다. SO₃를 가스에 직접 분사하였을 경우의 영향을 그림 5.3(b)에 나타내었다. 이 곡선을 보면 SO₃을 10에서 20ppm 정도만 분사해도 훌륭한 집진효율을 발휘할 수 있는 정도로 저항율을 끌어내리기에 충분하다는 것을 알 수 있다. 현재의 연방 SO₂ 방출 기준을 생각해 보면 SO₃를 첨가하는 것은 흥미있는 시사점을 던져주고 있다. 과거에는 석탄을 연소시키는 화력발전소나 다른 설비들에서 석탄 속에 있는 황이 연소할 때 생겨나오는 SO₂를 덩으로 생

기는 이득으로 보았다. 이산화황(SO₂)이 충분하면 삼산화물로 산화되어서 먼지층을 조절할 수 있게 흡수되었던 것이다. 그러나 방출기준 때문에 저항 연료가 출현하게 되자 입자의 저항율은 상당히 변화하여 원래의 집진효율을 바꾸어 놓기에 충분할 정도로 되었다. 그림 5.4는 석탄 플라이애쉬의 저항율을 석탄의 황 함량의 함수로 표시한 것이다. 곡선의 위치를 좀 더 신뢰성있게 고정시키기 위해서는 더 많은 양의 데이터가 필요하겠지만 황의 함량이 낮아져서 저

항울에 영향을 미치고 있는 것만은 분명하게 알 수 있다. 따라서 집진기 설계자는 연방기준이 바뀌기 때문에 달라지는 굴뚝가스의 성분의 변화를 예상하고 있어야만 한다. 저황 연료에 대한 집진성능을 높이기 위해서 SO_3 를 쓰더라도 SO_x 방출량은 늘어나지 않는데 이것은 SO_3 가 포집된 입자에 흡수되어서 제거되기 때문이다.

집진된 입자 물질들은 대개 툭툭 치거나 진동을 가하는 방법으로 집진전극으로부터 제거된다. 고체와 액체 형태의 입자들이 모두 포집될 수 있다. 액체 입자들의 경우 그것들은 집진판으로 이동하여 합쳐지고 중력으로 인하여 포집기 바닥으로 떨어진다. 먼지층의 두께가 1/8에서 1/4 in 정도로 될 때 고체입자를 제거하기 위해 전극을 툭툭 치는 방법이 사용된다. 판의 바로 가까이 있는 먼지는 대부분의 전하를 잃게 되고 반면에 맨 마지막에 집진된 물질은 아직도 상당히 높게 대전되어 있다. 판 자체와 판에 근접해 있는 입자 사이에는 상대적으로 전기적 인력이 약하게 작용하므로 판을 툭툭 치면 입자는 상당히 큰 덩어리로 떨어져 나간다. 이것들은 중력에 의해서 통으로 떨어지게 된다. 분리되는 미세한 입자의 양이 많지 않도록 툭툭치는 것을 조심스럽게 조절할 필요가 있다. 판 사이의 통로를 지나가는 기류의 속도가 충분히 작으면 미세한 입자들은 전부 재대전되어 집진기를 떠나기

전에 다시 집진되어 버린다.

특정한 크기의 입자를 제거하기 위하여 필요한 집진기 통로의 길이를 개략적으로 계산하기 위해서는 앞에서 다룬 바 있는 표류속도를 알아야 한다. 대전시키는 시기가 지난 후에 입자를 집진판으로 이동시키는데 드는 시간이 집진기를 통과해 나가는 데 걸리는 시간보다 짧아야만 한다. 이 두 시간이 똑 같으면 그 크기의 입자는 100%의 효율로 포집되지만 공차는 없다. 이론적으로 포집효율이 100%일 때 필요한 기체통로의 길이는 다음 식으로 주어진다.

$$L = \frac{sV_g}{w} \quad (5.9)$$

여기서 L 은 집진전극의 길이이고, s 는 대전전극과 집진전극간의 간격이며, V_g 는 유동 통로에서의 기체의 속도이다. (5.9) 식에서는 일관된 단위가 사용되어야 한다. 대전시간을 계산하기 위해서는 상류의 유동 통로의 길이가 추가되어야 한다(그림 5.4).

주어진 크기의 입자를 99% 혹은 그 이상 제거하기 위해서 필요한 실제 길이는 위에서 계산된 이론적인 값과는 상당한 차이가 있는데 그 이유는 이론적인 모델을 만들 때 쓰여진 가정에 있다. 균일한 집진장, 균일한 기류속도, 구형입자, 균일한 전기적 특성 등의 기본적인 가정들로부터의 편차가 이론과 실제의 값이 차이가 나는 원인이다.

전기집진기의 집진효율과 운전변수들 간

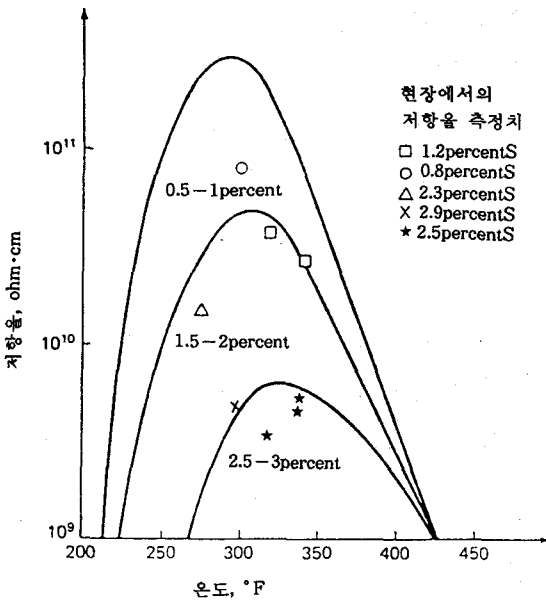


그림 5.4 석탄의 황함량에 따른 플라이애쉬 저항률의 변화

(출처 : D. E. Selzer and W. D. Waston. Jr. "Hot versus Enlarged Electrostatic Precipitation of Fly Ash." J. Air Pollu. Control Assoc. 24(February 1974) : 115.)

에는 몇 가지 관계식이 제안되었다. 자주 인용되는 표현 중의 하나는 Deutsch equation이다.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-Aw}{Q}\right) \quad (5.10)$$

여기서 A는 집진전극의 면적, w는 표류 속도, Q는 체적유동속도이다. Aw/Q는 무차원 수이므로 A, w, Q의 단위는 일관성 있게 쓰여져야 한다. 이 식의 형식은 물리적 고려(H. J. White, 1974)로부터 혹은 확률계산(H. J. White, 1955)으로부터 유도되어 질 수 있다. 이러한 형식의 식은 대충 어렵잡을 목적에 유효하다. 식 (5.6)에 표시된 것

처럼 w는 주어진 크기에 대한 표류속도이기 때문에 전체 효율을 계산하기 위해서는 반드시 평균 표류속도가 쓰여져야 한다. 지수함수 항목이 있고 A, w, Q 등이 유한한 값을 가지기 때문에 100%의 집진효율을 얻는 것은 불가능하다. w가 입자의 크기에 따라 변하기 때문에 효율의 일부는 입자의 직경과 지수적으로 관련되어 있다. 앞에서의 예제에서와 같이 판 간격이 23cm이고 기류속도가 1.5m/s판 형식의 집진기를 고려해 보자. 그 예에서의 표류속도를 나타내는 일반식은

$$w = 0.048d_p$$

이고 d_p 는 마이크론 단위이고 w는 meter/second이다. 부가적으로 판 높이를 10m, 길이를 8m로 하면 식 (5.10)은 다음과 같이 된다.

$$\eta = 1 - \exp(-2.23d_p)$$

그림 5.5는 입자 크기가 $3\mu\text{m}$ 까지인 입자들에 대한 관계식을 그린 것이다. 이 보다 더 큰 입자의 집진효율은 본질적으로 100%이다. 이 부분의 효율은 곡선에서 잘못 그려져 있는데 입자 크기가 작으면 효율이 매우 낮게 예측하고 있다는 점에서 이 부분의 효율은 곡선에서 잘못 그려져 있다. 여러 집진기의 경우 부분효율(fractional efficiency)을 측정해 보면 마이크로미터 이하의 범위에서 증가하고 있는 것을 알 수 있다. $1\mu\text{m}$ 일 때의 효율이 90에서 95%이라

면 0.1 μ m의 크기에서는 99% 이상이 된다. 측정 데이터(J. D. McCain, et al, 1975)를 참고하면 0.1에서 0.5 μ m 크기의 입자들에서 집진효율이 최저로 되는 것을 알 수 있다. 입자 직경이 줄어들면 포집효율이 증가한다는 사실에서 정전 집진 장치가 매우 미세한 입자를 제거하는데 있어서 신뢰할만한 기구라는 것을 알 수 있다(그림 5.5).

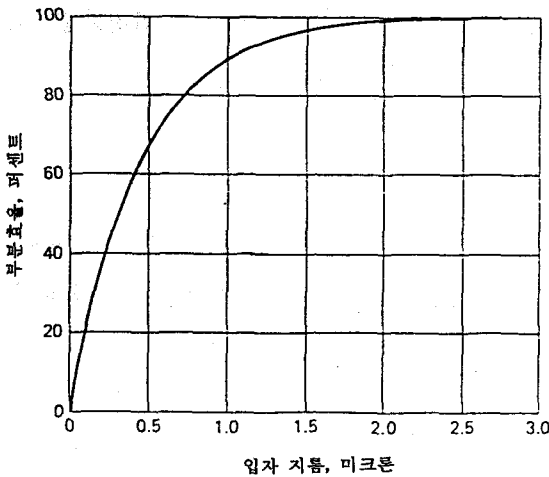


그림 5.5 식(5.10)에 따른 전기집진기의 전형적인 부분효율곡선

아직까지는 원리로부터 포집효율이 결정되어질 수 없기 때문에 Deuthsch equation이 산업체의 먼지의 거동을 예측하는데 직접 쓰여져서는 안 된다(G. Penny, 1969). 그 형식이 쓰여지게 되면 w는 성능계수로 간주되어지는 것이 고작이다. 그러면 w는 다양한 조건하에서 기준치를 찾는 연구를 통해서 확인되어야 한다. 그럼에도 불구하고 식 (5.10)은 설계조건에서 벗어난 상

태에서 운전될 때의 효과를 예측하는 데는 유용하다. 예를 들면 입자의 크기가 2 μ m인 것이 앞서의 예제에서 대표적인 것이라고 하자. 그러면 평균 표류속도는 다음과 같다.

$$w=0.048d_p=0.048(2)=0.096\text{m/s}$$

그리고 전체 포집효율은

$$\eta=1-\exp[-2.23(2)]=0.988(98.8\%)$$

이제 처리조건이 변하여서 집진기를 통과하는 기체유동이 20% 만큼 늘어났다고 하자. 그러면 전체 포집효율은 다음과 같이 된다.

$$\eta=1-\exp\left(\frac{-2.23(2)}{1.2}\right)=0.976(97.6\%)$$

이와 같이 유동속도가 20% 정도 과부하가 걸리면 효율은 1.2% 떨어진다. 그런데 이렇게 약간의 포집효율이 떨어지면 집진기에 의해서 제거되지 못하는 입자의 질량은 2배 정도 증가한다. 일반적인 범칙으로서 초고효율의 성능이 요구되는 경우에 운전조건이 변하여 제거효율이 약간만 달라져도 입자가 방출되는 양의 변화는 엄청나다. 전기집진기의 약점은 운전조건과 부하가 변하는 경우에는 사용하기 곤란하다는 데 있다. 또 다른 약점은 초기 설치비용이 많이 들고 설치 공간은 많이 차지한다는 점이다. 그리고 먼지 부하가 클 때에는 전 단계에서의 청정화가 필요하다.

윗 절에서 설계조건을 벗어난 상태에서의 운전조건을 예측하기 위하여 평균 표류속도

개념을 서술하였다. 이 평균속도는 유효 표류속도로 알려져 있는데 설계계산에 자주 사용된다. 실험적 수치에 근거하여 보통 공장에서의 전형적인 유효 표류속도를 표 5.2에 나타내었다.

Deutsch equation은 실험적 표류속도 수치와 들어맞는 때에도 현재 여러 응용분야에서 필요로 하고 있는 초고효율의 집진기에 대한 실제 수치와는 잘 들어맞지 않는다. 이렇듯 새로운 장비들에 대해서 잘 들어맞는 예측을 할 수 있게 하기 위해서 식을 수정하려는 시도가 수없이 많이 있어 왔다. 특히 고효율의 범위에 있어서는 총효율을 측정하는 데에 폐수 처리방법의 개념에 근거한 식이 돋보인다(J. O. Ledbetter, 1978). 그 식은 Hazen의 노력으로 만들어졌는데 다음과 같은 형태를 취하고 있다.

$$\eta = 1 - \left(1 + \frac{wA}{nQ}\right)^{-n} \quad (5.11)$$

여기서 n은 1에서 무한대까지 변하는 상

수이다. 전기집진기에서는 2에서 8까지의 값을 가지는 것이 가능한데 3에서 5까지의 값을 가질 때 대부분의 수치와 잘 맞는다. n이 무한대이면 위의 식은 Deutsch equation으로 된다. 앞에서 언급했듯이 유효 표류속도는 4에서 20cm/s의 범위 안에 있다. 두 개의 상수를 가지는 다음과 같은 실험식이 있다.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-wA}{Q}\right)^x$$

이 식은 원래의 Deutsch 모델을 수정한 것이다. 이 경우 x는 대개 0.5로 놓는다. 어느 경우에도 w는 주어진 형상과 동작조건을 가진 전기집진기에 적용될 수 있는 유효 표류속도이다(표 5.2).

1979년에 전기집진기의 총 설치비용은 actual ft³/min당 \$5.00에서 \$9.00이었다. 운전비용은 압력손실이 수두로 0.5 in(1.25mbar) 정도밖에 안 되므로 매우 적다. 참고문헌(H. J. White, 1973), (W. Strauss,

표 5.2 산업체 먼지의 전형적인 유효 추진속도

APPLICATION	w(ft/s)	w(cm/s)
Utility fly ash	0.13-0.67	4-20
Sulfuric acid mist	0.19-0.25	6-8
Cement(dry)	0.19-0.23	6-7
Blast furnace	0.20-0.46	6-14
Catalyst dust	0.25	7.5

1971)은 전기집진기에 대해서 상세히 논하고 있다. 후자는 1960년대 이후의 광범위한 참고문헌 목록을 제공해 준다. 참고문헌 ("Proceedings of a Symposium on Fine Particle Electrostatic Precipitation", J. Air Pollu. Control. Assoc. 25, No 2(1975) : 98-189.)은 미세입자용 전기집진기 기술에 대한 1974년 심포지움의 내용을 포함하고 있다.

습식 스크러버와 전기집진기를 결합한 방식의 기구는 기류 흐름으로부터 먼지입자를 분리해내는 흥미있는 장치이다. 그런 기구는 정전 분무식 스크러버 또는 습식 전기집진기로 불린다. 이론적인 계산상으로는 이 결합된 기구를 통해서 입자 직경이 0.5에서 $5\mu\text{m}$ 인 먼지입자를 집진하는 효율성이 상당히 개선된다. Penny가 1944년에 원래의 이론을 제안한 이후 수 많은 실험적 연구를 통해 이 발견을 확신하게 되었다. 여러 가지 연구에서 사용된 전압수준은 5,000에서 30,000V 범위이다. Diocetyl phthalate 공기 부유입자에서 동작하는 작은 기구($140\text{ft}^3/\text{min}$)에 대한 1975년의 연구결과(J. D. McKenna, 1974)에 의한 수치를 그림 5.6에 나타내었다. 입자 직경이 $0.3\mu\text{m}$ 이고 대전되지 않은 입자에 대해서는 집진효율이 35%부터 증가하고 있고 동일한 크기의 대전된 입자에 대해서는 효율이 87%전후로부터 증가하고 있다는 사실에 유의한다. 동일한

연구논문에서는 펄프분쇄기의 황화마그네슘 환원보일러에서 동작하는 $1000\text{ft}^3/\text{min}$ 용량의 기구에 대해서도 다루고 있다. 환원효율이 높은 경우 필요한 전력량은 $0.5\text{hp}/1000\text{ actual ft}^3/\text{min}$ ($350\text{W}/\text{actual ft}^3/\text{min}$)이다. 이것은 물 입자와 공기부유입자의 대전 및 물과 기체의 압력손실값을 포함한 것이다. 동일한 기구가 석탄을 때는 보일러에서 나오는 뜨거운(약 350°F) 가스에서 작동할 경우 집진효율은 98% 이상이라고 보고되고 있다. 이 연구의 마지막 실험에서는 먼지입자 부하가 $0.003\text{gr}/\text{scf}$ 근처인 경우를 다루고 있다. 위에서 보고된 연구결과에 따르면 기류속에 있는 공기부유입자와 분사되는 액적은 서로 반대의 극성으로 대전되어서 입자와 액적의 결합력을 높이고 있다(그림 5.6).

위에서 언급한 대전 액적 스크러버(charged droplet scrubber) 외에도 습식필름 전기집진기가 상업적으로 이용되고 있다. 이 시스템에서는 매우 잘게 잘라진 액적이 대전되어서 집진판에 흡착되게 된다. 흡착된 액적은 집진판 전체에 평평한 수막을 만든다. 대전된 고체입자는 움직이는 수막에 포집되게 된다. 판에 형성된 슬러리(slurry, 먼지 입자와 물이 뒤섞여진 액체)는 중력에 의해 흐름으로 흘러 떨어진다. 이 시스템의 부가된 장점은 액적이 집진판에 흡착되기 전에 기체상태의 먼지입자들이 분무되는 액

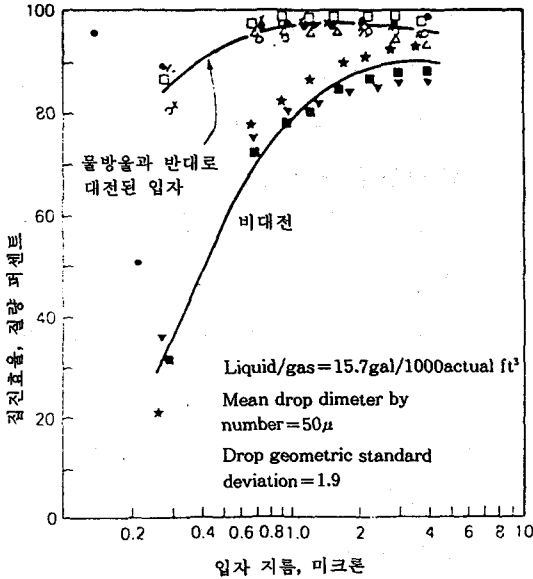


그림 5.6 정전 액적 분사 스크러버에 대한 입자 크기와 집진효율

(출처 : M. J. Pilat. "Collection of Aerosol Particles by Electrostatic Spray Scrubbers." J. Air Pollu. Control Assoc. 25. no. 2(1975) : 176.)

체에 흡수될 수 있다는 것이다. 기체상태의 오염입자를 보다 잘 흡수하기 위해서는 분무액체에 화학물질을 첨가할 필요가 있다. 위에서 기술한 두 가지 스크러버 모두에 대해서 기존의 전기집진기에서 이용되던 건조 처리 문제(dry disposal problem)를 습식 처리 문제(wet disposal problem)로 대체하였다.

다른 입자 집진기의 인정된 결점들 때문에 습식 집진기에 대한 관심이 높아지고 있다. 예를 들자면 벤츄리 스크러버(venturi scrubber)는 에너지 소모량이 극단적으로 많아서 고 에너지 가격 시대에는 별로 매력

적이지 못하다. 건식 전기집진기는 저항율에 대한 제한이 있어서 어떤 종류의 먼지를 포집하는데는 유용하지 못하다. 직물 필터는 입자의 화학적 또는 물리적 성질 때문에 사용될 수 없는 경우가 있다. 그 뿐만 아니라 필터재료 자체가 화학적 저항과 온도 범위를 제한하기도 한다. 습식 전기집진기는 다른 기구들의 이러한 한계를 극복하고 있다. 입자의 성질에도 별로 구애받지 않고 온도도 성능에 거의 영향을 끼치지 못한다. 집진판은 계속 씻겨지기 때문에 집진된 먼지층의 저항율은 더 이상 변수가 아니고 수막의 저항율도 매우 낮다. 게다가 기체상태의 오염입자들도 세정과정(washing process)을 통해서 제거된다. 유일한 제한요소는 세정액에 대한 기체상의 오염입자의 가용성(solubility)이다. 이러한 특성과 상대적으로 낮은 에너지 소모량으로 인해서 습식 전기집진기는 다른 어떤 기존의 집진장비에 비해서도 그 응용면에서 경제적으로나 기술적으로 우세한 위치를 차지하고 있다. 이것은 입자의 대부분이 미크론 이하(submicron)의 범위에 있을 때 더욱 그렇다.

6. 입자 제어장비의 비교

기업이 방출 기준에 맞추기 위해서 선택해야 하는 특정의 입자 제어장비는 많은 운전조건 변수들에 따라 달라진다. 가장 중요

한 변수는 다루어야 할 체적유량이다. 고려하고 있는 장비가 공장이 최고출력으로 운전될 때 나오는 입자를 제거할 수 있는 용량을 가지지 못하면 방출기준을 따라간다는 것은 불가능한 일이다. 공정 중에는 설계조건보다 10% 많은 조건에서 동작되는 경우가 허다하기 때문에 최고 집진효율도 중요한 의미를 가진다. 여러 형태의 집진장비들의 집진효율은 설계조건에 위 또는 아래에서 동작하는 데 따라서 영향을 받는다. 또 입자의 화학적 물리적 특성이 집진효율에 영향을 끼친다. 예를 들면 입자의 굵기나 가늘기에 따라 선택 범위가 제한된다. 기류의 먼지부하(grains/ft^3 , grams/m^3)도 중요한 요인이다. 먼지 부하가 큰 경우(예를 들면 100grains/ft^3 , 230grams/m^3) 기류가 비싸고 효율적인 집진기에 들어 오기 전에 사전 청정장치가 필요하게 된다. 장비가 견딜 수 있는 온도 범위와 급격한 온도 상승율도 고려하여야 한다. 동시에 다양한 형태의 장비들에 대한 유지보수 조건도 검토해야 한다.

아래에 나열한 것은 네 가지의 기본적인 입자 제어장비이며 그 각각에 대하여 가장 효율적일 수 있는 적용 예를 나타내었다. 일반적으로 명심해야 할 것은 예외적인 경우가 존재한다는 것이다.

1. 원심 분리식 집진기는 다음과 같은 용도에 쓰인다.

(a) 먼지가 굵다.

(b) 농도가 매우 높다($>1\text{gr/ft}^3$)

(c) 분류가 필요하다.

(d) 매우 높은 효율을 필요로 하지 않는다.

2. 습식 스크리버는 다음과 같은 용도에 쓰인다.

(a) 미세 입자가 고효율로 제거될 필요가 있다.

(b) 냉각이 필요하고 습기가 없어야 한다.

(c) 가스가 가연성이다.

(d) 입자 오염물질 뿐만 아니라 기체상의 오염입자도 제거될 필요가 있다.

3. 직물필터는 다음과 같은 용도에 쓰인다.

(a) 매우 높은 효율을 요구한다.

(b) 유용한 물질이 건조한 상태로 포집되어야 한다.

(c) 가스는 항상 이슬점보다 높은 온도이다.

(d) 체적이 상대적으로 작다.

(e) 온도는 상대적으로 낮다.

4. 전기집진기는 다음과 같은 용도에 전형적으로 사용된다.

(a) 미세한 먼지를 제거하는 데 높은 효율이 요구된다.

(b) 취급하는 가스의 체적이 크다.

(c) 유용한 물질이 회수되어야 한다.

동작 조건과 다양한 집진장비들의 능력을 알면 현재의 기술수준에 의해 가능한 몇 개의 장비를 고르기 위해 미리 훑어보는 것이

표 6.1 집진 장비의 운전특성

GENERAL CLASS	SPECIFIC TYPE	TYPICAL CAPACITY	PRESSURE LOSS (IN. WATER) ^a	POWER REQUIRED (W/ft ³ /min) ^b	
Mechanical collectors	Setting chamber	15-25ft ³ /min per ft ³ of casing volume	0.2-0.5 (0.5-1.3)	0.03-0.10 (1-4)	
	Baffle	100-3500ft ³ /min per ft ² of inlet area	0.5 (1.3)		
	High-efficiency cyclones	2500-3500ft ³ /min per ft ² of inlet area	3-5 (7.5-12.5)	0.5-1.0 (15-35)	
Fabric filters	Automatic	1-6ft ³ /min per ft ² of fabric area	4-6 (10-15)	1.0-1.3 (35-45)	
		Impingement baffle	400-600ft ³ /min per ft ² of baffle area	2-5 (5-13)	0.2-1.0 (7-35)
Wet scrubbers	Packed tower	500-700ft ³ /min per ft ² of bed cross-sectional area	6-8 (15-20)		
		Venturi	6000-30,000ft ³ /min per ft ² of throat area	10-50 (25-125)	4-12 (140-425)
		Electrostatic precipitators	Dry, single-field	2-8ft ³ /min per ft ² of electrode collection area	0.2-0.5 (0.5-1.3)
Wet(charged-drop scrubber)	5-15 ft ³ /min per ft ² of electrode collection area		0.5-0.7 (1.3-1.8)	0.3-0.5 (10-15)	

^aValues in parentheses under "pressure loss" are in mbars.

^bValues in parentheses under "power required" are in W/m³/min.

가능하다.

다양한 종류의 집진장비들의 능력을 자세히 비교해 보는 것은 별로 생산적인 일이 아니다. 능력은 기술수준이 바뀔에 따라서

달라지는 것이다. 그리고 최신 정보는 장비 생산업자들에게서 곧바로 구할 수 있다. 그렇지만 이 시점에서 비교해 볼만한 가치에 있는 점도 있다. 표 6.1에 네 종류의 장비

표 6.2 입자 제어장비의 전형적인 부분 집진효율

	EFFICIENCY AT GIVEN SIZE		
	5 μ m	2 μ m	1 μ m
Medium-efficiency cyclone	30	15	10
High-efficiency cyclone	75	50	30
Electrostatic precipitator	99	95	85
Fabric filter	99.8	99.5	99
Spray tower	95	85	70
Venturi scrubber	99.7	99	97

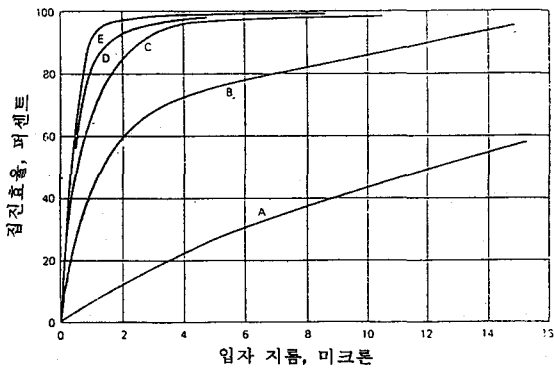


그림 6.1 여러 종류의 집진장비의 집진효율
 A. 높은 처리량의 원심분리식 집진장치
 B. 고효율 원심분리식 집진장치
 C. 분무 탑 D. 벤츄리 스크러버

에서 예견되는 용량과 항력 손실을 나타내었다. 벤츄리 스크러버에서는 압력손실이 과도하게 생긴다는 점도 나타났다. 또 다른 중요한 요소는 입자의 직경에 따른 집진효율의 함수관계이다. 그림 6.1에 두 종류의 원심분리식 집진장치를 포함하여 네 종류의 장비에 대한 곡선을 나타냈다. 이 그림에서 보면 주어진 범위의 입자 크기에서도 집진

효율이 매우 넓은 범위로 변하고 있다는 것이 분명하다. 이 곡선은 경향성을 보기 위해서 나타났다. 주어진 생산업자의 장비설계치와 입자의 특성에 따라 성능 곡선에서의 특정위치가 정해진다. 표 6.2도 입자 크기와 효율과의 관계를 보여준다. 이 표는 그림 6.1의 성능곡선을 구체적인 수치로 보여주고 있다(표 6.1).

마지막으로 제어장비는 자본 투자, 운전 비용, 이윤에 대한 자본 비용, 세금, 할부금 등에 근거해서 선정되어야 한다는 점을 강조해 둔다. 장비 제조 및 설치 업자들은 단위 시간 및 체적 당의 초기 비용, 설치 비용, 운전비용, 유지보수 비용 등에 관한 정보를 제공해 줄 수 있다. McKenna 등은 직물필터와 다른 입자 제어장비 간에 성능과 비용을 비교한 연구를 발표했다(J. D. McKenna, 1974).