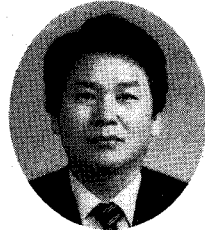


환경관리 기술사 문제 해설

〈대기분야 1986년도 시행〉



魯鍾植

〈고려환경컨설턴트 대표, 환경(수질·대기) 기술사〉

〈1986년 시행〉(제 3 교시) 지난호에 이어 계속

③ 배가스 순환연소

이 방법은 연소배출가스를 일부 재순환하여 연소용 공기와 혼합함으로써 연소온도를 저하시키는 방법이다. 순환에는 배가스량이 30~40%를 넘으면 연소가 불안정해지기 쉽고 조작의 신속성이 없어지게 된다.

④ 물 또는 수증기의 혼입

물이나 수증기를 혼입하면 연소가스의 열용량이 증가되고 온도상승이 억제된다. 이 방법은 Fuel NO_x에는 큰 효과가 없다. 한편 물과 기름의 에멀존이 많이 쓰이고 있는데 유중수적형(W/O형)이 저 NO_x에도 효과가 있다.

⑤ 연료의 종류와 연소실의 구조

사용연료의 종류면에서 본다면 고체, 액체 및 가스순으로 NO_x 배출량은 저하 한다. 또한 같은 액체 연료 중에서도 C중유, B중유 그리고 A중유, 등유순으로 적어진다. 가스연료의 경우는 LPG, LNG, 도시가스 순인데 결국 양질의 연료일수록 NO_x는 적어진다고 하겠다.

연소실의 형식면에서도 보면 중소보일러의 경우 연소실내에서는 연소가스의 리턴방식으로 배

가스가 순환하도록 하는 것인데 저NO_x에 유리하다.

(3) 결론

에너지이용 효율면과 오염성분의 배출저감 사이에는 비례관계가 있다. 그러나 위에서 본 바와 같이 탄화수소저감과 NO_x저감 사이에 관련해서 부하변동에 따라 억제되어야 하는 예민한 공/연비의 유지 등 절충점이 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 보일러 등 대기오염의 저감을 위해서는 위의 여러인자를 최적 제어할 수 있는 적절한 자동 제어 시스템을 보다 많이 발전시켜야 할 단계에 와 있다고 생각한다.

〈문제2〉 Cyclone의 성능을 알아보기 위한 요인(performance factor)에 대하여 설명하시오

(1) Blow down 효과를 적용하면 효율이 높아진다. 〈그림 1〉과 같이 cyclone의 dust box, 또는 multiclone의 hopper부에서 처리 배기량의 5~10%를 흡입함에 따라 cyclone내의 난류현상을 억제시킴으로써 집진된 먼지의 비산을 방지시키는 방법이다. Cyclone의 blow down, blow up이 집진효율

에 미치는 영향에 대한 실험결과는 그림2와 같다. 이 blow down의 효과는 선회기류의 난류를 막는 것외에 먼지의 장치 내벽 부착으로 일어나는 먼지의 축적도 방지시킨다.

Cyclone 형식의 원심력 집진장치는 그 구조가 간단하며, 시설비도 싸고 유지관리도 편하므로, 단독 제진장치나 다른 제진장치의 전처리용으로 대단히 광범위하게 쓰여진다. Cyclone의 실용범위는 수μ 입자까지 포집이 되며 압력손실은 100mmH₂O 이하이다.

(2) 배기관경(내관)이 작을수록 입경이 작은 먼지를 제거할 수 있다.

(3) 입구유속에는 한계가 있지만 그 한계내에서는 속도가 빠를수록 효율이 높은 반면에 압력손실도 높아진다.

(4) 일반적으로 축류식적진형, 접선류입식소구경 multicyclone에서는 blow down 효과를 얻을 수 있다.

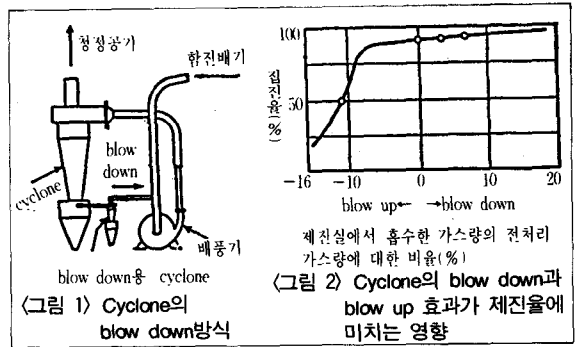
(5) Cyclone의 직렬단수, 적당한 dust box의 모양과 크기도 효율에 관계된다.

(6) Cyclone의 표준형이 절대적인 것이 아니라. 표1과 같은 조건에 따라 제진효율을 다양하게 높일 수 있다.

[표-1] Cyclone의 제진성능에 미치는 조건

변수	성능	압력 손실 감소	포집효율증가
입구풍속 μ_i	소		50~80f / s(15~25m/s)
크기	무		소형
출구관경 d	대		△소형
원통부직경 D	소		△대
원통부길이 L	장		적당
원추부길이 H	장		약간길게
원추각 $\zeta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{D-d}{2H} \right)$	소		20~30°
입구면적 $a=bh$	소		무
입자 진밀도 Pp	무		대
입자경 δ	무		대
배기온도 T	고		△저
배기점도 μ	대		△소
배기밀도 Pa	소		무
내부장애물	대		△소
집진공기밀	무		흡인식에서는 전부
내구먼지농도	대		무

주 1. *는 영향이 큼
2. △는 영향이 압력 손실과 포집효율이 반대



<문제3> 석탄 Boiler에서 배출되는 분진의 입도분포 성상, 처리대책을 설명하시오

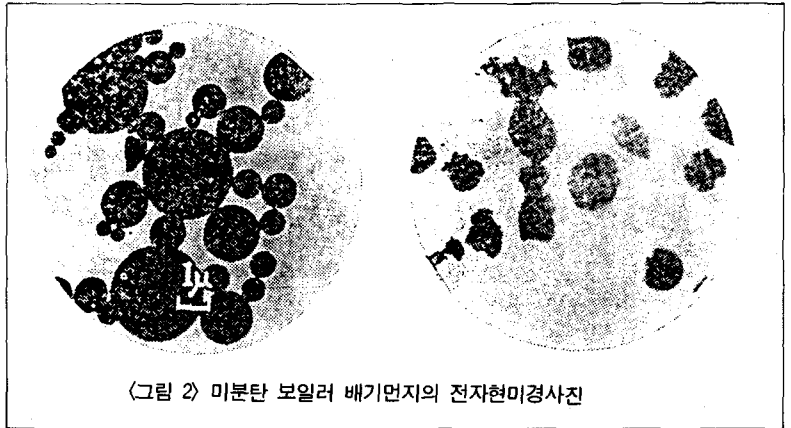
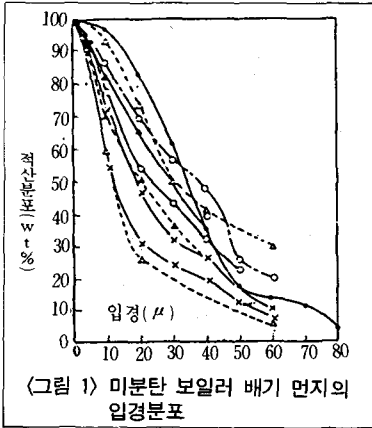
가. 미분탄 연소 보일러

미분탄 연소 보일러의 연기의 성장은 보일러와 mill의 구조, 탄질, 연소조건에 따라 현저하게 다르다. 그러나 입자체의 입경(입자직경)에 크게 영향을 주는 것은 석탄의 미분직경이다. 즉 미분탄의 입경이 적을수록 배기중의 입자상물질의 입경이 적어진다. 제진장치의 선정에 있어서 장치의 형식은 입경에 의하여 결정되고 규모는 처리코저하는 배기용량에 따라 결정된다함은 수차에 걸쳐 강조되었으며, 배출입자의 농도와 온도, 성분 등에 따라 몇개의 제진장치를 직렬로 설치하거나 냉각탑의 전설치 등이 선정되므로 장치설계와 관계가 깊은 물리, 화학적인 일반적 특성을 먼저 기술코저 한다.

(1) 먼지의 입경

미분탄을 사용하는 보일러 배기의 먼지 입경의 분포를 보면 (그림1)과 같이 탄질, 미분경과 보일러의 구조 등에 따라 배출원마다 그 입경분포는 현저한 차이가 있다. 미분탄먼지는 (그림2)와 같이 44μ 이하의 미립자는 완전연소에 따라 탄분이 용융 후에 응고되기 때문에 대체로 구상의 모양을 하고 있다. 한편 44μ 이상의 굵은 먼지는 불완전연소로 인하여 생긴 것이기 때문에 부정형을 하고 있음을 볼 수 있다.

시멘트 혼화제로서 사용되는 비산재(fly ash)로서는 44μ이하의 구상먼지가 바람직하며 이러한 구상먼지는 통상 공기에열기 출구의 먼지중에



70%전후로 함유되고 있다. 미분탄 보일러 배기 먼지의 진비중은 2.1정도, 용집비중은 0.7이며 입경이 적을수록 용집입경은 커진다.

(2) 먼지농도

흔히 미분탄 보일러에서는 발생먼지의 20~25%는 화로에서 공기에열기 사이에서 낙하되므로 공기에열기 출구의 먼지농도는 고품입탄인 경우 20g/Nm³이며 저품입탄인 경우 35~45/Nm³ 정도이다.

(3) 먼지성분

미분탄 보일러배기 먼지의 성분조성은 〈표1〉과 같이 SiO₂, Al₂O₃가 주성분이다. 시료 A는 저품입탄으로 미분경이 200mesh 통과가 90% 전후이며 시료B는 고품입탄으로 미분경이 200mesh 통과가 65% 전후가 된다.

(4) 먼지의 전기저항

미분탄 보일러배기 먼지의 전기저항은 보일러의 연소효율의 향상에 따라 현저히 높아진다. 배기온도 120°C전후에서 전기저항이 높아서 상한직은 1.1×10¹³Ω-cm, 하한직은 1.25×10¹¹이다. 먼지의 성분조성에 따라 전기저항이 달라져서 균열함량이나 SO₃농도가 높을수록 전기저항은 떨어진다.

(5) 처리기법

제진시설은 배관, 제진장치 및 송풍기 등이 합리적으로 설계, 제작되어야 한다. 미분탄 보일러 배기 먼지의 성상을 참작하면 일반적으로 중력침장설, 사이크론 그리고 전기집전계 등이 흔히 사

용된다. 입경분포도를 보면 크기가 10μ 이상이 50%에서 95%를 점유하고 있다.

한편 5μ 이상의 먼지는 75%에서 99%를 차지하고 있으므로 〈표2〉를 참작하면 개략적으로 어떤 형식의 제진장치가 적합한가 함은 곧 알 수 있다.

제진장치설정기법은 입경분포이외에도 먼지농도와 처리배기량이 중요한 요인이 된다. 즉 기계적 제진장치는 일반적으로 먼지 농도가 높아도 제진효율에 크게 영향을 주지 않으나 세정식제진장치는 10g/Nm³ 이상, 전기집진장치는 30g/Nm³ 이상이면 그 성능을 다할 수 없다. 처리배기량은 경제적으로 보아 20만 m³/日 이상이면 전기제진장치를 택하는 것이 좋다.

따라서 대규모제진장치(일당 처리량이 20만m³ 이상일 때)인 경우는 전기제진형식을 택하되 미분탄 보일러배기 먼지일 경우는 특히 저품입탄일 때는 반드시 전기제진장치앞에 기계적인 제진장치를 설치해야만 원래의 제진효율, 즉 목적을 달성할 수 있다.

〈표2〉 중 제진장치의 실용성능

원리	명칭	취급되는 입경(μ)	압력손실 Δp(mmHg)	제진율 (%)	설비비	운영비
중력관성력원섭력	침강실	1,000~30	10~15	40~60	소경도	소경도
	Cyclone	100~10	30~70	50~70	중경도	중경도
세정음파여과	Venturi scrubber	100~0.3	30~130	85~95	중경도	중경도
	Bag filter	100~0.1	300~380	80~95	중경도이상	중경도
전기제진	Bag filter	20~0.1	60~100	80~95	중경도이상	중경도이상
	Electric precipitator	20~0.05	100~200	90~99	대경도	소~중경도
			10~20	80~99.9	대경도	소~중경도

〈표1〉 미분탄 보일러 배기 먼지의 성분조성

성분 사료	성분								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	H ₂ O	SO ₂	작열함량	
미분탄	A	62.07	25.47	3.53	5.65	1.13	0.21	0.68	0.5
	B	54.3	26.3	5.3	5.9	1.6	0.3	0.6	2.4

〈제 3교시〉

〈문제 4〉 Gauss 모델을 설명하고 이 모델의 가정 조건과 제한점들을 열거 하시오.

• Gaussian 확산 모형의 기본개념.

굴뚝으로부터 연속적으로 배출되는 기체의 분산식은 (그림-1)과 같이 질량 전달법칙 (mass transfer theory)을 통해 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = \underbrace{U \cdot A \cdot C - U \cdot A \left(C + \frac{dc}{dx} \cdot \Delta x \right)}_{x\text{방향 advection}} - \underbrace{E_x A \frac{dc}{dx} + E_x A \left(\frac{dc}{dx} + \frac{dc^2}{dx^2} \cdot \Delta x \right)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{R \dots}_{\text{reaction (decay)}} \quad (1)$$

만약 시스템내에 오염물질의 물리, 화학적 작용을 고려하지 않는다면 오염물질의 농도분포는 유속(advection)과 확산(diffusion)에 의한 이동 및

발생원에 의해 결정되며 식(1)을 X, Y, Z, 방향의 3차원으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial c}{\partial x} - V \cdot \frac{\partial c}{\partial y} - W \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + E_x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_y \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + E_z \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S \dots (2)$$

여기서

c:오염물질의 농도(M/L³)

t: 시간(T)

u, v, w: x, y, z 방향의 유속(L/T)

E_x, E_y, E_z: x, y, z 방향의 확산계수(L²/T)

S: 발생원에 의한 농도변화율(M/L³/T)

식 (2)를 다음과 같은 가정과 함께 배출된 연기 중심선으로부터 농도분포는 정규분포(Gauss 분포)한다는 가정(그림-2 참조)으로 이분방정식을 풀어낸 식이(3)과 같은 Gaussian 확산 기본식이 다. (식의 자세한 유도과정은 JAPCA, VOL 28, NO.11, PP.1139~1141을 참조)

• Gaussian 확산식의 기본가정

① 풍향, 풍속, 농도가 시간에 따라 일정한 정

상상태 $\left(\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \right)$

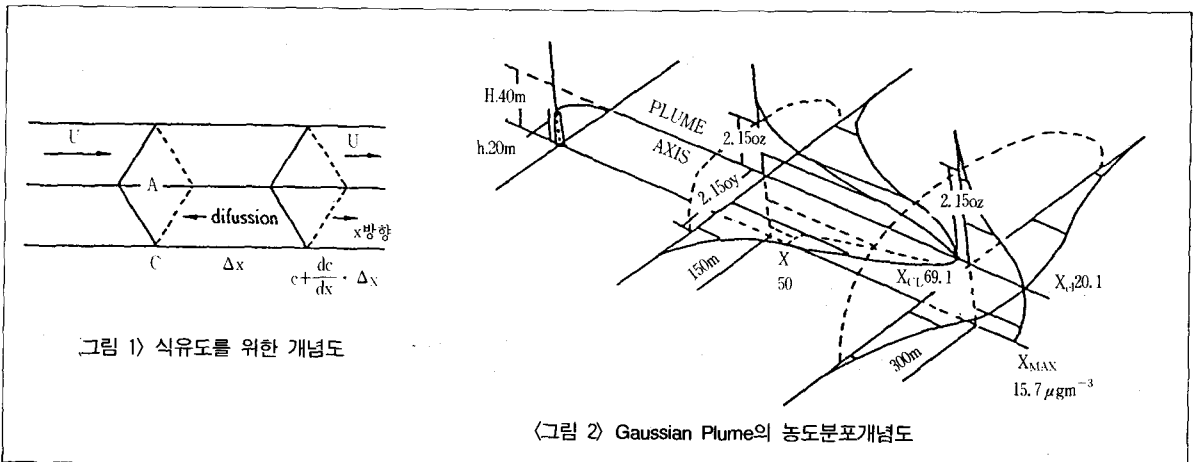


그림 1) 식유도를 위한 개념도

〈그림 2〉 Gaussian Plume의 농도분포개념도

② 바람이 부는 방향의 확산에 의한 이동이 유속에 의한 이동에 비하여 무시할 정도. ($E_x=0$)

③ E_x, E_y, E_z 는 x, y, z 방향의 거리에 관계없이 일정하다고 간주하여 상수로 취급한다.

④ 지면에서의 흡수, 반사의 발생이 없고

⑤ 풍속은 공간내에서 변화하지만 그 변화는 아주 작다고 간주하여 U, V, W 가 일정하다고 간주한다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp[-1/2 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 - 1/2 \left(\frac{He-Z}{\sigma_z}\right)^2] \dots (3)$$

여기서

Q : 오염물질 배출량(M/T)

U : 풍속(L/T)

y : 연기중심선에서 수평거리(L)

He:굴뚝의 유효고(L)

Z : 지면에서의 높이(L)

$$\sigma_y = \sqrt{2 \cdot E_y \cdot \frac{x}{u}} (L)$$

$$\sigma_z = \sqrt{2 \cdot E_z \cdot \frac{x}{u}} (L)$$

<문제 5> 직경 3.5m의 굴뚝에서 150°C의 연소가스 100m³/sec가 배출된다. 대기의 온도가 15°C 굴뚝높이에서의 풍속은 4.5m/sec이다.

다음의 Briggs식을 사용하여 풍하거리 300m에서의 연기 상승고를 계산 하시오.

$$\Delta H(m) = \frac{1.6F^{1/3} x^{2/3}}{U} \quad (X \leq 3.5X \text{인 경우})$$

$$\Delta H(m) = \frac{1.6F^{1/3} (3.5x)^{2/3}}{U} \quad (X > 3.5X \text{인 경우})$$

$$X = 14 F^{5/8} \quad (F \leq 55 \text{인 경우})$$

$$X = 34 F^{2/5} \quad (F > 55 \text{인 경우})$$

$$F = 2.54 V_2 d^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_a} \right)$$

x : 풍하거리 (m)

V₂ : 배출구유속(m/sec)

d:굴뚝직경(m)

① 먼저 F를 계산 하면

$$V_2(\text{배출구 유속}) = \frac{100}{\frac{3.5^2 \times \pi}{4}} \quad (\text{m/sec})$$

$$F = 2.54 \times \frac{100}{\frac{3.5^2 \times \pi}{4}} \times 3.5^2$$

$$\left\{ \frac{273 + 150 - (273 + 15)}{273 + 15} \right\} \approx 151.6$$

② 따라서

$$X = 34 \times 151.6^{2/5} = 253.4$$

③ 풍하거리 300m는 3.5 × 253.4 = 886.9(m) 보다 작으므로 연기 상승고는

$$\Delta H(m) = \frac{1.6F^{1/3} x^{2/3}}{\mu} \quad (X \leq 3.5X \text{인 경우}) \text{에서}$$

$$= \frac{1.6 \times 151.6^{1/3} \times 300^{2/3}}{4.5} = 85(m)$$

답 : 85m

<제 4교시>

<문제 1> 전기집진기의 집진실을 구획화(Sectionalization)하는 이유에 대하여 설명하시오.

정전집진기에서 일정한 크기의 분진이 제거되기 위하여 요구되는 가스통로의 길이는 이동속도에 의하여 대략 추정될 수 있다. 충전시간을 제외하면 입자가 집진극으로 이동하는데 요구되는 시간은 입자가 가스에 섞여서 정전집진기를 통과하는데 걸리는 시간보다 짧아야 한다. 이들 두 시간이 꼭 같다면 이론적으로 주어진 크기의 분진제거효율은 100%가 되는데, 이때 요구되는 가스통로의 길이, 즉 집진극의 길이 L은 다음식에 의하여 계산될 수 있다.

$$L = \frac{S V g}{W}$$

위의 식에서;

L = 집진극의 길이

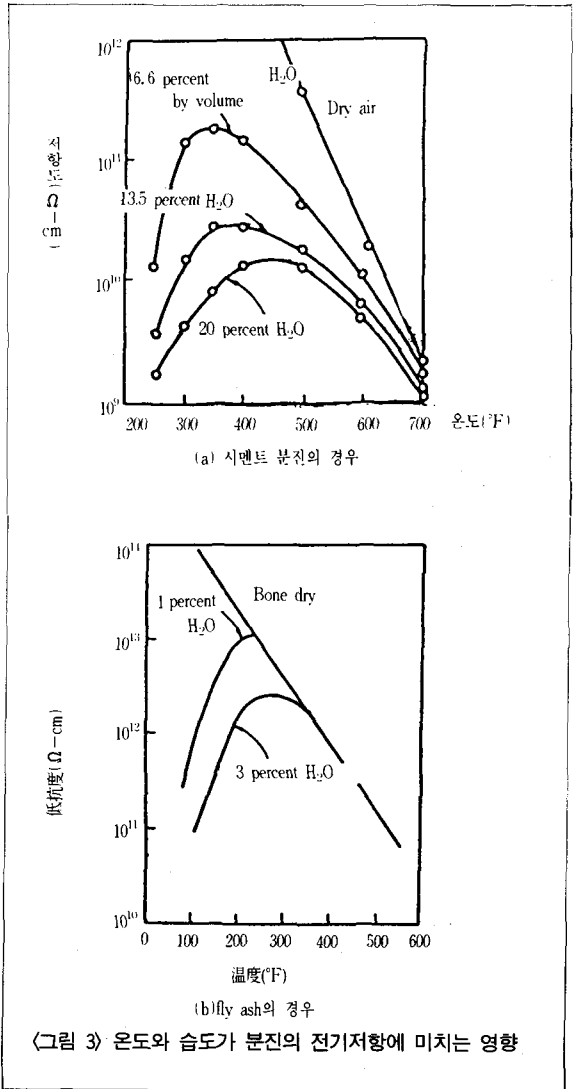
S=방전극과 집진극간의 거리.

Vg=집진극 사이에서의 가스속도
(대략 0.6~2.4m / sec이다)

실제에 있어서는 가스통로의 상류단에서 분진의 충전율을 위하여 요구되는 길이를 가산해 주어야 한다. 따라서 집진판 사이를 가깝게 구획화 하여야 가스통로의 길이를 짧게할 수 있으며 만약에 방전극의 단선시에도 전체적인 Shut down은 면하게 된다. 산업장에서 흔히 사용되는 전기집진기의 plate크기는 높이가 1.8~3.6m, 길이는 높이의 0.5~1.0배인 것이 보통이다.

<문제 2> 전기집진기에서 분진의 비저항(Resistivity)과 집진효율에 대하여 설명하고 분진저항이 작거나 클때에 효율을 높이기위한 방법에 대하여 논하시오.

정전기에 의한 분진제거의 그 다음 작용기구는 충전된 입자가 집진극에 침전하여 분진층을 형성하는 것으로, 이때 집진극에 침전된 분진이 가스중으로 다시 날아가는 것을 방지하기 위하여 충분한 접착력, 응집력, 그리고 전기력이 존재해야 한다. 분진층의 특성중에서 정전집진기의 작동과 관련시켜 특히 중요한 것은 분진의 전기저항도(electrical resistivity)로서, 공장에서 생기는 분진의 특성이 크게 다르므로 전기저항도는 $10^{-3} \sim 10^{14}$ ohm-cm로 크게 다르다. 분진의 전기 저항도가 10^1 ohm-cm이하이면 전하가 침전한 분진에서 집진극으로 재빨리 이동한다. 따라서 제거된 분진끼리 서로 잡아당길 수 있는 정전하가 불충분하게 된다. 그결과 분진은 가스속으로 다시 흘러들어 가게 되므로 제진효율이 나빠진다. 공장의 제진시설에서 부산물로 생기는 carbon black이 전기저항도가 낮은 예이다. 반면 전기저항도가 10^{10} ohm-cm보다 크면 정전집진기의 효율이 떨어진다. 왜냐하면 첫째, 전극간의 상당한 전압 강하가 전기저항도가 높은 분진층을 가로질러 일어남으로 전기절연효과가 생긴다. 따라서 corona를 형성하는 전력의 일부분만이 가스분자를 ion화 시키고 충전된 분진입자를 집진극으로 이동시키는데 이용된다. 높은



전기저항도에 의한 두번째 문제는 역 corona 또는 역이온화(back ionization)로서, 분진층을 통한 전압강하가 분진층의 유전강도를 능가하면 이러한 현상이 생긴다. 제거된 분진층 내에 갇힌 공기는 분진층을 통한 전압강하가 크면 이온화하며 양 ion으로 형성된 것은 집진극에서 떨어져나가 집진극으로 향해오는 이온화된 입자들을 중화시킴으로써 제거되는 분진의 양을 감소시킨다. 또한 이온화는 분진층 내에서 spark를 일으켜 제거된 분진을 가스흐름 속으로 튀어나가게 할 수도 있다.

이러한 효과들에 의하여 정전집진기의 제진효율이 감소된다.

정전집진기는 전기저항도가 $10^4 \sim 10^{10}$ ohm-cm 정도인 분진을 제거하는데 가장 효과적이다. 많은 공장에서 배출되는 많은 분진들의 전기저항도가 이 범위내에 들지 않으므로 제진효율을 증가시키기 위하여 운전조건을 변경시켜야 할 때가 종종 생긴다. 분진의 전기저항도에 크게 영향을 미치는 가스의 특성은 온도와 습도로서 시멘트 분진에서의 예가 그림 3(a)에 주어져 있다. 그림에서 가스의 습도가 감소함에 따라 전기저항도의 최대치가 낮은 온도에서 일어나며, 알맞게 건조한 분진인 경우에 최대전기저항도는 420°K 에서 일어남을 알 수 있다.

곡선의 모양은 온도의 변화에 따라 분진층을 통한 전도작용의 변화에 기인한다. 420°K 이하에서는 표면전도(surface conduction)가 주로 작용하여 전하는 분진에 흡착된 표면의 막에서 이동된다. 온도가 420°K 이상으로 증가하면 흡착현상은 줄어들고 용적전도(volume conduction) 또는 고유전도(intrinsic conduction)가 중요하게 된다. 고유전도는 입자를 통한 전하의 통과를 포함하게 되는데 이전 전하의 통과는 확실히 온도 및 입자의 구성에 의하여 좌우된다. 대부분의 물질에서 고유전도에 의한 전기저항도 ρ_e 와 절대온도 T 간에 식(5.62)와 같이 Arrhenius형의 관계가 성립된다.

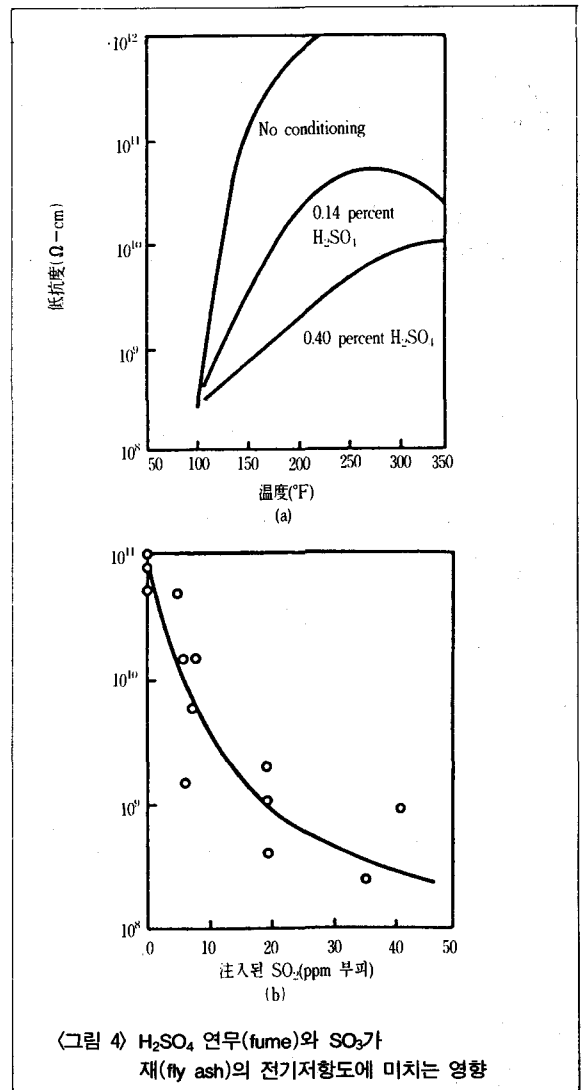
$$\rho_e = A \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (5.62)$$

위의 식에서 A 는 상수, E 는 전자활성화에너지(-값임), 그리고 K 는 Boltzmann 상수이다. 그림 3에서 곡선의 왼쪽 부분은 이론적인 값과 일치하기가 어렵다. 왜냐하면 흡착된 막(film)에 의하여 전도가 일어나기 때문이다. 그림 3(b)에는 재(fly ash)의 전형적인 경우인데 가스의 습도가 조금만 변화어도 전기저항도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 탄화수소를 연소시키는 경우에 배기가스내의 수증기 함유도는 대부분의 경우 5~10%이다.

분진의 전기저항도를 알맞는 값으로 만들기 위하여 가스에도 조절제(conditioning agent)를 첨가

하는 방법이 있는데 표면전도를 좋게하기 위하여 통상 낮은 온도에서 실시되며, 소량의 SO_3 나 NH_3 를 첨가하면 제거된 분진에 흡착되어 전해질로 작용함으로써 전기저항도를 크게 감소시킨다. 이들 두 물질과 이들 두 물질에 아주 가까운 화합물들이 현재로서는 가장 경제적으로 그리고 기술적으로 이용할 수 있는 조절제로서, 그림 4에 H_2SO_4 나 SO_3 를 조절제로 사용했을 때 재(fly ash)의 전기저항도에 미치는 영향이 잘 설명되어 있다.

상담 및 문의전화 484-1867



〈그림 4〉 H_2SO_4 연무(fume)와 SO_3 가 재(fly ash)의 전기저항도에 미치는 영향