

# 전기집진기 (Electrostatic Precipitation)

■ 자료제공 : 환경처

## 1. 정전기 침전 장치

전기 집진기는 정전기력을 이용하여 입자를 포집하는 장치이다. aerosol 입자는 처음에 충전이 되고 이어서 정전기장(electrostatic field)을 통하여 움직인다. 입자에 대한 집진력은 전하(q)와 전기의 전위경도(E)를 곱한 것이다.

$$F_E = q \cdot E \dots\dots\dots (1)$$

이때 q는 입자 전하(coulombs), E는 전기의 세기 또는 전위경도(potential gradient), (volts/cm),  $F_E$ 는 정전기력(electrostatic force), (coulombs/cm 또는 joules/cm)이다. E의 값을 매우 크게 하면(대략 2000V/cm) 아주 작은 입자라도 제거할 수 있어 매우 작은 입자들의 집진효율을 대단히 높게 할 수 있다.

전기집진의 개념을 충족하는데는 (a)가스와 함께 흐르는 입자에 전하를 주는 방법(b)기체 흐름의 직각 방향으로 정전기장의 확립(c)입자가 기류를 통하여 집진극을 이동한 후 포집하는 방법 등이 필요하다.

이러한 단계는 흐르는 가스에 두 개의 전극이 설치된 장치안에서만 가능하다. 한 개의 전극은 corona 방전극 또는 active electrode라고 하는 자유롭게 매달려 있는 고전위 wire or cable이다. 다른 한 개는 collecting 또는 passive electrode라고 하는 접지된 넓은 표면의 금속이다.

전기 집진기는 2개의 기하학적인 형태 중에서 하나를 사용하는데, 하나는 집진극이 속이 빈 cylinder를 수직으로 놓아 그 안에 공축으로 wire가 매달려 있으며 다른 하나는 집진극이 수직으로 평행하게 평편한 판으로 일정한 공간 간격을 유지하며 그 사이에 몇 개의 wire가 매달려 있는 것이다. 그 장치는 “봉쇄지역(containment zone)” 또는 “표면(surface)”집진기 형태의 하나이다.

전극사이에 전위차를 충분히 크게 하면 wire(방전극)에서 corona방전이 형성된다. 이 corona에서 기체 분자(주로 O<sub>2</sub>)는 wire와 같은 부호의 충전으로 이온화된다. 이온들은 충돌하거나 부착되어 입자들을 충전

시키고 집지 표면극(ground surface electrode)으로 이동하게 된다. 입자들이 집진극(grounded electrode)에 부딪히면 전하를 잃고 집진극 표면에 붙어있게 된다. 고체입자들이 표면에 누적층을 이루면 전극을 진동(rapping)시켜 입자를 떨어뜨리거나 물로 씻어(flushing)내려 집진함(hopper)에서 처리한다.

만일 wire의 전위가 너무 높으면 break-down이 되고 기류를 지나 집진극에 sparking이 일어난다. 물론 이것은 집진장을 파괴한다. 그러나 전위는 가능한 한 계 전위에서 운전하도록 하기 때문에 sparking은 산업 현장에서 관례에 따라 발생을 허용하기도 한다. corona wire의 전위는 +(positive)또는 -(negative)가 있으나 산업체의 분진처리장치에는 보다 높은 전위를 sparking이 일어나기 전에 얻을 수 있기 때문에 보통 negative(-)를 사용한다. sparking은 오존이나 이산화질소와 같은 기체오염물을 형성할 수 있다.

2단 집진기(two-stage precipitator)는 기본설계의 변형이다. 이것은 corona방전입자 충전이 첫단계(first stage) 또는 충전지역에서 이루어지고 입자 집진을 천장(field)에서 유지하기 위하여 고전압 비방전극(non-discharging electrode)으로 된 두번째 지역에서 수행한다.

평판형(flat plates)집진극은 처리가스량 1000ft<sup>3</sup>/min에 대하여 수백 ft<sup>2</sup>의 면적을 가질 수 있기 때문에 집진판은 대단히 많아질 수가 있다. 전형적인 판형 집진판은 높이가 30~50ft에 대하여 폭이 30~10ft정도로 만들어 4~15in간격으로 집진실안에 병렬로 배열한다. 이때 집진실안을 통과하는 처리가스속도는 4~8ft/s범위를 갖는다.

완벽한 전기 집진 장치는 집진기중에서 보다 복잡한 장치임에는 틀림없다. 이 장치에는부대 시설이 많고 전기력과 입자 사이의 상호 작용이 복잡하다. 그림 1은 Nichols와 Oglesby에 의해 장치의 흐름과 서로의 관계를 나타낸 것이다. 굵은선은 입자 포집의 기본 원리 단계를 연결한 것이고 가는선은 공정에 영향을 끼치는 보조적인 관계를 나타낸 것이다.

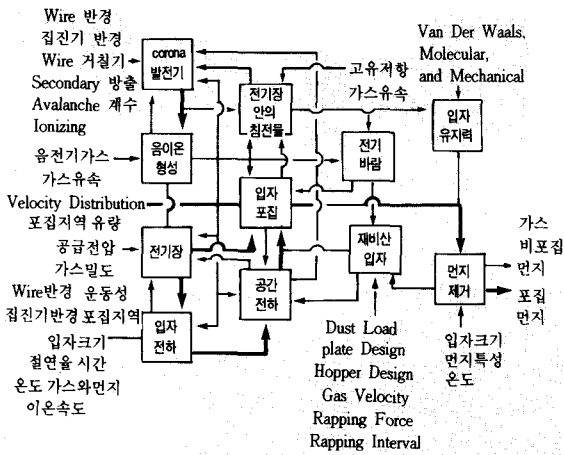


그림 1 전기집진 장치 model

2. 장치모델 (Modelling the System)

(1) 개요 (General Aspects)

복잡한 장치의 전체를 모델링한다는 것은 대단히 어렵다. 다만 지금까지 전기집진 장치에 대하여 연구 개발 되어진 모든면의 지식을 종합하여 computer program으로 완성할 수는 있다. 그러한 모델은 southern research institute에서 U.S.EPA에 대하여 개발되었다. 여기서는 이와 같은 완전한 model은 나타내지는 않겠다. 보다 중요한 것은 기초적인 부분 효율식을 개발하고 이어서 함수관계를 기술하는 것이 좋은 것이다.

실제 부분효율 관계는 실험에 의해 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 이 곡선들의 모양은 대단히 중요하다. 입경이 0.1~1.0 $\mu$ m의 입자들에 대하여 최소 집진 효율점을 나타낸 것으로 모델은 이러한 움직임에 대하여 설명하겠다.

집진기를 통과하는 가스는 보다 자유로워 압력손실은 비교적 낮은 편이다. (대체로 0.5 in H<sub>2</sub>O 이하). 일반적인 조건에서 병렬 집진극을 통과하는 기체의 R<sub>0</sub>는 10<sup>4</sup>이다. 흐름의 난류도가 높은 것은 보통 큰 규모의 장치에서 볼 수 있다. 난류확산에 의한 미세한 aerosol입자들의 전달은 집진극에 근접한 경계층을 제

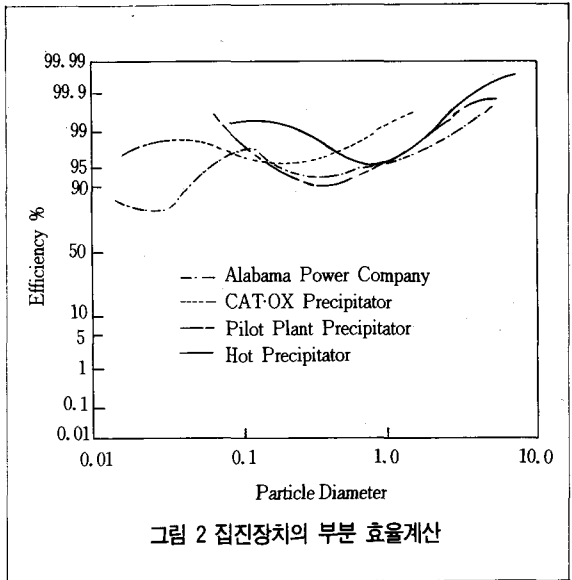


그림 2 집진장치의 부분 효율계산

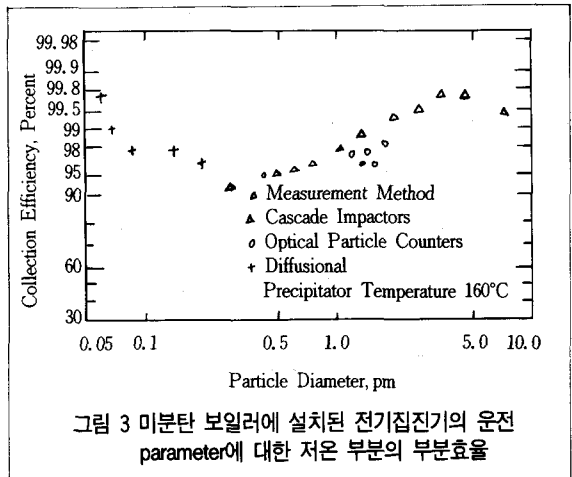


그림 3 미분탄 보일러에 설치된 전기집진기의 운전 parameter에 대한 저온 부분의 부분효율

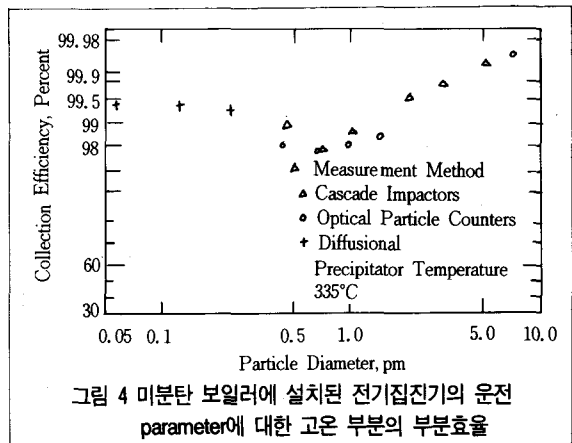


그림 4 미분탄 보일러에 설치된 전기집진기의 운전 parameter에 대한 고온 부분의 부분효율

외하고는 정전기력에 의해 쉽게 지배된다.

큰 입자들은 비교적 난류에 영향을 받지 않고도 충분한 관성을 갖는다. 측면혼합모델(lateral-mix model)은 미세한 입자들에 적용할 수 있으나 큰 입자들은 잘 적용이 안 된다. 집진 과정으로서 corona방전극 주변을 흐르는 기체는 집진극의 끝으로 가면서 입자들이 포집된다. 따라서 기체 흐름의 횡단면에 먼지 농도 분포는 일정하지 않다.

가스 이온은 전계의 영향아래 발생(active)극에서 수신(passive)극으로 향한다. 이것을 전기풍(electric wind)이라 하며 가스 흐름과 횡단 흐름(cross-current)방향을 갖는다. 그리고 입자 분포와 집진, 재비산(reentrainment)등에 영향을 끼친다.

입자가 한번 집진극에 도달하면 처리되고 더 이상 집진과정에 영향을 주지 않는다고 가정할 수는 없다. 입자의 물성이 좋은 전도체인 경우에는 입자가 집진극에 도달하자마자 전하를 잃어 유동가스에 쉽게 재유입된다. 만일 반대로 전도성이 나쁜 물질인 경우에는 입자가 집진극에 달라 붙어 절면층을 형성하게 되고, 먼지 포집을 방해하여 불꽃방전을 일으킬 수가 있다. 이것을 역 코로나(reverse corona)효과라 한다. 따라서 입자의 전기 저항은 약  $10^8 \sim 10^{10}$  ohm-cm가 적당하며 어떤 면에서는 방전도 부드럽다. 전기저항은 장치내의 가스 온도와 성분에 따라 대단히 강한 영향을 받으므로 집진기의 성능에 중요한 역할을 한다.

전기 집진장치는 장치의 간단한 형태보다도 더 중요한 것은 없다. 다른 여러요소(factor)중에서 전기장(electrical field)을 균일하도록 하기 위하여 집진극 공간을 일정하게 배열한다. 만일 매달려 있는 방전극 wire가 집진극 표면에 평행하지 않으면 전위정도(potential gradient)E는 공간이 적은 곳에서 더욱 높게 된다. 장치의 수직 거리는 수 ft이고 전극간의 거리는 몇 inch이기 때문에 연직(plumb)상태에서 조금만 벗어나도 집진지역의 E는 현저하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 가스의 균일한 속도분포(gas velocity distribution)도 중요하다. 높은 속도로 통과하는 지역은 다음에 보겠지만 집진에 불균형한 영향을 끼친다.

전기집진장치중에 하나는 더운 가스를 처리할 수 있도록 만들어 질 수 있다. 1970년대에는 석탄 연소에서 발생하는 약  $800 \sim 900^\circ\text{F}$ 의 더운 연도 가스로 부터 fly ash를 집진하기 위한 장치가 여러번 설치되었으나 중

지되었다. 가압된 유동층 연소와 같은 고온고압(1366 K와 35 atm 이상)에서 시도를 했으나 야금문제(metallurgical problems)때문에 개발되지 못했다. 이와 같은 고온고압에 대한 modeling계산은 그 온도와 압력에 관련된 모든 것들의 물리적 성질(가스속도, 입자저항, 이온이동 등)을 정확히 알아야 한다. 이것은 일반적인 온도와 대기압에서 사용하는 값과는 대단히 큰 오차가 있기 때문이다.

(2) Elementary Model for Particle Collection

집진과정(collecting process)에 대한 model은 먼저 정전기력(electrostatic force)에 의한 집진속도의 계산부터 시작된다. 이것은 stoke's 법칙 입자를 전위경도 E의 전장(field)에서 전하 q를 갖는 입자의 패적 방정식을 유도한다.

입자가 전장의 방향을 이동한 거리는

$$Z = \frac{q \cdot E_p \cdot d_p t}{54 \cdot \pi \cdot \mu^2} (1 - e^{-\sqrt{\tau}}) \dots\dots\dots (2)$$

로 나타내었다.

이것은 시간  $t \sim 5\tau$  후  $W = q \cdot E / 3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \mu_g$ 가 정상상태를(steady-state)를 이루었을 때를 나타낸다. 이때를 정상상태 입자 이동속도(steady-state particle migration velocity)라 하며 W로 표기한다. 그리고 입자는 정상전하(steady charge)  $q^*$ 를 가지며(대체로 입경이  $1 \mu\text{m}$ 이하) cunningham factor( $K_c$ )을 적용한다.

$$W = q^* \cdot E \cdot K_c / 3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \mu_g \dots\dots\dots (3)$$

전형적인 전기집진기 조건에서  $Re_p$ 의 계산은 입경  $60 \mu\text{m}$ 까지 stoke's 법칙이 적용될 수 있음을 보인다.

전기집진기의 입자 집진 model은 다음과 같은 가정하에서 이루어진다.

- (1) 집진지역을 곧바로 들어오는 입자들은 충분한 하전  $q^*$ 를 얻는다.
- (2) 물론 기체흐름의 중심은 난류이다. 집진층의 두께  $\delta$ 는 방전극에서 층류의 흐름이 형성되는 곳이다.
- (3) 집진층의 두께  $\delta$ 는 집진극(collection electrode)에서 집진기를 따라 흐르는 gas층류흐름의 직선속도가 W와 같은 점까지의 거리로 정의한다.
- (4) 집진층에서 입자는 이동속도(migration velocity)

y)로 기류를 횡단하여 움직인다. 이동속도는 기체속도에 영향을 받지 않으며 층류층 지역의 전계강도 E의 크기에 따라 결정된다.

(5) 기체 중심의 난류는 평균 가스 속도로 하여 일정하게 취한다. (불균일한 가스속도에 대한 것은 다음에 다룬다)

(6) 난류와 확산력(diffusion forces)은 (2)항에 의해 중심지역을 횡단하는 입자 농도  $M_i$ 를 일정하게 분포하도록 한다. 그리고 이 지역에서의 이동속도 영향은 무시한다. 앞에서 기술한 lateral mix model이라 가정한다. (이것은 미세한 입자에 대한 응용model로 제한한다.)

(7) 먼지 입자들은 상호 반발 작용(척력)을 무시할 수 있을 만큼 충분히 떨어져 있다.

(8) 부식이나 재비산(reentrainment), 불균일한 가스분포, back corona와 같은 방해작용은 없다. 정의에 의해 시간  $\Delta t = \delta / w_i$  동안 집진층내에 모든 입자 i등급(dpi)들은 집진벽으로 움직여 집진된다. 이 시간동안 가스는 거의  $\Delta l = V_0 \cdot \Delta t$  만큼 움직인다. 주어진 가스량( $s \cdot \delta \cdot \Delta l$ )으로부터 처리되는 입자수는

$$n_i \cdot S \cdot \delta \cdot \Delta l = n_i \cdot S \cdot \delta \cdot V_0 \cdot \Delta t$$

이때 S는 집진표면의 주변길이의 단위이다. 같은 시간에 단면적 A인 집진기안에 전체 입자수는  $n_i \cdot A \cdot \Delta l$  인 것이다. 처리된 입자의 증가율은

$$\frac{dn_i}{n_i} = - \frac{S}{A} \cdot \frac{W_i}{V_0} dl$$

위의 모든 조건의 가정아래, 집진표면의 전길이 L까지 적분하면

$$\int_{n_{oi}}^{n_i} \frac{dn_i}{n_i} = - \frac{S}{A} \cdot \frac{W_i}{V_0} \int_0^L dl$$

따라서 집진효율은

$$\eta_i = 1 - \exp(-S \cdot L \cdot W_i / A \cdot V_0) \dots \dots \dots (4)$$

이때  $S \cdot L$ 은 집진극의 전기표면적과 같으며  $A \cdot V_0$ 는 가스유량 Q와 같다.  $S \cdot L / Q$ 의 비를 비포집면적(specific collecting area) SCA이라 부르고,  $ft^2 / 1000acfm$ 의 단위를 사용한다. 대체로 전기집진기에서의 범위는  $100 - 800ft^2 / 1000acfm$ 이다.

침전기(tubular precipitator)의  $A = \pi D^2 / 4$ 이다.

식 4에서 통과율(penetration)  $p_i$ 는

$$p_i = \exp\left[-\frac{W_i}{V_0} \cdot \frac{L}{b}\right] \text{ (plate)} \dots \dots \dots (5.a)$$

또는

$$p_i = \exp\left[-4 \frac{W_i}{V_0} \cdot \frac{L}{b}\right] \text{ (tubular)} \dots \dots \dots (5.b)$$

$W_i$ 는  $dp_i$ 에 따른 것이므로 식 6은 부분효율이다. stoke's 법칙에서 식 6에  $W_i$ 를 치환하면

$$\eta_i = 1 - \exp\left[-\frac{S \cdot L}{Q} \cdot \frac{C_i \cdot q_i^* \cdot E}{3\pi \mu dp_i}\right] \dots \dots \dots (6)$$

여기서  $q_i^*$ 는 이 model을 완전하게 한다. 온도와 압력은  $C_i / \mu$ 에 영향을 끼칠 것이며  $q_i^*$ 에도 영향을 줄 것이다.

### 3. 입자충전(Particle Charging)

입자충전은 (a) 이온충격(ion bombardment)과 (b) 이온 확산(ion diffusion)은 분명한 mechanism으로 전하를 갖는다. 이것은 또한 전계충전(field charging)과 확산충전(diffusion charging)에 의해 미리 알려져 있는 사실이다. 입자들은 전장내에서 (s) 동선(lines of flux)을 따라 직접 움직이는 이온들과 (b) 이온과 입자들의 무질서한 열운동(random thermal motion)에 의해 전하를 얻게 된다.

#### (1) 전계 충전(Field Charging)

무하전 입자는 그 주변의 전속선(line of flux)에 유입되어 전속선을 따라 움직이는 이온들과 직접 충돌하여 입자에 부착된다. 입자의 하전은 전속선의 이온들이 입자와 접촉하는 것에 점차 반발할때까지 계속된다. 충전이 완료되면 입자는 이온충격(ion bombardment)으로부터 포화 또는 최대전하를 얻게 된다. 따라서 시간에 따른 전하  $q_i^*$ 는

$$q_i^* = q^*_{sati} \left[ \frac{1}{1 + t_0/t} \right] \dots \dots \dots (7)$$

여기서  $t_0 = 4 \cdot \epsilon_0 / N \cdot e \cdot k$ 로서 dp의 시간 독립 상수이다. 그리고

$$q_i^*_{\text{sat}} = \pi \left[ \frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right] \cdot \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot dp_i^2 \dots \dots \dots (8)$$

N=이온농도(ion concentration)(수/m<sup>3</sup>)  
 K=이온이동도(ionmobility), velocity/unit field strength, m<sup>2</sup>/s·v  
 ε=비유전 상수(dielectric constant)  
 ε<sub>0</sub>=진공 유전율(permittivity of free space), 8.85×10<sup>-12</sup>coulombs<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>이다.  
 실제목표로 하는 포화전하 q<sup>\*</sup><sub>sat</sub>는 t=99to (99%)에서 얻을 수 있다. 따라서 N≈10<sup>16</sup> ions/m<sup>3</sup>, K≈10<sup>-4</sup>m/s·v, e=1.61×10<sup>-15</sup>coulombs일때,

$$t_0 = \frac{4 \times 8.85 \times 10^{-12}}{10^{15} \times 1.61 \times 10^{-19} \times 10^{-4}} \approx 2.2 \times 10^{-4} \text{s}$$

그리고 99t<sub>0</sub>=0.022s이다. 최대기체속도가 8ft/s일때, 모든 입자의 대부분은 충전 지역내에서 약 2in정도 움직이면 포화전하를 얻는다.

식 7의 전하량은 온도와 압력에 직접적인 영향을 받지 않는다. 그러나 최대 E<sub>0</sub>(전장의 세기)는 높은 온도에서 낮아질수 있는데 이것은 과도한 스파크가 발생하기 때문이며 압력을 증가시키므로써 방지할 수 있다.

### (2) 확산충전(Diffusion Charging)

확산충전의 경우는 무작위 열운동 때문에 입자와 이온들의 충돌이 이온장(ion field)내에서 계속적으로 일어난다. t=0일때, q<sub>i</sub><sup>\*</sup>=0라는 가정 아래 확산 전하는 다음과 같다.

$$q_i^* = \frac{2\pi \epsilon_0 \cdot K \cdot T \cdot dp_i}{e} \ln \left[ 1 + \frac{e^2 \cdot N \cdot dp_i^2 \cdot t}{2 \epsilon_0 \sqrt{2m \cdot K \cdot T}} \right] \dots \dots \dots (9)$$

여기서 m=이온질량(mass of anion),  
 K=볼츠만상수(boltzman constant)이다.  
 고온, 고압에서 q<sub>i</sub><sup>\*</sup>는 증가한다.  
 이 두가지 충전방법의 중요성은 모두 입자의 입경과 관계가 있다. 입경 1μm 또는 그 이상의 입자는 전계 충전에서 중요하고 약 0.4μm이하의 입자들에는 식 8의 q<sub>i</sub><sup>\*</sup><sub>sat</sub> 값이 대단히 작아지기때문에 확산 충전의 중

요성이 점점 커진다. 이들 중간 범위의 입자들에게는 위 두가지 방법이 모두 고려되어야 한다.

### (3) 혼합충전(combined charge)

혼합충전의 원리는 입자의 총 전하를 얻기 위하여 식 8과 식 9에 의해 주어진 값의 합은 만족할만하게 쉽지 않다. 얼마간의 자장에 의해 전하율의 합과 확산전하는 전체비율이 주어져야만 한다.

혼합충전비 dq/dt에 대한 전체이론은 Smith와 Mc Donald에 의해 개발되었는데 이것은 실험적 값과 매우 잘 일치된다. 그러나 불행히도 이것은 간단한 계산에 의해서도 대입이 어렵도록 나타난 형태이다.

그들의 접근은 세 영역 안에서 입자 표면과 각 영역에서 충돌할 수 있는 기체의 확률평가로 나누어진다. 이것은 각 영역의 전하율처럼 나타난다. 그리고 그 충전하율은 이런 3개의 비율의 합과 같이 얻는다.

그 영역은 그들이 입자에 충돌하는것 처럼 그 위치의 전장선과 일치한다고 정의한다. 전하율에 의한 식의 결과는 꽤 복잡하다. 그것은 q<sub>i</sub><sup>\*</sup>에 의한 수의 적분방법으로 이들 값을 풀 수 있다. 한편 그것은 큰 입자와 높은 전지장에 의해 식 8형태로 감소한다. 그리고 낮은 자기장에 의해 식 9의 형태로 된다. 전하장의 결합 효과에 의해 Cochet이 초기에 나타냈다. 그리고 확산전하는 앞에서 논한것 처럼 기체분자의 평균 자유행로를 λ로 표시한다.

이 식은 아래와 같이 실행되는것 처럼 실예가 되는 계산에 적합하다.

$$q_i^* \left[ \left[ 1 + \frac{2\lambda}{dp_i} \right]^2 + \frac{2}{1+2D/dp_i} \left[ \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right] \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot dp_i^2 \cdot \frac{t}{t+t_0} \right] \dots \dots \dots (10)$$

결과적인 방정식은 다음 형태로 쓸 수 있다.

$$q_v^* = adp_i^2 + bdp_i \ln(1+ctdp_i) \dots \dots \dots (11)$$

여기서 첫번째 항은 식 8의 q<sup>\*</sup><sub>at</sub>이다.  
 일반적인 작동조건은 W=5, E<sub>0</sub>=3×10<sup>6</sup>V/m, T=300K, N=2×10<sup>15</sup>ions/m<sup>3</sup>, m=5.3×10<sup>-26</sup>Kg(O<sub>2</sub>이온물질)으로 설정한다.

Crawford는 식 11을 다음과 같이 나타냈다.

$$\frac{q_i^*}{q_{\text{ati}}^*} = 1 + \frac{8.047 \times 10^{-9}}{dp_i} \ln(1 + 7.79 \times 10^{10} t dp_i) \quad (12)$$



# 自然, 人間, 그리고 和成

新生活樂園의 創造 - 화성의 기업이념입니다.

푸른산, 맑은하늘, 깨끗한 물,  
우리의 소중한 자산입니다.  
우리는 신생활낙원 창조를  
기업이념으로  
지금 이시간에도 끊임없이  
연구, 실천하고 있습니다.  
和成은 풍요로운 미래 생활환경 창조에  
여러분의 견실한 동반자가 되겠습니다.

## 수질분야

- 순수처리시설, 용수처리시설
- 폐수처리시설, 상·하수도 처리시설
- 오수·축산·분뇨처리시설

## 대기분야

- 전기집진시설, 중력·여과집진시설
- 세정집진시설, 유해가스처리시설

## 폐기물분야

- 도시쓰레기소각시설, 산업폐기물소각시설
- 병원·학교 폐기물소각시설

## 기타분야

- 소음·진동방지 시설



## 화성산업

본 사 : 대구시 중구 덕산동 53-3 (우) 700-717  
 전화 : (053) 255-5165 FAX : 254-1039  
 서울사무소 : 서울 중구 장교동 1 뽕령당17층 (우) 100-220  
 전화 : (02) 774 6111 FAX : 776 9791

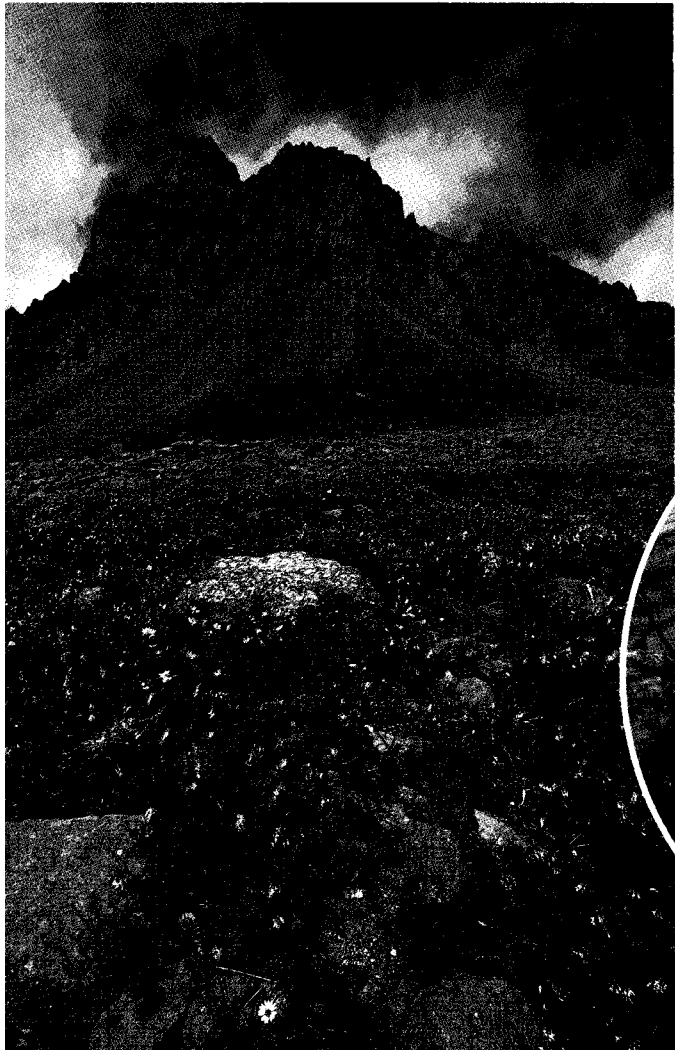
**화보 · 백두산의 야생**  
 \* 사진: 박창근 제공 \*

# 광활한 백두산 벼파에는 우리 민족의 기상이라고 할 수 있는 각종 야생화들이 생명력을 다부지게 이어가고 있다!

새해에 가장 중점되는 환경계의 이슈는 그린라운드 대변되는 환경문제의 국제화 시대라고 할 수 있다. 따라서 이런 국제화에 대비하기 위해서는 먼저 우리의 것을 철저히 알아야 하겠는데, 그것은 가장 한국적인 것이 가장 국제적이기 때문이다.

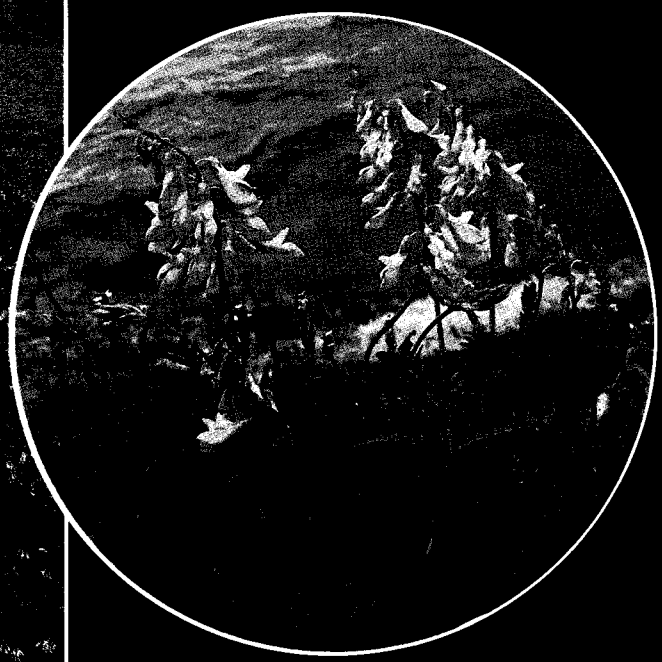
그래서 새해부터는 본지의 특별화보로 우리나라의 야생중에서 특히 백두산의 야생을 본회 고문인 박창근 한국환경보호협의회 위원장의 앵글로 찾아보기로 했다.

이번에 백두산 야생의 소개에서는 백두산의 야생화 뿐만 아니라, 원시림과 그들의 생물중에서 버섯 그리고 곤충과 새 등 백두산의 모든 야생동물을 소개한다. <편집자 주>



◀ 개황기 (*Astragalus uliginosus*)

일반적으로 높은 산의 풀밭에서만 자라는 여러해살이 풀이다. 우리나라에서는 백두산 지역의 고원에서만 자란다. 몸은 전체에 가는 털이 나 있고, 줄기는 곧게 섰으며, 가지가 갈라져 있다. 약 1미터 정도 자란다. 잎은 어긋나 있으며, 잎자루가 짧고 작은 잎은 긴·타원형이며, 잎끝이 날카로운 것이 특징이다. 꽃은 자주색으로 6~8월에 피는데 꽃자루가 길고 많은 꽃이 밀착해 있다.



▶ 큰오이풀(*Sanguisorba alpina*)

백두산 지역의 풀밭에서 자라는 여러해살이풀로 키는 약 30~80센티미터 정도 자라고, 뿌리는 두툼하며 곧다. 잎은 어긋나 있으며 잎자루가 길다. 특히, 작은 잎은 잎자루가 짧고 긴 타원형으로 잎 밑이 다소 하트형이며 끝이 뽕뽕하다. 꽃은 백색으로 7~9월에 피는데 줄기 끝에 나며, 원주형이며 꽃잎은 없다.



◀ 흰장구채(*Melandryum firmum* Rohrb)

주로 산에서만 볼 수 있는 두해살이풀로 약 30~80센티미터 정도 자란다.

꽃은 7월에 피고, 백색이며 열매는 9월에 익는다. 꽃도 예쁘지만 열매 모양이 보기 좋아 사람들이 즐겨하는 꽃이다.



# 21C의 환경기술



## 특 징 활성오니 처리의 문제점 완전해결

- 작업현장 악취제거
- 운전비 절감(20% 이상)
- 약품, 무첨가 슬러지 탈수가능
- 처리수 수질 BOD 10ppm이하
- 위생학적 우수한 처리수 확보(무균·무취)
- 처리수의 중수도 재이용 가능
- 질소, 인 제거율 90% 이상
- 탈수오니 비료화 가능



▲ BIO REACTOR

### ■ 표준활성오니법과의 비교 ■

比較項目 處理法	細菌의 種類	代謝物	反應의 種類	處理溫度	處理水中의 大腸菌의 有無	惡臭의 發生	電力消費	容種負荷	發生污泥의 土壤還元
自然燃淨化法	土壌性通性嫌 氣性細菌·土 壤性好氣性細 菌	有機酸·아미 노酸多糖類等, 脛늘 露出基가 있는 化合物	重縮合을 包含 한 巨大分子化	4~45°C	無	無	小	大	可
標準活性 汚泥法	好氣性細菌通 性嫌氣性細菌	有機酸·아미 노酸多糖類· 酵素等	酵素分解	7~27°C	有	有	大	小	不可

## 적용대상

과실 및 채소가공, 빵, 과자 및 국수 제조, 설탕제조, 수산물 처리가공 도축시설, 낙농품제조, 동식물 유지제조, 두부 및 장류제조

## 실 적

오수부분: 리버사이드 호텔, 북한강 호텔, 한성골프장 등  
폐수부분: 염색, 탁주, 도계장, 수산물가공

## 廢棄物處理分野: 安全化處理法

### “슬러지 처리의 결정판”

## 특 징

### 유기성 폐기물 재활용 시스템

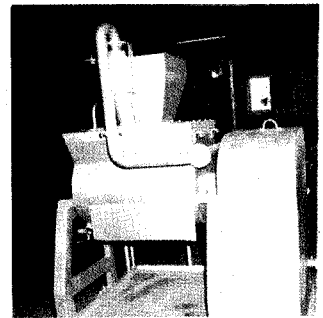
- 슬러지 발생과 동시에 처리가능(처리시간 5분)
- 처리비 절감(위탁처리 비용으로 처리가능)
- 설치면적이 적다(폐기물 10Ton 처리시 설치면적 10평)
- 유기성폐기물 안정화 처리후 비료화 가능

## 적용대상

유기성 폐수처리의 탈수 슬러지, 도축폐기물, 육가공폐기물  
수산물 가공 폐기물 등

## 실 적

남양주군유기질 비료공장(1990. 4 준공) 남제주축협유기질 비료공장(1993. 3. 8 준공)  
-KIST와 공동설치- 군위축협 유기질 비료공장(1993. 5. 준공)



안정화 반응기

	<h2>森湖環境(株)</h2> <p>SAM HO ENVIRONMENT CO., LTD</p>	<p>사무실: 서울시 서초구 양재2동 362-3 대표전화: (02) 529-2366 F A X: (02) 529-2369</p>
--	---	---

여기서  $dp_i$ 는 거리(meter)이고,  $t$ 는 시간(second)이다.

#### 4. 부분효율 방정식

명시된 부분효율방정식은 방정식 6에서  $q_i^*$ 를 적절하게 표현하며 대치하면서 얻을 수도 있다. 만일  $q_i^*$ 가 식 6으로 얻어지면 식 6은 다음 형태가 될 것이다.

$$\eta_i = -\exp - KC_i [adp_i + t \ln(ctdp_i)] \dots \dots \dots (13)$$

In항에서 조대입자크기는 거의 무시되고  $C_i$ 는 약 1이다. 그러므로

$$\eta_i = -\exp - \left[ \frac{SL}{Q} \left[ \frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right] \frac{\epsilon_0 E_0 E}{\mu} \right] \cdot dp_i \dots \dots \dots (14)$$

$N=1$ ,  $\mu$  값은 일반적으로  $SL W_i / Q dp_i$ 의 값을 대표하지만, brackets에서의 한 주기를 대표한다고 봤을 때 이 식은  $\eta = 1 - \exp M \cdot dp \cdot N$ 의 형태를 띠고 있다는 사실에 주목해야 한다.

2단식집진기에서는  $E_0$ (하전부),  $E$ (집진부)는 각각 구분되어 있고 1단식집진기에서는 하전부와 집진부가 동일한 전계에서 이루어진다. 그러나  $E$ 가 집진판 가까운 곳에서 포착되어 진다고 가정을 하면  $E$ 는 반드시  $E_0$ 와 같지는 않다. Gooch와 France는 방전축과 집진극 사이의  $E_0$  평균값을 얻기를 원했고 Leutert와 Bohlen의 수식에 의해  $E$ 값을 결정했다. 이것은 Gooch와 MacDonald식에 의해 좀더 상세하게 알 수 있다.

방정식 14는 식 4에 근거를 둔 가정이 썩 잘 들어맞는 균일한 구조를 가진 구형입자에 대한 실험적인 부분효율 측정치와 일치한다. 그러나 그것은 그림 2, 3, 4에서 인용한 그런 실험 결과로는 설명할 수 없다. 초미세한 입자의 행동을 설명하기 위해서는 13의 형태에 완전히 부합되거나 식 10과 같이  $q_i^*$ 를 대표하는 다른 식이 사용되어야 한다. Feldman은 식 10을 대입하고  $(\epsilon - 1) / (\epsilon + 2) \approx 1$ ,  $t$  to라 하면 식 13과 비교되는 부분효율식으로서

$$\eta_i = 1 - \exp - \frac{SL}{Q} \frac{\epsilon_0 E_0 E}{3\mu} (C_i A_i dp_i) \dots \dots \dots (15)$$

여기서  $A_i$ 는 다음과 같고 또한  $C_i$ 는 식  $C = 1 + Kn [1.246 + 0.42 \exp(-0.87 / Kn)]$ 에서 주어진 것으로  $\lambda /$

$dp_i$ 의 함수이다.

$$A_i = (1 + 2\lambda / dp_i)^2 + 2 / (1 + 2\lambda / dp_i) \dots \dots \dots (16)$$

$(C_i A_i dp_i)$ 항은 입자의 크기에 관련되고 식 6에서는  $\eta_i$ 의 최소값의 관계를 찾기 위하여  $dp_i$ 를 구별하여야 할 것이다. 주어진 전기집진기가 어느일정한 운영상황에서는 최소치의  $\eta_i$ 에 대한  $dp$ 의 값을 단지  $\lambda$ 에만 달려 있다는 사실은 명백하다.

$\lambda$ 의 변화는 오직 식  $\lambda = U / 0.499U$ 에서 주어지는 온도, 압력, gas의 성분의 함수이다.

Farber는  $\lambda$ 값의 계산을 하였고 그 식은 다음과 같다.

$$dp_{min} = 2.855 \lambda \dots \dots \dots (17)$$

전형적인 유량가스는 160°C에서  $dp_m$ 이 0.3  $\mu m$ 이고 335°C에서  $dp_m$ 은 0.4  $\mu m$ 이다. 그림 3, 4에 보면 이 값들은 실험적인 값들과 잘 비교되어 있다. 그리고 실험에서 나온 부분효율곡선의 모양은 자연스러운 입자 하전현상에 의해 설명된다.

#### 5. DEUTSCH-ANDERSON 방정식

##### (1) 집진율 매개변수

식 4는 Deutsch-anderson방정식이고 거의 집진기의 기본원리로 사용된다. 이 식이 부분효율 방정식에 사용될때는 총괄 효율로서 사용된다. 이것은  $W_i$ 를 소위 말하는 이동속도보다 좀 더 타당한 "집진율 매개변수"  $W_e$ 로 대체한다. 이 양은 어떤 종류의 전체면지와 작동조건이 어떤 장치하에서의 집진작용을 나타낸다. 이것은 실험적인 data로부터 역계산에 의해 결정되는 것임으로 실제적인 실행매개변수라 할 수 있다.

이런 data의 아주 작은 부분을 이용해서 다양한 응용을 할 수 있다. (although much of it is proprietary)  $W_e$ 의 값은 dust의 종류, gas 속도, 표면의 길이  $L$ , 입자의 크기, 전극장치, rapping방법, sparking 순서 등과 관계가 있다. 이것들은 보통실험 집진 장치의 기본 요소로서 다음 식에서 사용된다.

$$\eta_M = 1 - \exp(-SL / Q \cdot W_e) \dots \dots \dots (18)$$

이런 data의 검토로 식 4를 기초로 하는 가정이 항상 특별한 수를 가지는 것이 아닐수도 있다는 것을 알 수 있다. 불규칙한 gas유량분포나 입자의 저항력, 확산적 효과 등과 같은 요소의 model보정은 아래와 같이 간단하게 처리된다.

## 6. 총괄효율(overall efficiency)

부분효율로부터 총괄효율의 계산은 일반적인 원리에 의해서 하며 식 18이나 식 15를 사용한다.

$$p=1-\eta_M \text{에서}$$

$$p = \exp(-SL/Q \cdot W_e) = \int_0^1 \exp(-SL/Q \cdot W_i) dG_i$$

$$= \int_0^\infty \exp(-SL/Q \cdot W_i) q_i ddp_i \dots\dots\dots (19)$$

$q_i = dG_i / ddp_i$ 이다.

식 10 또는 식 11과 같은 표현의 복잡한 형태 때문에  $q_i$ 와의 복잡한 관계에 대한 가능성 뿐만 아니라 식 19의 마지막 적분값은 일반적인 경우에 있어서는 나타내기가 불가능하다. 그러나 특별한 경우에 몇가지 방법들을 이용할 수 있다. 식 14로 부분효율을 나타낼때, 즉  $W_i K dp_i$ 는 로그 정규분포이고 방정식에서  $N=1$ 이면

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2/2) \exp(-ae^{bt}) dt \quad (20)$$

여기서

$$t = \frac{\ln dp / dP_M}{\ln \sigma g}$$

$$a = M d P_M$$

$$b = \ln \sigma g$$

도표를 이용할 수 있다.  $\eta_M = (-P)$ 는  $a$ 와  $b$ 의 함수로서 읽을 수 있지만 매우 정확한 값으로는 사용할 수 없다. 여기서 주의해야 할 것은  $q_i^*$ 를 구하는 식 11이 아니라는 것이다.

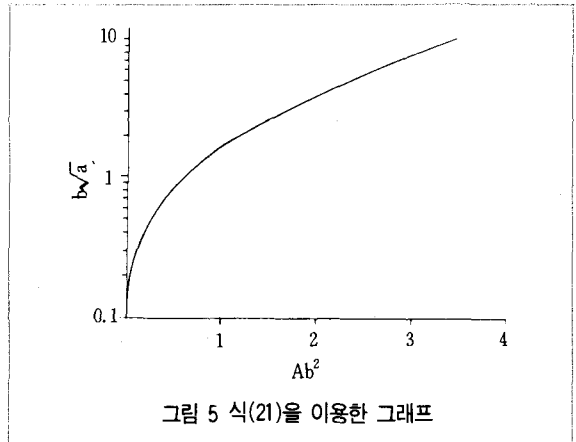
Kunz와 Hanna에 의해 개발된 유사한 근사값은 식 14의 직접적인 계산 방법으로 구할 수 있다.

$$P \approx \frac{\exp(-A^2 b^2 / 2 - A)}{(1 + A^2)^{1/2}} \dots\dots\dots (21)$$

A가 그림 5의 graph로부터 이 도표의  $b\sqrt{2}$ 범위 밖 값을 이용하여 계산하는 방법은

$$(Ab^2)^* = 2 \ln b\sqrt{a} - \ln(2 \ln b\sqrt{a}) + 0.3$$

$$10 < b\sqrt{a} < 25$$



$$(Ab^2) = \frac{2ab^2(1+ab^2)}{2(1+ab^2)^2 - a^2b^4}$$

$$0 \leq b\sqrt{a} \leq 0.5$$

이 계산 결과는 도표에서 읽는 값보다 더 정확하다.

Feldman식으로 처리되는 다른 특별한 경우에는 주어진 출구 입자크기 분포의 대수 log로 결합된 부분효율함수를 사용한다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma h} \int_0^\infty \exp \left\{ -K(acdp) - 0.5 \right.$$

$$\left. \left( \frac{\ln dp / dp_M}{\ln \sigma g} \right)^2 \right\} d \ln dp \dots\dots\dots (22)$$

여기서

$$K = \frac{\epsilon_0 E_0 E}{3\mu} \cdot \frac{SL}{Q}$$

각각의 경우에 K의 함수로서의 P는 석탄연소로부터 나오는 비산재의 몇가지 크기 분포에 관한 각각의 수를 적분하면 얻을 수 있다.

Feldman은 주어진 경우에는  $\ln 1/p$ 는  $\ln K$ 에 의해 선형적으로 변한다는 것을 알았다. 그래서

$$P = C \exp(10^{-4} K)^M \dots\dots\dots (23)$$

Feldman의 data는 아래와 같다.

용광로의 형태	$\phi_m - \mu m$	$\sigma g$	$C^*$	$m^*$
Pulverized Coal	12	3.8	0.5379	0.5000
Cyclone	2.08	9.45	0.8344	0.6765
Spreader Stoker	68	3.54	0.1827	0.4055

C와 m의 값은 K가  $m^{-1}$ 로 표현되어야 한다.  
 식 23에서 18을 결합하면  $W_e$ 를 얻을 수 있다.

$$W_e = \frac{-(10^{-4}K)^m \ln(c)}{SL/Q}$$

또는

$$W_e = (W_e)^m (SL/Q)^{m-1} \ln(c)$$

여기서  $W_e = \epsilon_0 E_0 E \times 10^{-4} / 3\mu$ 는 입자크기와는 별개인 매개변수의 변화율이다. Feldman은 수로  $W_e$ 이 관측되는 반응을 훌륭하게 설명했다.

P를 계산하는 세번째 방법은 P에 기인한다. Coompermen과 G. D. Cooperman은 식 20이나  $N=1$ 일때의 상호적인 형태의 식에 기초를 둔다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2/2)$$

$$\exp(-Mdp_m \sigma_g^t) dt \dots\dots\dots (24)$$

그들은 이러한 적분이 다소 단순하고 다음과 같이 정의되는 t의 중간값으로 적당하게 사용하기에 정확도가 만족한 정도라고 평가할 수 있다는 것을 알았다.

$$t_{mean} = \ln(m) \ln \sigma_g \dots\dots\dots (25)$$

여기서 m값은 이론적으로 0에서 1사이이고 식 25, a의 경험식으로 구할 수 있다.

$$m = \exp[(0.0822 \ln Pg - 0.159) \ln \sigma_g] \dots\dots\dots (25, a)$$

m값을 얻기 위해서는 Pg의 값을 먼저 알아야만 한다. Pg는 기하학적인 중간 입자 크기를 통과하는 것으로 계산한다. 즉 식 15에서  $dp = dp_m$ 으로 놓는다.

$$P = P^M g \dots\dots\dots (26)$$

이 식을  $P_i$ 의 값을  $t_{mean}$ 의 값에 대응하는 입자 크기로 결정하여 식 25에서의 범위를 Pg는  $10^{14} \sim 10^{-2}$ 으로  $\sigma_g = 1.5 \sim 3.0$ 으로 나타낸다.

**【예제 1】**

cyclon의 설계를 위해 chapter 6에서 묘사된 것과 동일한 Partland cement를 사용한다. 집진극의 면적이  $8100ft^2$ , 15ft인 집진판이 9개로 구성되며 높이는 34ft, 집진판 사이의 간격이 8inch이다. 이때 1단식 전기집진기의 배출 규정에 부합되기 위해서 집진해야 하는 양을 결정하여라.

방전축 전위는 32000V정도가 높다. 조건은  
 dust : MMD =  $12\mu m$ ,  $\sigma_g = 3.08$ (정규대수분포)  
 유전율 상수  $\epsilon = 6.14$   
 Flow :  $222ft^3$  at  $250^\circ F$  1 atm  
 집진효율 : 99.781(%)

이 분진은 초미세물질( $1\% < 1\mu m$ )을 많이 포함할 수 없으므로 식 14의 부분효율을 사용해야 할 것이다. 이 분진은 또한 정규 대수분포로 나타내어지므로 20으로 총괄효율을 얻어 사용할 수 있을 것이다. 방정식 14에 대입하면 다음과 같다.

$$\eta_i = 1 - \exp\left[-\frac{8100}{222 \times 0.3048} - \frac{6.14}{6.14 + 2} \times \frac{8.85 \times 10^{-12} (3.15 \times 10^4)^2}{2.25 \times 10^{-5}} (10^{-6} dp_i)\right]$$

여기서

$$E^0 = E = \frac{32000}{4/12 \times 0.3048} = 315kv/m = 3.15 \times 10^5$$

$N/coul$

$$\epsilon^0 = 8.85 \times 10^{-12} coul/Nm$$

$$\mu = 2.25 \times 10^{-5} Kg/ms @ 250^\circ F$$

그리고  $dp_i$ 는  $\mu m$ 으로 나타낸다. 따라서  $\eta_i = 1 - \exp - 3.524 dp_i$ 이다.

식 20에서 a의 값은  $3.5424 \times 12 = 42.3$ 이고 b의 값은  $\ln 3.08 = 1.125$ 이다. 그림 5를 사용하고 식 21의 방법으로 식 20을 계산하면  $b\sqrt{a} = 7.32$ ,  $Ab^2 = 2.91$ ,  $A = 2.3$ 이며 식 21로 부터  $P = 0.018$ 의 값을 구할 수 있다.

총괄효율은 계산의 오차를 고려하여 99.82%로 한다.

가동시킨 후 이 정도의 효율을 얻으려면 집진극들 사이에 있는 8개의 duct에서의 일정한 속도( $V_0 = 222 \times 12 / 8 \times 15 \times 9 = 2.5ft/s$ )와 균일한 전장 전위 경도, 그리고 재비산이 없어야 하며 전기적 저항에 안정해야만 한다.

결과적으로 이 문제의 해답에 더 접근하기 위하여는 총 길이 L이 34ft이며 폭은 5ft짜리의 집진판 7개를 설치하는 것이 아마 더 적합할 것이다. ◀

# 눈길모아 오염예방 마음모아 환경보전