

2단식 전기집진 방식의 공기청정 기술

김 광 영, 김 익 생
신 성 기 술 연 구 소

1. 머리말

현재 공해문제가 사회적으로 큰 관심사로 대두되면서 대기환경문제에 관한 심각성은 날로 심화되고, 이에 대한 연구가 증대되고 있는 실정이다. 특히, 사람들이 장시간 활동하는 실내공기의 정화에 대한 관심이 더욱 커져감에 따라 인간 생활에 직접적으로 영향을 미치는 에어로졸, 실내에 부유하는 미립자 등 입자상의 물질 및 인간의 후각을 자극하는 황화수소, 메르캅탄류 가스, 아민류 등의 가스상을 제거하는 여러가지 정화장치의 개발이 활발하다.

일반적으로 실내 오염원을 정화해야 할 대상 에어로졸은 그 성상이 고체, 액체 및 이들 혼합물로서 직경이 서브미크론($0.1\mu\text{m}$ 이하)에서 수 $10\mu\text{m}$ 까지 광범위하다. 그런데 기존의 여재를 이용한 필터식 집진장치는 일반적으로 $1\mu\text{m}$ 이상의 비교적 큰 입자에 대해서는 집진 효율이 좋으나, 실내의 오염물질은 $1\mu\text{m}$ 이하의 크기가 대부분이므로 실내에서는 접합한 방법이 아니다. 그리고 필터에 의한 집진 방식은 집진효율($1\mu\text{m}$ 이상의 입자)은 높지만 압력손실이 크므로해서 운전비용의 증가 및 2차오염 원인인 소음의 발생 등의 문

제를 수반한다. 또한, 기계식 집진장치(원심력, 중력, 관성력을 이용한 집진장치)는 실내용으로 사용하기에는 장치자체의 규모로 인해 적용이 불가능하다. 이에 반해 정전기력을 이용한 전기집진장치는 코로나 방전(corona discharge)을 이용해서 기류중의 오염물질에 전하를 하전하면 이 대전입자를 집진부에서 쿨롱력으로 집진하는 원리로 일반 기계식 집진장치와 여재를 이용한 필터집진 방식에 비해 저압손 이면서 $1\mu\text{m}$ 이하의 서브미크론 입자에 대해 높은 효율을 나타내면서 운전비용 및 설치가 용이하다. 이러한 전기집진기는 개발 초기에는 산업용 위주로 개발되어 왔으나, 최근에는 공조용 및 실내 공기정화기용으로 개발범위를 확대시키고 있는 실정이다. 그러나 이러한 공조용 및 실내 공기정화기용 전기집진장치의 국내 기술은 독자 기술이 확보되지 않는 상태에서 무분별하게 외국의 기술을 모방하여 설계화 함으로 이에대한 폐단도 만만치 않다. 전기집진장치의 성능에 영향을 미치는 영향요소는 너무나 많고 각 요소의 변화에 따라 성능 의존도가 높기 때문에 현재 국내 제작사의 기술 수준으로 이를 해석하기에는 역부족으로 이에대한 구체적인 연구가 시급하다고 본다.

현재 전기집진기 설계에 가장 중요한 설계 요소로

- 1) 방전부의 형상 및 전기적 특성
- 2) 집진부의 형상 및 집진효율
- 3) 집진기 내부의 유입 기체에 대한 유체 역학적 해석
- 4) 집진기 내부에 유입되는 오염물질의 화학/전기적 성질

등을 들 수가 있고, 이러한 설계요소들은 실제로 집진이 이루어지는 집진부와 밀접한 관계가 있으며, 집진기의 전기적 특성은 주로 방전부의 형상에 따른 메카니즘(mechanism), 방전 집진부의 전자기력의 분포등에 이해로써 효율을 증대시킬 수 있으며, 유동 기체의 유체역학적 최적 설계가 이루어져야만 최상의 효율을 얻을 수 있을 것이다.

따라서 본고에서는 공조용 및 실내 공기정화기 중심으로 코로나 방전을 이용한 2단식 전기집진기에서 가장 중요한 방전부 및 집진부의 설계시 고려 해야할 사항을 중심으로 기술하고자 한다.

2. 방전부의 전기적 특성

일반적으로 전기집진장치는 유입분진에 전하를 부여하는 방전부(하전부)와 대전분진을 부착, 집진하는 집진부를 동일공간에서 수행하는 1단식 전기집진기와 이를 달리하는 2단식 집진기로 크게 나눈다. 전기집진기의 방전부에 있어서 부(-)극 방전은 정(+)극에 비해 전기적 특성 및 효율은 높지만 인체에 유해한 오존의 발생이 10배 이상 발생함으로 공조용 및 실내 공기정화기로는 정(+)극 방전을 주로 사용하며, 여러 종류의 분진에 대해 하전효과를 높이기 위해 2단식 전기집진

기를 주로 채택한다. 또한, 일반공조용 및 실내공기정화기에는 금속재질을 이용한 평행판형 방전부를 주로 사용하고 있다. 이 경우, 주어진 처리 유량과 요구되는 집진 효율에 대해 방전부의 크기를 최소화 하는 것이 중요하며, 이를 위해 방전부의 각 구성요소의 전기적 특성과 유체 및 분진 입자의 유동 특성의 이해가 선행되어야 한다.

그림 1에서 2단 평행판 전기집진기의 방전부에 대한 개략도를 나타낸다.

일반적으로 방전부의 코로나 발생은 방전극의 형상에 따라 달라지나 공조용 및 실내 공기정화기용은 수kV에서 수십 kV 정도의 고전압을 이용한다.

방전극은 제거하고자 하는 적용대상에 따라 방전극의 형상을 표 1과 같이 달리한다.

또한, 그림 2에서는 방전극선이 텅스텐(Tungsten) 와이어(wire)일 때 코로나 발생인가전압을 나타낸다. 방전극에서 방출되는 고속전자들은 방전극선과 방전판 사이에 형성되는 전계(electric field)를 따라 움직이며, 전계의 세기가 크면 그만큼 이동이 빨라지는 성질이 있다. 대개 전계는 대전된 물체에 대해 영향을 끼칠 수 있는 공간(space)를 말하므로 방전극선에서 방전판 사이의 전계분포와 전계의 세기, 입자의 하전특성은 매우 밀접한 관계를 갖고 있다.

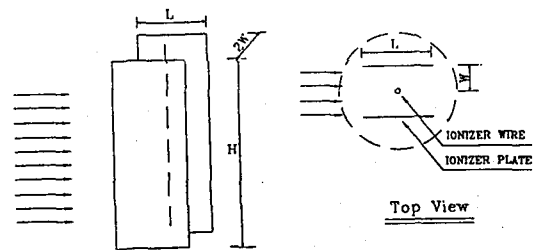


그림 1 2단식 전기집진기 방전부의 개념도

표 1. Discharge Wores Used on Electrostatic Air Cleaner

Application	Electrode wire shape	Materials of construction	Wire Size,mm(effective)
Acid Mist	Star	Lead with Monel wire core	9.5
Cement dust	Barbed	Mild steel	19.1
Open heart fume	Barbed	Mild steel	19.1
Fly ash	Aquare	Mild steel	4.7
Environmental air	Round	Tungsten	0.1

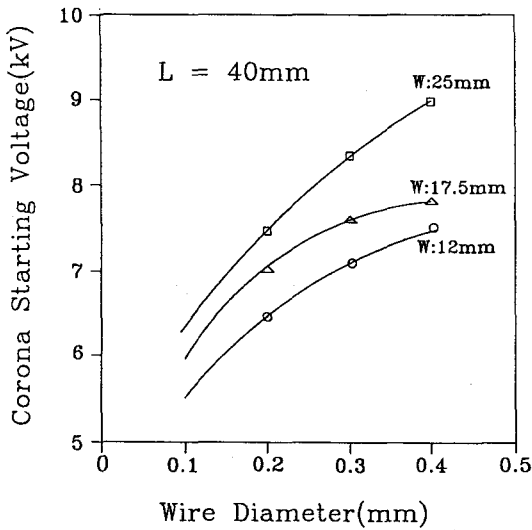


그림 2 방전극선 굵기 및 방전극선과 방전판 사이의 간격 변화에 따른 코로나 발생 전압

따라서 방전부의 설계는 유입분진의 하전량을 높이기 위해

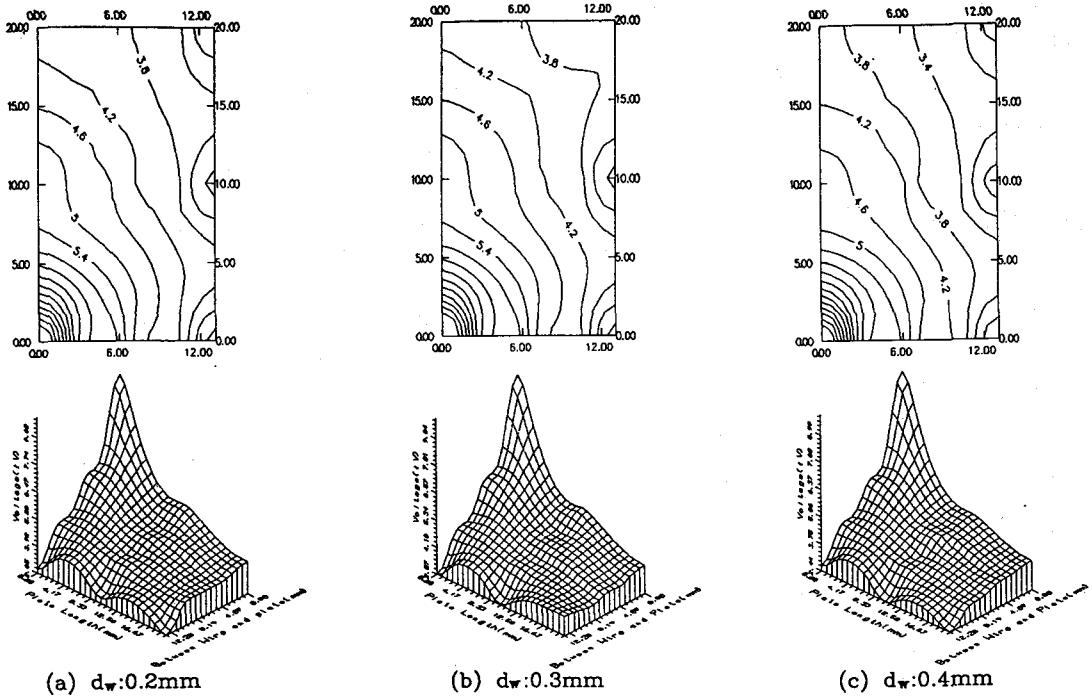
- (1) 방전극선의 형상 및 직경
- (2) 방전판의 깊이
- (3) 방전판 사이의 간격
- (4) 인가전압

를 고려하여 설계를 해야한다.

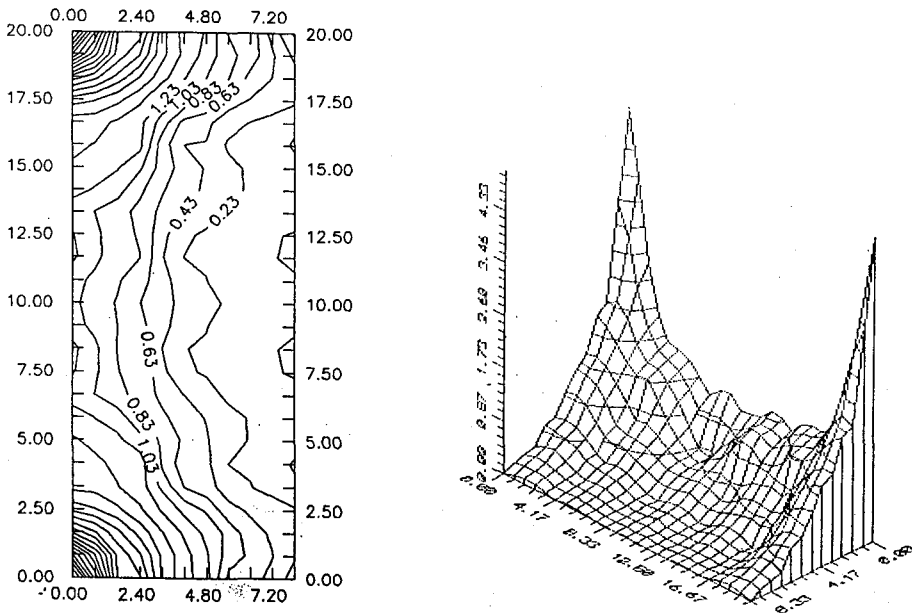
2.1 공간 전계분포 (Space electric field)

방전극의 전극형상은 공조용 및 실내용으로 범위를 좁혔을 때 표 1에서와 같이 와이어 혹은 침형 형태를 주로 사용한다. 이러한 전극형태는 실제로 집진효율, 집진량 등의 성능이 틀릴 뿐 극성화 방법 및 집진과정은 동일하다. 따라서 집진과정과 관련된 전기장분석에 있어 방전 메카니즘과 유동 기체에 걸리는 전기장의 전위(potential)분포, 전위구배(potential gradient or electric potential)분포, 전기력장의 특성등의 규명이 핵심사항이 된다.

그림 3(a), (b)에서는 방전부내에서 와이어 타입과 침형타입의 경우 인가전압 및 Dimension은 다르나 전계분포 형태를 나타내고 있다. 그림 3(a)는 와이어 타입의 경우인데 (b)의 침형인 것과 비교시 방전극 공간에서의 전계분포가 보다 균일한 형태를 갖고 있음을 알 수 있다. 물론 두 방전극을 비교시 방출되는 이온의 양, 전계 밀도의 세기가 입자하전에는 중요하지만, 같은 조건(인가전압 및 방전극이 동일 spec.)일 경우 유입분진에 대해 전체적으로 균일한 하전 기능은 침형인



(a) 와이어(텅스텐)타입의 전계 분포 L : 40mm, W : 12mm, 10kV



(b) 침형 타입의 전계 분포 L : 20mm, W : 10mm, 5kV

그림 3 와이어 및 침형 타입의 전계 분포 비교

경우 보다 와이어 타입이 우수할 것으로 판단된다.

2.2 공간전류(space current)

방전부에 유입되는 입자의 하전 및 전달특성은 방전극선의 인가전압, 방전판의 깊이 및 방전극선과 방전판 사이의 간격에 긴밀한 관계를 갖고 있으므로 방전부의 설계시 방전선과 방전판의 깊이에 따른 전류변화는 매우 중요한 설계요소다. 공간전류와 방전판 깊이와의 관계는 S. Oglesby의 저서 "Electrostatic Precipitation"과 그림 5에서 이러한 관계를 잘 나타내어주고 있다.

S. Oglesby가 기술한 내용은 방전판의 깊이가 길어짐에 따라 공간전류량이 하나의 피크(peak)점만 보이고 있으나, 그림 6에서는 두 개의 피크점을 보여주고 있다. 이러한 결과는 방전판의 깊이가 깊어짐에 따라 코로나 개시전압이 낮아지게 되고, 하전입자가 방전판에 부착될 가능성이 높아지게 된다. 따라서, 전기집진 장치에서 방전부의 깊이 결정은 소비 전력 측면에서 매우 중요하다. 또한 방전선에 인가전압이 증가할수록 방전선과 방전판 사

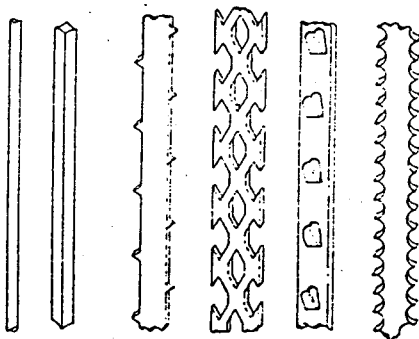
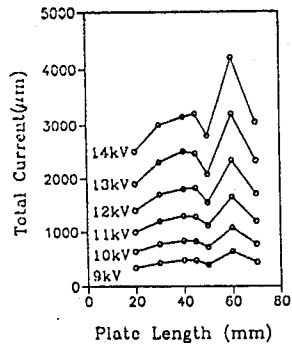
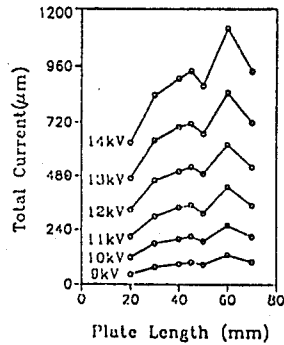


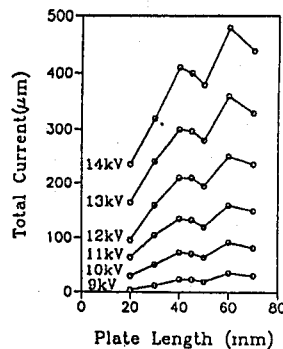
그림 4 일반적으로 적용되는 방전부 형태 (산업용 중심)



(a)width between wire and plate W = 12mm



(b)width between wire and plate W = 17.5mm



(c)width between wire and plate W = 25mm

그림 5 와이어 타입의 경우 인가전압 변화에 따른 방전부 내부에서의 전류 밀도

이에 높은 전류가 흘러 하전량은 급격히 증가하나, 불꽃방전(Break-over)을 유발시킬 위험성이 있으므로 인가전압의 선택이 또한 매우 중요하겠다. 이러한 공간전류는 방전부의 방전판의 깊이 및 방전판과 방전판 사이의 간격 결정에 매우 중요한 설계인자로, 방전부에 유입되는 입자의 하전 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 대한 인가전압 변화에 따른 분진 입자 하전량에 대해서는 다음절에 자세히 설명하기로 한다.

2.3 입자 하전량(Particle charge intensity)

입자 하전량이란, 방전부에 유입한 입자가 코로나 방전에 의한 전자와의 충돌로 극성을 띄는 정도를 나타내는 것으로, 유입분진에 따른 하전량은 현재 수식적으로 어려운 실정이고, 주로 실험에 의해 고찰되고 있는 실정이

다. 이러한 하전량의 측정은 “Aerosol Electrometer”를 이용하여 측정이 가능하고 하전량은 방전극선과 방전판 사이의 공간전류와 밀접한 관계를 갖고 있다. 그림 7에서 나타낸 그림은 2단식 공기정화기용 방전부의 하전량 측정 결과의 일례를 나타낸 것으로, 일정인가전압 이후 정체 혹은 감소 현상은 방전부에 유입되는 입자가 전기장의 영향으로 이온과의 충돌로 하전된 입자가 방전부에 집진됨으로 해서 전류량의 정체 혹은 감소되는 경향으로 해석된다.

3. 집진부의 집진특성

방전부에서 하전된 입자의 집진은 전기장 내에서 입자 하전량과 전기장 강도의 곱에 비례하는 쿨롱력(Coulomb's force)에 의해 유동 가스내에서 입자를 분리시키는 것이다.

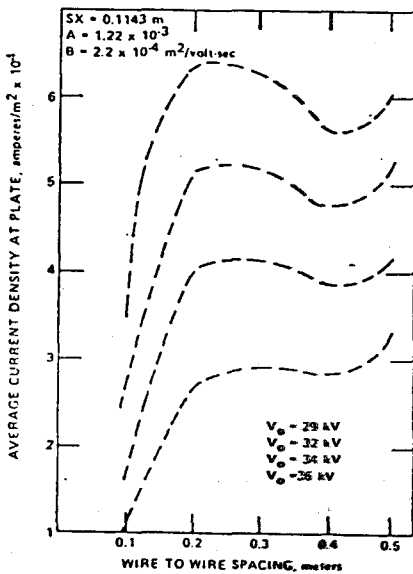


그림 6 방전판 폭의 변화에 따른 방전부 내부의 전류 밀도

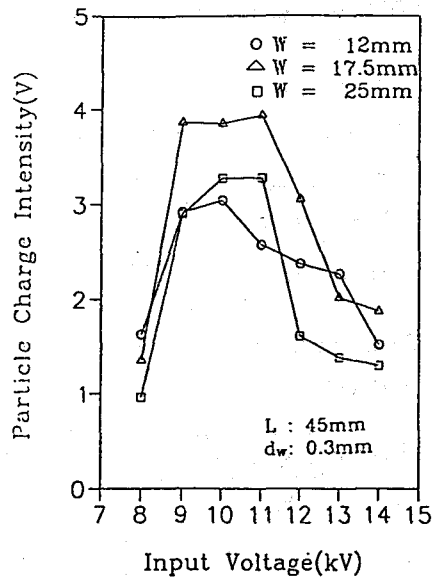


그림 7 방전극선과 방전판 사이의 간격 변화에 따른 입자 하전량 비교

어떤 전기장내에서 하전된 입자를 적당한 집진면적으로 집진 시킨다는 것은 매우 간단한 과정인 것 같으나, 실제로 이러한 집진과정이 확실적인 요소에 의존하는 현상이므로 매우 복잡하다.

예를 들어 집진부를 통과하는 한 개의 하전된 입자가 실제로 집진될지 예측하는 것은 불가능하고, 집진될 확률만을 이론적으로 제시될 뿐이다. 실제의 경우 입자집진은 입자 재함입현상(particle reentrainment), 불균일한 유동과 같은 교란효과에 의해 문제는 더욱 복잡해 진다. 그러나 입자집진에 대한 기본적인 이론들은 이러한 교란요소를 제거시킨다든지, 그렇지 못한다면 최소화시키기 위한 방법을 채택하여 사용해야 할 것이다. 따라서 이러한 교란이 없는 입자집진 이론에 대한 가장 정확한 적용이 실제적인 결과를 이용하여 달성가능한 성능 목표로 잡는방법이다.

3.1 전기집진기의 집진부에서 입자 포집효율

만일 집진기 내부에 유입되는 입자의 집진은 입자의 재함입(reentrainment)을 고려하지 않을 경우, 집진부의 효율은 (1) 가스유입 속도, w (2) 방전극선의 굵기, ϕ (3) 인가전압 및 공간전류 (4) 집진극간의 간격(W) 및 깊

이(L)에 의해서 1차적으로 결정되어 진다.

집진부의 형태는 튜브(tube) 및 평판 혹은 롤(roll) 형태의 평판등으로 크게 나누어진 다. 기존의 집진을 계산은 튜브형태로 계산되어 지고 있으며, 이를 근거로 평판 및 다른 형상의 집진판의 경우를 유도하여 W. Strauss의 "Industrial Gas Cleaning"에 의하면 표 2와 같이 나타내고 있다.

3.2 층류유동일때의 입자집진

그림 8과 같은 집진부 내부를 속도 w 로 지나가는 가스와 입자를 생각할 때 입자의 횡단속도(migration velocity) V_t 라 했을 때 입자의 운동과 관련하여 두개의 속도 성분만이 존재하면, 두 성분의 합벡터인 V_{rel} 로 된다. 그러면 모든 입자의 속도는 V_{rel} 를 갖고 이 방향으로 궤적을 따라 움직이게 된다. 따라서

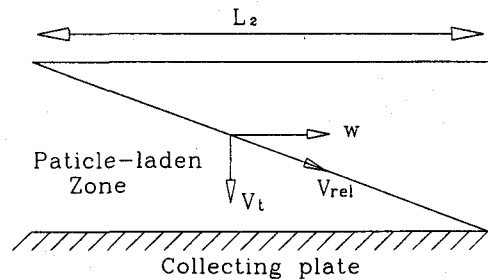


그림 8 평행판 집진부내에서 100% 집진을 위한 이상적인 유동

표 2. Theoretical Length of precipitator for complete Removal of Dust, assuming constant Drift velocity

Electrode system	Flow pattern	Collector Length
Tube type	Streamline	$4V_{av}R/3w$
	Turbulent	$V_{av}R/w$
Plate type	Streamline	$V_{av}L/w$
	Turbulent	$V_{av}L/w$

집진부의 중앙판으로 부터 입자가 없는 영역이 형성되어 집진판 깊이 L_2 만큼 흘러가게 되면 이 영역이 전체단면을 채우게 될 것이다. 따라서 100%의 집진 효율에 요구되는 집진부의 중앙판과 집진판의 거리 W_2 와 가스속도 w , 횡단속도 V_t 와 관련하여 다음과 같이 표현된다.

$$L_2 \text{ 100\%} = \frac{w W_2}{V_t} \quad (3.1)$$

따라서 위 식(3.1)로부터 층류유동 가스내의 입자집진 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{L_2 V_t}{w W_2} \quad (3.2)$$

3.3 난류유동 일때 입자 집진

난류 유체 유동은 부유입자들의 집진 경로를 크게 변화시켜 층류 유동에서 적용되었던 가스속도와 횡단속도 사이의 단순 베타함으로 입자의 궤적을 더 이상 적용할 수는 없다.

따라서 난류유체에서의 입자의 집진은 집진판 근처의 층류경계층의 영역으로 입자를 유도하여 집진할 수 밖에 없다. 그러므로 입자의 집진은 확률의 문제이므로 집진 이론은 확률에 의존한다. 현재까지 난류유동장에서 입자의 집진은 Deutsch식으로 유도되고, 다음과 같은 기본 가정을 도입해야 한다.

- (1) 방전부를 통과한 입자들은 모두 하전되었다고 본다.
- (2) 난류와 확산력은 입자들이 어떠한 횡단면에서도 균일하게 분포되었다고 본다.
- (3) 가스 유동은 Stokes법칙이 적용되는 점성항력을 받는다.

- (4) 입자는 항상 전기적 끝속도(electrical terminal velocity)로 이동한다.
- (5) 가스 유동의 속도는 입자의 끝속도에 영향을 미치지 않는다.
- (6) 입자들 상호간의 반발력이 무시될 정도의 거리를 갖는다.
- (7) 방전부에서 방출되는 이온들과 중성가스 분자와의 충돌효과는 무시할 수 없다.
- (8) 입자 재 함입현상, 비균일 가스 유동 분포, 역 코로나(back corona) 현상은 없다.

이러한 기본 가정에 의한 Deutsch 집진 효율 η 는 집진극 형상에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

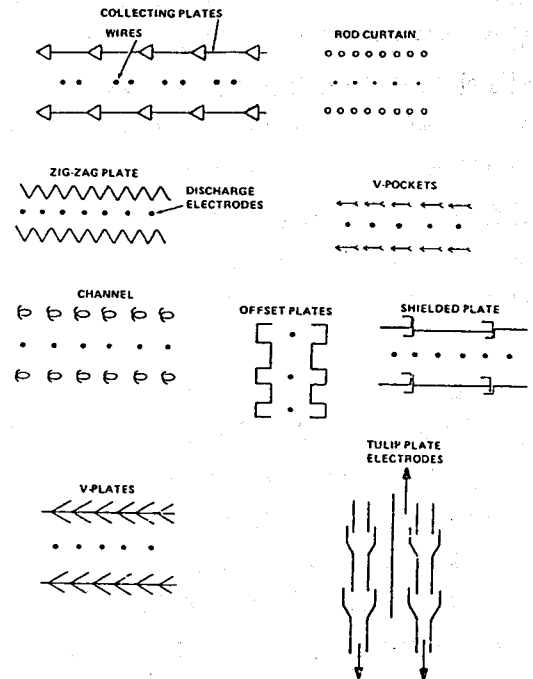


그림 9 집진극판의 종류(산업용 중심)

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2wx}{RV_{av}}\right) \quad (\text{tube type collector})$$

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-wx}{LV_{av}}\right) \quad (\text{plate type collector})$$

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-wA}{Q}\right) \quad (\text{each type collector})$$

여기서 R : a collector radius

V_{av} : average velocity

x : downstream distance in collector

4. 기타 설계시 고려사항

1) 형상 설계

집진부에 유입되는 기류가 균일하게 유입될 때 또한 기류가 층류 유동일 때 집진기의 성능은 설계자가 예측 가능하다. 따라서 이를 위한 기구적인 설계가 필수적이며, 2절에서 언급한 바와 같이 집진기내부에 유입되는 기류가 난류일 경우 오염입자의 집진율은 확률에 의존하게 되고 집진율의 저하가 우려된다. 물론 이러한 유체역학적 형상 설계는 까다로운 문제이나 최대한의 층류유동을 유도하기 위한 노력이 필요할 것이다.

2) 소음

일반적으로 소음발생원은 모터/팬에 의한 기계적 소음, 그리고 유로상에서 발생하는 소음등인데 특히, 팬 및 모터의 설계 혹은 선정시 기계적인 소음에 주의를 요한다. 팬 및 모터의 소음을 줄이기 위한 방편으로 속도를 줄이는 방법이 있는데 이는 집진효율 및 정화능력에 영향을 미치므로 최적의 상태를 선택하여 설계에 반영해야 한다. 또한 유로상의

소음은 기구설계시 유동 형태를 충분히 고려해야 할 것이다.

5. 맺음말

이상과 같이 2단식 전기집진기의 설계시 필요로 하는 사항을 간략히 언급하였다. 그러나 이러한 기술내용은 단편적인 내용에 불과하며 실제 설계시 더욱 많은 고려가 요구된다.

- 참고 문헌 -

1. W. Strauss, "Industrial gas cleaning" Pergamon Press, Oxford, 1966.
2. S. Oglesby, "Electrostatic Precipitation" Marcel Dekker, Inc., 1978.
3. William C. Hinds, "Aerosol technology" A Willey-Interscience Pub., 1982.
4. E.U. Lander "distribution of electron and ions in a corona discharge", Proc. of IEEE, Vol. 125~9, pp. 1069~1073, 1978.
5. Oron, A. "Turbulent Deposition of Charged particles under the influence of an external electric field" J. of Colloid & Interface Science, Vol. 127~2, pp. 401~416, 1989.
6. 상공부 "전기집진기", 1992
7. 김익생의 "2단 평행판 전기집진기의 방전부 특성 실험" 공기조화 냉동공학회, Vol. 5, pp. 8~13, 1993.
8. 김익생의 "2단 평행판 전기집진기의 집진 특성 실험" 공기조화 냉동공학회, 92동계 학술대회, pp. 60~64, 1992.