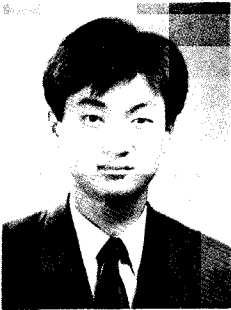


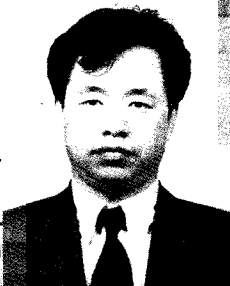
# 전기집진기 개발동향



홍 원 석

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '87-'91 인하대학교 환경공학과(학사)
- '91-'93 서울대학교 보건대 환경보건학과(석사)
- '93-현재 한국기계연구원 연구원



최 현 오

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '74-'78 서울대학교 원자력공학과(학사)
- '79-'81 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '81-'86 한국과학기술원 기계공학과(박사)
- '86-'89 한국기계연구소 열유체실 선임연구원
- '90-'92 한국기계연구원 공조기기실장
- '92-현재 한국기계연구원 책임연구원

## 1. 서 론

현대 산업의 고도성장으로 말미암아 대기오염 문제가 심화되고, 국가적으로 환경규제치의 강화 등으로 인하여 사회의 각 분야에서 집진장치에 대한 수요가 급증하고 있다. 이에 전기집진기(electrostatic precipitator, E.P.)는 높은 집진효율과 운전 및 유지보수의 용이성 때문에 광범위하게 활용되고 있다. 전기집진기의 특징은 표 1에 제시하였다.

각종 산업체에서 배출되는 입자상의 오염물을 제어하기 위하여 전기집진기가 광범위하게 사용되어지고 있으며 산업체에서의 성공적인 사용에도 불구하고, 1991년 2월 공포된 대기환경보전법 시행규칙에 따라 분진배출허용기준이 장기입법예고 되므로서, 1995년과 1999년 2단계에 걸쳐 현재 적용받고 있는 분진배출규제치보다 훨씬 낮은 선진국 수준의 분진배출 규제가 요구될 것으로 사료되며, 표에서 제시하였던 전기집진기의 단점을 제어할 수 있는 고효율 및 고신뢰성을 갖는 새로운 전기집진기 개발의 필요성이 증가하고 있다.

미국, 유럽 및 일본 등의 전기집진기 관련 연구기관, 산업체 등에서는 전기집진기의 고효율화를 위한 연구/개발에 관하여, 판간격의 확대(광폭)화, 펄스하전, 유동가스 성분제어 및 2단하전식 등에 관한 연구들이 지속적으로 수행되어지고 있다. 이 가운데서도 최근에 실증되어 성공적으로 실기에 적용하고 있다. 국내에서는 전기집진기에 대한 연구가 거의 전무하였으나, G7 과제 환경공학 기술개발사업의 대기오염방지기술(고효율 집진기술)의 일환으로 1992년부터 한국중공업과 한국기계연구원이 공동으로 광폭전기집진기에 대한 연

표 1. 전기집진기의 장·단점

장	단
가. 0.01 $\mu$ m 정도의 미세입자의 집진이 가능하다. 나. 높은 집진효율(99.9%이상)을 갖는다. 다. 압력손실이 적다.(건식은 10mmAq, 습식은 20mmAq) 라. 처리할 수 있는 연무질 성상의 범위가 넓다. (일반적으로 150~400 $^{\circ}$ C, 최대처리가스온도는 700 $^{\circ}$ C)	가. 초기설치비가 고가이다. 나. 처리가스의 조건이 변동될 경우에 운전을 쉽게 조건에 부합시키기가 어렵다. 다. 설치시 넓은 부지가 필요하다. 라. 가스상태의 오염물질은 제거시키지 못한다.

구를 진행하고 있는 중이다.

본고에서는 전기집진기의 일반적인 집진원리 및 구성성분, 설계요인, 국내외의 연구개발현황, 연구의 필요성 및 개발효과 등에 관하여 기술한다.

## 2. 전기집진기의 구조와 구성성분

전기집진기는 정전기력을 사용하여 입자를 집진하는 장치로써 시멘트소성로, 펄프공장의 흑연소 공정 등 주로 다량 분진배출 시설에 효과

적이다. 일반적으로 전기집진기의 주요 구성성분은 그림 1과 같이, 보일러 등의 분진발생부에서 전기집진기내로 배연기체를 유도하는 유입부 및 확산부, 유입되는 입자에 전기를 띠게하는 방전부 및 고전압 발생장치, 대전된 입자를 포집하는 집진부, 그리고 집진판으로 부터 애쉬(ash)를 제거하는 동시에 방전극에 진동을 주어 부착된 애쉬를 제거하므로써 지속적인 효율을 유지시켜 주는 역할 하는 추타(rapping) 장치등으로 구성된다.

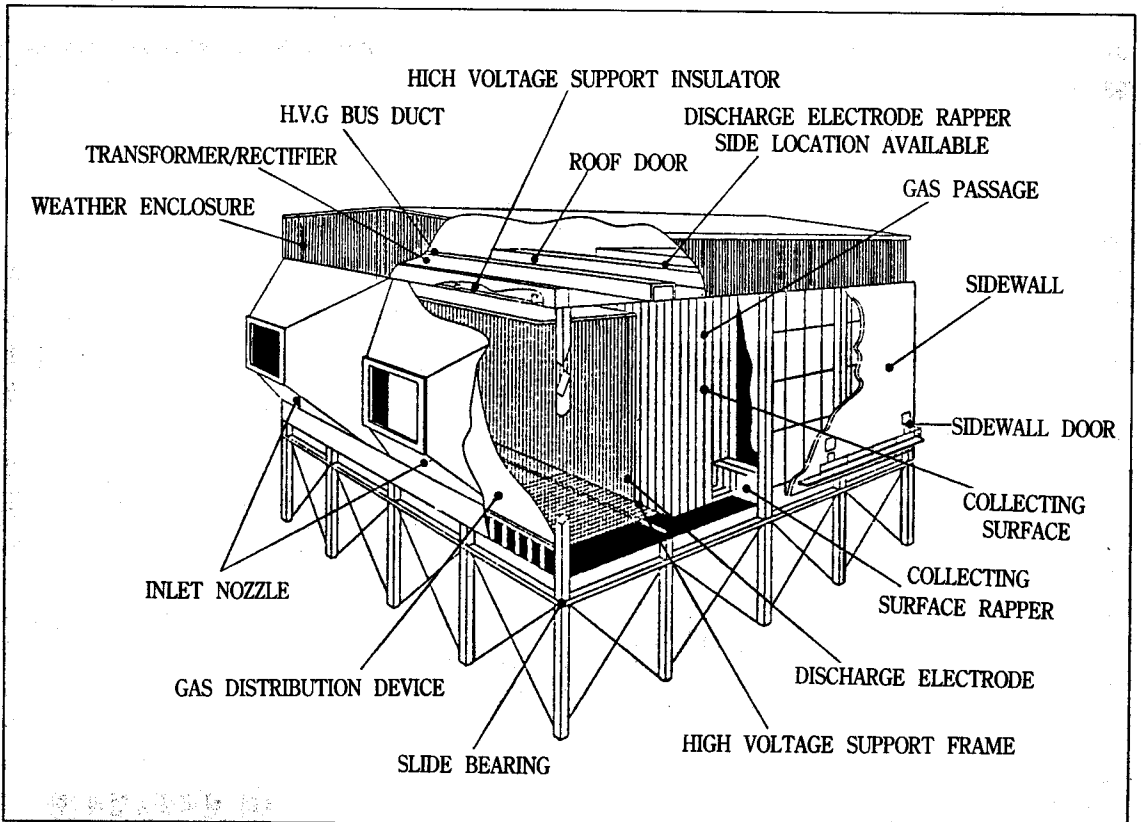


그림 1. 화력발전소용 전기집진기 시스템의 구성

## 2.1 방전극(Discharge Electrode)

보통 전기집진기의 방전극은 직경이 0.13~0.38 cm인 원형 또는 사각형의 철사(wire)를 주로 사용하며, 직경 0.25cm의 것이 산업현장에 많이 사용된다. 방전극은 이 철사의 한쪽을 집진기 천정에 고정하고 그 반대쪽에는 추(Weight)를 달아서 팽팽한 수직선이 되게 한 것이다. 이때 사용되는 철심은 탄소가 많이 포함된 스테인레스 동티타늄합금 및 알루미늄이며, 추의 무게는 11.4kg인 주물추가 사용된다. 방전극은 기계적인 충격에 견딜 수 있도록 장치되어야 하며 방전극의 크기와 모양은 전기집진기의 기계적 조건에 따라 좌우된다. 전기집진기에 사용되어지는 방전극은 일반적으로는 원형 및 사각철심이 가장 많이 사용되며, 그림 2와 같은 원형 철심 이외의 여러형태의 방전극이 사용되기도 한다.

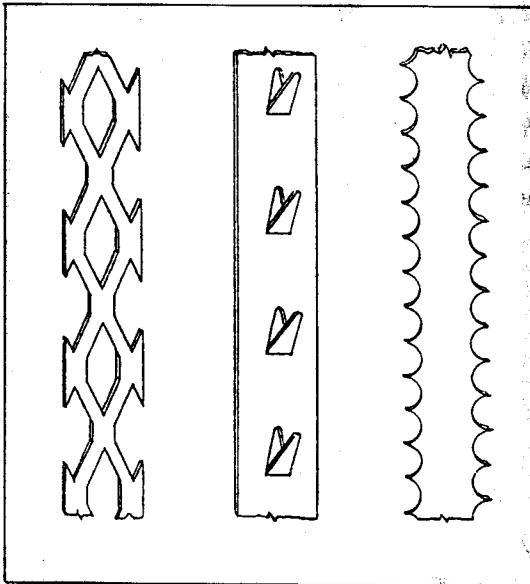


그림 2 방전극의 종류

## 2.2 집진극(Collection Electrode)

대부분 전기집진기는 처리가스량이 많고 고집진효율을 원하기 때문에 원통형집진극 보다는 판상집진극(plate collection electrode)을 사용한다. 처리가스의 조건에 따라 집진극의 재질이 결정

되나, 보통 방전극의 재료와 비슷한 탄소함량이 많은 스테인레스강 및 합금을 사용한다. 집진극의 두께는 0.05~0.2cm, 간격은 20~30cm 정도이며 고효율 전기집진기에서 간격은 20~23cm가 보통이다. 원통형 집진극도 흔히 사용되며 높이는 6~15 m 범위이다. 일반적으로 집진효율이 높을수록 높이가 높아진다. 그림 3은 현재 많이 사용되고 있는 여러종류의 집진극을 나타내었다. 이러한 집진극은 구부러지거나 충격에 의해서 손상되지 않을 정도의 충분한 강도를 가져야 하며 구부러지거나 찌그러지면 집진효율이 감소한다.

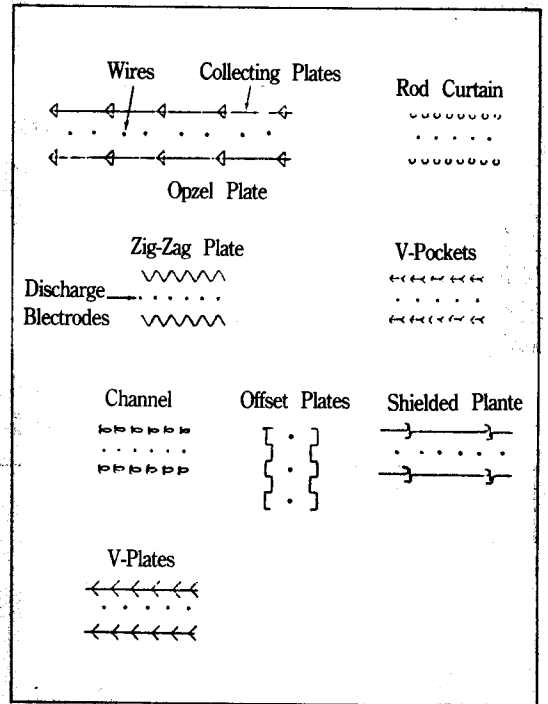


그림 3. 집진판의 종류

## 2.3 래퍼(Rappers)

전기집진기를 계속 가동하기 위해서는, 분진이 집진극에 0.08~1.27cm 정도의 두께로 포집되면 이를 털어주어야 한다. 래퍼는 방전극 및 집진극에 포집된 분진을 호퍼로 털어내는 작용을 한다. 전기집진기의 가동조건에 따라 집진극에 포집된 분진량이 달라지기 때문에 래퍼의 강도와 회수는 취급분진의 종류, 농도등의 조건에 따라 조건에

맞게 적당하게 수시로 조절해야 한다. 래핑방법에는 여러가지가 있으나, 회전축에 망치를 설치하여 이를 회전시켜 전극에 충격을 주는 기계적 래핑방법이 가장 많이 사용된다. 여기서 회전축이 회전하면 망치가 집진극에 붙어있는 절구(anvil)를 일정한격으로 치게되어 있다. 래퍼강도는 회전축에 설치된 망치의 무게와 길이로써 조절할 수 있으며, 횡수는 회전축의 속도로 조절된다. 코로나 방전극에 분진이 포집되면 방전시 장애를 받기 때문에 코로나 방전극 역시 래핑해 주어야 하며, 이 경우는 래퍼로 치는 것은 다소 곤란하기 때문에 방전극을 가볍게 진동시킬 수 있도록 공기 또는 전기 진동장치를 사용한다.

#### 2.4 고압공급장치(High Voltage Power Supply)

전기집진기에서 가장 중요한 부분은 집진극과 방전극 사이의 전계강도를 조절하는 고압장치이다. 전기집진기내로 고압을 공급하는 계통도는 그림 4에 나타내었으며 고압공급장치중 가장 중요한 부분은 변압기(tranformer)-정류기(rectifier)이다. 변압기-정류기는 발전소에서 발생하는 교류를

직류로 바꿔서 그 전압을 400~480volt에서 50,000~100,000volt까지 발생시킨다. 일반적인 화력 발전소에서 발생하는 Flyash 집진시에는 전압 50,000~60,000volt, 전류 500~2,000mA 정도가 필요하다.

고압장치는 기계정류기, 진공관정류기를 거쳐 반도체 실리콘 전압기로 발전되었으며, 반도체 실리콘 전압기의 출력전압은 15~130KV, 전류는 60~95KA이다. 최근에는 고전압 발생장치에 불꽃방전 전압전류 피드백 신호기를 장치하여 효율을 최대화 시키고 있다.

#### 2.5 제어장치(Control meter)

전기집진기 운전에 필요한 각종 제어장치는 주로 전압, 전류 및 불꽃방전 횡수 점검계기로 구성된다. 정류장치에는 트랜스의 일차전압과 전류를 측정할 수 있는 장치를 설치하고 이에 따라 집진기의 입력전압을 제어할 수 있도록 한다. 불꽃방전계기는 집진기내의 불꽃방전횡수 즉 전기적 단락의 횡수를 점검한다. 일반적으로 전기집진기내의 불꽃방전 횡수는 매분 100번 정도가 가장 바람직하며 이를 점검하기 위하여 불꽃방전 점

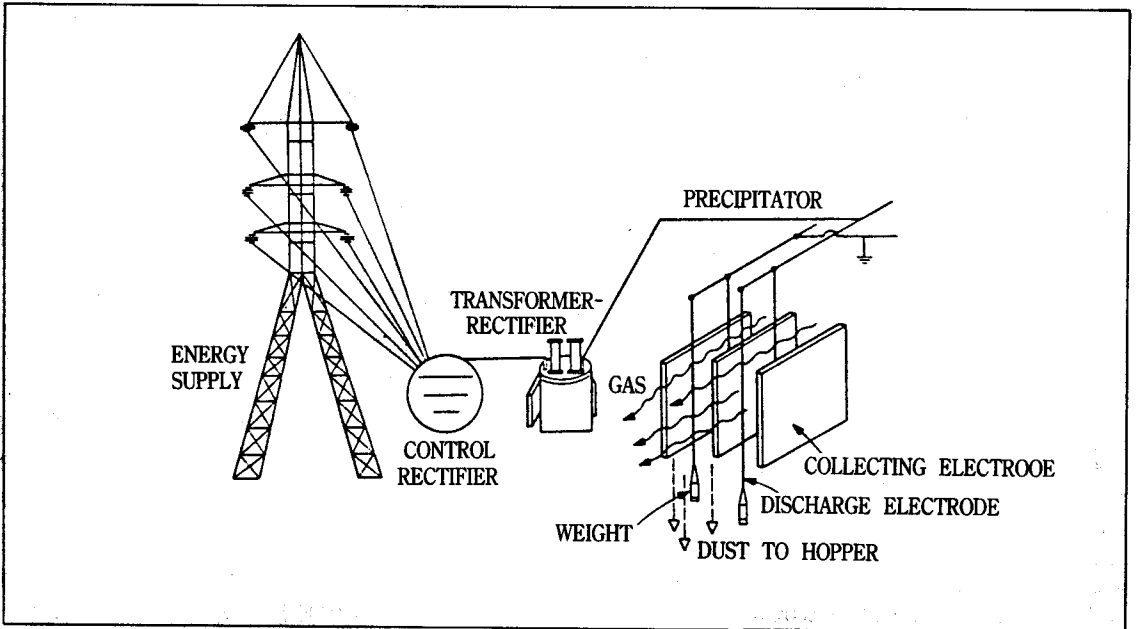


그림 4. 고압공급장치 계통도

점계기를 제어판에 설치하여 제어에 편리함을 꾀하고 있다.

### 3. 전기집진기 종류

전기집진기는 처리방법에서 집진판에 집진된 분진의 제거에서 물의 살수여부에 따라 건식전기집진기(dry type E.P.)와 습식전기집진기(wet type E.P.)로 크게 나누어진다. 일반적으로 건식전기집진기에 비해 습식전기집진기는 처리효율 및 집진된 애쉬의 제거율이 높고, 더욱이 유해가스를 흡착하여 제거시키는 능력이 있는 것으로 연구되었으나, 발생하는 폐수를 처리하는 부수적인 처리장치가 필요하기 때문에 건식과 습식은 사용자의 사용목적에 따라 사용되고 있다. 또한 전기집진기는 방전부와 집진판의 모양 및 배치형식에 따라 그림 5와 같이 A) Single stage precipitator a) Wire-in-Plate type, b) Wire-in-Tube type, B) Two stage precipitator로 구분된다.

고전압 1단식 전기집진기(High voltage Single stage E.P.)는 판상(a)와 원통형(b) 전기집진기로 적용되어 사용되며, 그 구조가 간단하고 성능이 우수하기 때문에 현재 산업용 방지기계로서 석탄화력 발전소를 비롯하여, 시멘트 소성로, 제련 및 소각로에서 발생하는 액상 및 고압입자의 발생방지에 많이 사용되고 있다. 원통상 전기집진

기는 집진극인 원통의 중앙에 방전극을 두며 처리가스를 원통 내부로 유입시킨다. 제거될 분진은 음전기로 대전되어 집진된 양집진극으로 이동 포집된다. 집진극에 포집된 대전입자는 초타장치로 털어내거나, 집진극 표면에 물을 Spray하여 씻어 내린다. 보통 원통형 전기집진기는 산미스트(acid mist) 또는 포그(fog)를 제거하는데 사용되며 집진극인 원통전극의 크기는 직경 15~30cm, 길이 6~15m에 이른다.

산업공정에서는 원통형 전기집진기 보다는 판상 전기집진기가 더욱 많이 쓰여지며 이는 높은 전압을 사용하여 처리가스내의 분진을 보다 강한 전계내에 노출시킬수 있기 때문이다. 그림 5의 B)에서와 같이 처리가스는 두 집진극 사이의 공간인 처리실을 통과할때 집진되며, 처리실의 중앙에는 방전극이 위치한다. 처리가스는 처리실을 통과할때 방전극에 의하여 음전기로 대전되어 양전기를 띤 집진극으로 이동 포집된다. 집진극에 분진이 포집누적되면 추타장치에 의하여 탈진 시킨다. 이렇게 털어낸 분진은 집진극의 하단에 설치된 호퍼에 저장되고, 최종폐기때 방류된다. 고압 1단 전기집진기의 특징은 방전극은 코로나 방전극으로서 음극으로 되어 있으며 집진극과 방전극 사이의 전압은 스파크(spark)가 일어나기 직전의 고압으로 올려준다.

그리고 저전압 2단식 전기집진기는 주로 공기

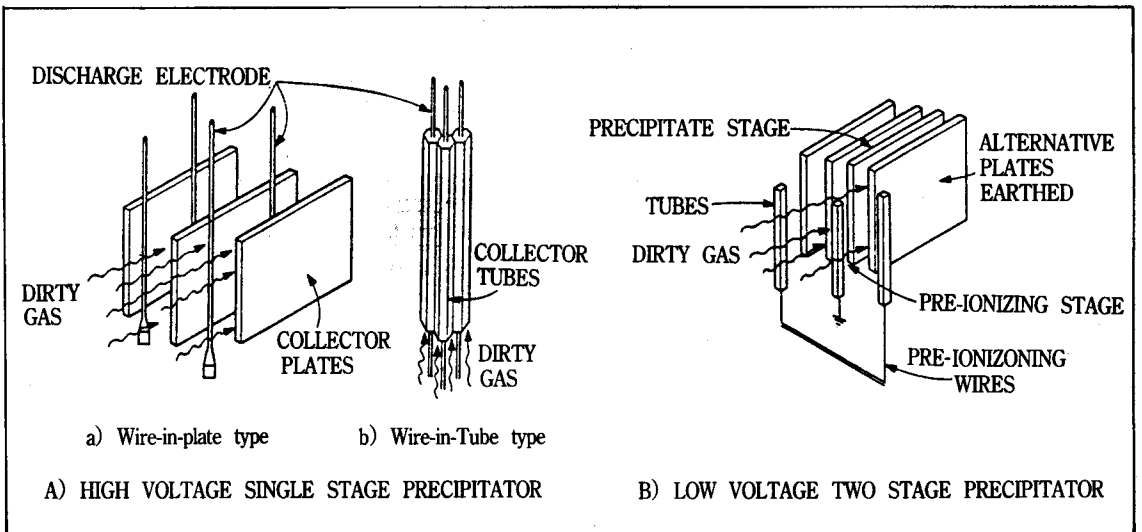


그림 5 전기집진기의 종류

조화용 필터, 훈연실(Smoke house), 파이프 도장(Pipe coating), 아스팔트처리, 공기제조 및 고속 연마기 등에서 발생하는 액상 입자의 집진에 사용되며, 최근에는 1단식 전기집진기에서의 문제점인 역코로나 방지용으로 선진국들에서 연구중에 있다. 저전압 2단 전기집진기는 제거할 입자의 충전과 집진이 각기 다른 단(stage)에서 이루어지며, 미세액적(finely divided particles)의 제거에 주로 사용된다. 원래 점조성 입자의 제진은 다소 어렵기 때문에 처리 공기내의 액적의 농도가  $7.35 \times 10^{-4} \text{g/m}^3$  이상이 되면, 그 성능이 크게 저하된다. 저전압 2단전기집진기와 고전압 1단전기집진기는 사용전압과 설계면에서 크게 다르다. 예로 공기 조화용 전기집진기는 상단 전압은 5~6kV, 하단 전압은 12~13kV정도의 전압을 사용한다.

#### 4. 집진원리

전기집진기의 집진 미커니즘은 코로나 방전에 의한 분진의 대전(particle charging), 대전입자의 이동(migration) 및 집진극에 포집(collection) 등으로 구분되며 집진은 그림 6과 같이 (1) 방전극의 코로나 방전에 의한 강한 전기장의 발생, (2) 분진의 이온화를 위한 처리가스의 집진기상부로의 유입, (3) 입자의 대전 및 대전된 입자의 집진 판으로 이동 및 집진, (4) 부착입자의 중성화 및 래핑에 의한 호퍼로 제거되는 단계를 거쳐 배기 가스부터 집진이 일어난다.

#### 4.1 코로나 발생(Corona generation)

코로나 발생을 위해 전기집진기에 응용되는 방전은 방전극에 수십킬로볼트의 고전압을 가하여 그 표면에 매우 작은 국소 코로나방전을 발생시켜 방전극으로 부터 방출되는 자유전자가 충돌에 의해 부유입자를 전기적으로 대전시킨후 부유입자들은 외부적으로 가해진 전기장의 전자기력을 통해 집진극으로 유도 집진한다. 이러한 방전극에 공급되어지는 Positive Discharge와 Negative Discharge의 두종류의 극성을 나타낼 수 있도록 전압을 공급할 수 있는데 1) 방전상태가 안정적이다. 2) 강력한 전자방출 및 부유입자 극성화가 용이하다. 3) Spark 발생전압이 높다 등의 장점으로 현재 산업용 전기집진기는 Negative Discharge 방식이 주류를 이룬다.

코로나 방전이란 전기방전의 일종으로 고전압으로 연결된 전극주변에 있는 가스분자의 전기적 파괴를 수반한다. 코로나방전시 나타나는 특징은 주위 가스가 전기적으로 파괴되어 전극주위에 형광(luminous glow)을 발생시킨다. 형광의 모양은 점, 쏘세지뿔, 리본 등과 같은 각종 형태가 있다. 코로나방전시 나타나는 또 하나의 특징은 전극에 가해진 전압이 코로나개시전압(corona onset voltage)을 넘어서면 전류의 급속한 상승을 수반한다. 코로나 형상(glow)은 코로나 전극극성(polarity)에 따라 좌우된다. 양극 코로나(positive electrode corona)는 전극의 전표면에 균일한 형태로 나타나며,

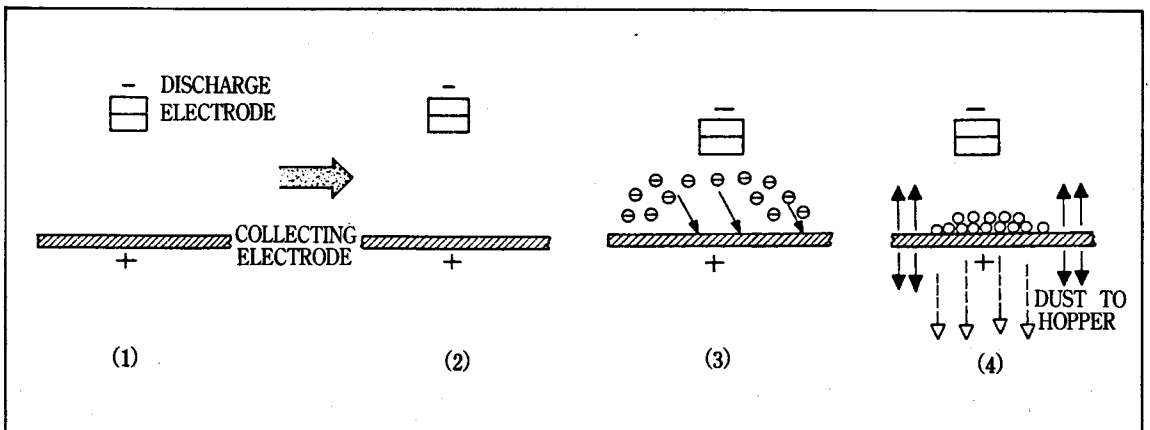


그림 6. 전기집진기내의 집진 미커니즘

음극극 코로나(negative electrode corona)는 빛나는 점이나 리본(streamers) 형태로 각 부위에 나타난다. 사진 1는 본 연구그룹에서 실험제작한 전기집진기내에 발생하는 코로나 방전을 사진으로 나타낸 것이다.

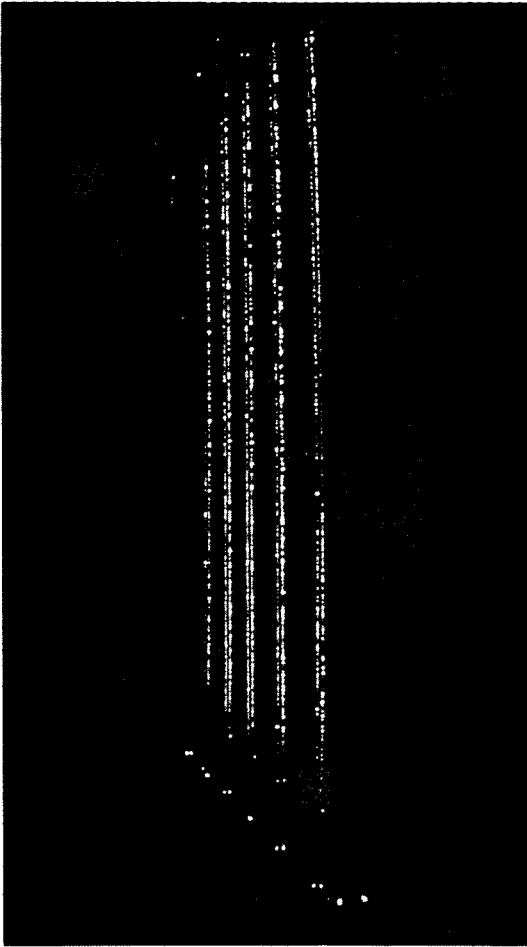


사진 1. 집진기내의 코로나 방전 현상

방전극 주위의 강한전계는 가스내에 존재하고 있는 자유전자를 가속한다. 이렇게 가속된 자유전자는 상당히 빠른 속도로 이동하면서 분자에 충돌하고 충돌된 분자는 양이온(positive ion)으로 되면서 한개의 자유전자를 방출한다. 이 자유전자는 연쇄적으로 다른 가스분자와 충돌하여 많은 수의 양이온과 자유전자를 생성시키는데 이와같은 이온증가 과정을 Avalanche 증배(Avalanch Multiplication)라 한다. 한편 보다 크고 둔한 양이온은

음극인 방전극을 향하여 이동해 가면서 방전극을 포위하고 있는 가스분자와 음극자체에 충돌하게 되며, 이 충돌로 인하여 새로운 자유전자가 발생된다. Avalanche증배 과정에서 발생된 자유전자는 전장(electric field)를 따라 접지되어 있는 집진극을 향해서 이동하는 전자군의 흐름을 형성한다. 이와같은 자유전자의 이동을 통해서 자유전자들은 코로나 범위를 벗어나 극간영역(inter electrode region)에 이르게 된다. 극간영역에서는 전장강도가 코로나 영역보다 작기 때문에 자유전자의 속도 또한 감소하게 된다. 이 영역에서는 전자가 가스분자와 충돌해도 코로나 영역에서와 같이 속도가 작아져 가스분자를 이온화시키지 못하고 가스분자 표면에 흡착되어, 분자를 음이온을 띤 가스분자로 만든다. 이렇게 형성된 가스이온은 다시 분진과 충돌 흡착되어 분진 충전기전의 원동력이 된다.

음가스이온(negative gas ion)은 접지된 집진극을 향하여 이동하며, 이 때 극간공간(inter electrode region)내에는 안정된 음이온가스가 일정농도에 달한다. 즉 공간전하(space charge)가 형성된다. 전극사이의 전압을 상승시키면 전장강도와 이온형성이 증가되나, 계속해서 전압이 상승하면 불꽃방전(spark over)이 발생하므로 불꽃방전이 일어나기 직전까지 전압을 올릴 수 있다. 여기서 불꽃방전이라함은 방전극과 집진극 사이의 공간내에 발생하는 불꽃을 의미한다. 이는 방전극과 집진극사이의 가스층(gas layer)을 통하여 국소화된(localized) 전류의 급작스런 돌진현상이다. 불꽃방전이 일어나면 잠시동안 전장(electric field)이 쇠약해지거나 없어진다. 일반적으로 전기집진기를 가동할 때 전압의 크기는 전장이 계속적으로 쇠약되지 않게 할 수 있는 범위 내에서 충분한 불꽃방전이 일어나도록 가동하는 것이 통례이다. 이와같은 최적가동을 위한 불꽃방전 횟수는 분당 5~100회 정도이다. 이 정도의 값이면 전압을 상승시켜서 얻어지는 집진효율이 이득이 전압을 올렸을 때 발생하는 불꽃방전에 의한 전장의 쇠약에 기인한 가스 이온화의 감소로 인한 효율손실보다 크게 된다. 최적효율(optimum efficiency)을 얻기 위해서는 전장강도는 가능한한 높을수록 좋다. 이와같은 상태를 얻기 위해서는 방전극에

고압을 걸어서 방전극에서 집진극으로 높은 코로나 전류를 흐르게 하여야 한다.

#### 4.2 분진대전

전기집진기에서의 입자의 충전에는 전계충전(field charge) 및 확산충전(diffusion charge)으로 구분할 수 있다. 이동중인 음전기 가스는 전계충전(field charge)과 확산충전(diffusion charge)에 의하여 극간영역내에 존재하는 입자를 충전시킨다. 충돌시 이들 방법중 어느 한가지가 적용될 수도 있고 두가지가 동시에 적용되기도 한다. 전계충전이라 함은 입경이  $1\mu\text{m}$  이상인 입자의 충전에, 입경이  $0.3\sim 1\mu\text{m}$  사이의 입자에는 두 방법이 모두 다 적용된다. 물론 입자의 충전에는 전자충전(electron charging)도 가능하나 이때는 가스분자와 결합하고 있지 않는 자유전자가 매우 빠른 속도로 입자에 직접 충돌 흡수되어 입자를 하전 시킨다. 그러나 이와 같은 자유전자가 직접 입자를 충전하는 경우는 전기집진기에서는 매우 드물다.

전계충전에서 입자가 전장내에 들어오면 국소적으로 전계를 혼란시키며, 음전기를 띤 가스이온은 전력선을 따라서 이동하다가 입자에 충돌 흡수되어 입자를 충전시키게 된다. 충전량이 충분해지면 전력선이 입자를 비켜 지나가게 되며 전력선을 따라서 이동하는 음이온도 전력선과 함께 입자를 비켜가기 때문에 음이온과 입자는 더이상 충돌하지 않는다. 즉 입자는 전자포화상태-충전 완료상태에 이르게 된다. 전자가 포화된 입자는 전기적인력(중력의 300배)에 의하여 집진극 쪽으로 이동하여 결국 집진극에 포착 제거된다.

확산충전은  $1\mu\text{m}$  이하의 미세입자에서 특히 현저하며 음전기를 띤 가스이온의 브라운 운동에 의하여 충전된다. 브라운 운동은 온도에 따른 가스 이동속도에 좌우된다. 온도가 높으면 높을수록 브라운 운동은 활발해진다. 온도에 따른 이온운동에 의하여 음이온이 입자에 충돌하게 되며, 충전된 입자는 집진극으로 이동해서 충돌 집진된다. 확산충들은 입경이  $1\mu\text{m}$ 보다 작은 미세입경(sub-micron size)에서 특히 중요하며 입경이  $0.3\sim 1\mu\text{m}$ 사이의 입자는 전계 및 확산충전에 의하여

충전된다.

#### 4.3 전자 포획과 공간전하 형성

코로나 방전극이 음극인 경우, Avalanch증배 과정을 통하여 발생하는 전자는 양극으로, 양이온은 음극으로 이동한다. 이때 전자 이동속도의 크기는 전계의 크기에 따라 다르다. 전기집진기의 두 극 사이에서 자유전자의 속도분포를 보면, 전계강도 분포와 같이 양극에서 멀어질수록(음극에 가까워질 수록) 빨라지며 가까워질 수록 느려진다. 이들 전자와 가스가 충돌하면 전자속도에 따라 Avalanch증배, 가스의 이온화 또는 분진의 충전 중 어느 하나의 상태가 된다. 산소, 수증기 및 아황산가스와 같은 전기음성도가 큰 가스들이 있을 때는 코로나방전에서 형성된 자유전자는 쉽게 포획되어 음이온을 형성하며 전계를 따라 집진극 쪽으로 이동해간다. 이들 자유전자와 음이온이 제거분진에 충돌 포획되어 분진을 대전시킴으로써 분진제거의 원동력이 된다. 이들이 집진극쪽에서 속도가 느려져서 공간에서 체류시간이 길어지기 때문에 공간전하로써의 역할을 하게된다.

양극코로나에서는 전계방향이 음이온 코로나와는 반대로 되어 Avalanch증배때 생기는 양이온이 집진극(집진극) 쪽으로, 자유전자는 코로나 방전극으로 이동해 간다. 양극코로나와 음극코로나의 근본적인 차이점은 음극코로나는 코로나가 안정되기 위해서는 일정한 공간전하가 생성되려면 전기음성도가 높은 가스가 존재하여야 한다. 이에 반해 양극 코로나는 공간전하의 안정에 필요한 이온이 저절로 발생된다. 대부분의 산업공정에서는 전기음성도가 높은 가스가 충분히 존재하기 때문에 위와 같은 조건은 크게 문제되지 않는다. 실제로 산업공정에서 배기가스를 취급할 때에는 배기가스의 온도나 압력이 보다 중요하고, 이 온도와 압력에서 전압-전류특성이 유리한 코로나를 사용하려는 경향때문에 음극코로나가 더욱 많이 사용되고 있다. 양극코로나는 오존발생량이 보다 적기 때문에 생활공간의 공기를 청정하는데 사용되거나, 처리가스가  $700\sim 800^{\circ}\text{C}$  이상인 가스의 집진에 사용된다.



#### 4.4 포집입자의 방전

입자의 비저항(resistivity)은 입자의 대전능력을 좌우한다. 산업공정에서 발생하는 대부분의 분진 비저항은 전기집진기로서 집진 가능한 범위내에 있다. 즉 비저항이 너무 작으면, 대전입자가 집진극(+극 또는 접지극)에 전기적인 힘으로 포집되었더라도 쉽게 전자가 손실되어(방전) 입자와 집진극 사이에 결합력(전기적 인력)이 소실되어 포집됐던 입자가 처리가스내로 재분산된다. 반대로 입자의 비저항(resistivity)이 너무 크면 집진층에 포집된 입자가 전혀 전자를 방전시키지 않기 때문에 집진층의 전압차가 너무 커져서, 입자가 절연 파괴되어 집진층의 분진이 일시에 전자를 잃어버려 역시 재비산의 원인이 된다. 따라서 입자의 비저항은 너무 커도 안되고 또한 너무 작아도 안된다. 보통 입자의 비저항이  $10^4 \Omega/cm \sim 10^{11} \Omega/cm$  범위내에 있을때 전기집진에 가장 적합하다. 보통 전기집진기의 집진극의 포집 분진층은 0.08~1.27 cm정도가 정상이며, 포집 분진층의 두께가 이보다 더 두터워지면 이 분진층은 하나의 절연층 역할을 하게 되어 전력선의 흐름(전계강도)을 감소시키게 된다.

#### 5. 설계요인(Design Parameter)

전기집진기 설계시 고려하여야 설계요인으로는 비저항(resistivity), 비집진면적(specific collection

area), 형상비(aspect ratio) 처리가스의 유량분포(gas flow distribution), 전기적구획(electrical sectionalization)이 있다.

#### 5.1 비저항(Resistivity)

입장의 비저항은 처리가스내의 입자가 갖는 전기저항(조건)으로서 해당 전기집진기의 설계 집진효율을 좌우할 수 있는 요인이다. 원래 전기집진기에서 비저항(Resistivity)이라함은 포집된 분진층의 전류에 대한 전기저항을 말하며 포집 분진 단위량 즉 두께 1cm, 단위면적  $1cm^2$ 내에 포집분진이 갖는 전기저항이며, 단위는 단위길이당의 저항(ohm/cm)으로 표시된다. 비저항은 분진내 전하이동에 대한 저항으로생각할 수도 있다. 보통 전기집진기에서 취급되는 분진의 비저항은 집진효율에 따라 표 2와 같이 분류된다.

#### 5.2 비집진극면적(Specific Collection Area)

비집진극면적(SCA)은 집진기로 유입되는 처리 가스량에 대한 집진면적과의 비로 정의된다. 이는 Deuche-Anderson식에서 A/Q을 나타내기 때문에 아주 중요하다.

$$SCA = \frac{\text{총집진면적}(m^2)}{\text{유입처리가스}(1,000m^3/hr)} \quad (\text{또는 } \frac{ft^2}{1000acfm})$$

표 2. 단위 길이당 분진의 비저항 분류

구 분	비저항범위 ( $\Omega/cm$ )	처 리 효 율
저비저항 (Low resistivity)	$10^{-4} \sim 10^7$	- 입자가 대전은 쉽게되나 집진판에서 즉시 대전된 전하를 빼앗겨 전기적으로 중성화 되어 집진극에 붙어있지 못하고 처리가스내로 재비산된다. - Flyash, 유리로된 카본 블랙 - 정상비저항으로 만들기 위해 암모니아 콘디셔닝을 주로 사용
정상비저항 (Normal Resistivity)	$10^7 \sim 10^{10}$	- 집진극에 도달하여도 대전 전하를 서서히 빼앗기기 때문에 분자간 인력 및 응력에 의해서 집진극에 집진층을 형성
고비저항 (High resistivity)	$10^{10} \sim$	- 입자가 자유전자에 의한 대전이 매우 어렵다. 또한 대전되어도 집진극에 쉽게 전자를 주지못하여 분진층을 형성

일반적으로 전기집진기에서 비집진면적(SCA)을 증가시키면 효율이 증가한다. 종래에 전기집진기 설계에 사용된 비집진면적(SCA)은 20~25m<sup>2</sup>, 1,000m<sup>3</sup>hr이며, 이때 집진효율은 99.5%에 달한다. 설계조건 및 효율요구에 따라 사용할 수 있는 비집진면적(SCA)은 일반적으로 11~45m<sup>2</sup>, 1,000m<sup>3</sup>hr이다.

### 5.3 형상비(Aspect ratio)

형상비(AR)는 집진극(Collector Surface)의 높이와 길이의 비를 말하며 아래와 같이 계산한다.

$$A \cdot R = \frac{\text{실효길이}}{\text{실효높이}}$$

전기집진실에서는 높이보다 길이를 크게 해주는 것이 이상적이나 실제에 있어서는 장소와 비용 때문에 곤란하다. 99.5%의 집진효율을 목표로 하는 전기집진기 설계에서의 형상비는 보통 0.5~2범위로 한다. 실제 전기집진기 설계시 형상비는 적어도 1보다는 커야 한다.

### 5.4 처리가스유량분포(Gas Flow Distribution)

전기집진기내에서 처리가스의 흐름은 그 속도가 완만하고 또한 전기집진기 전체를 통해서 고르게 분포되어야 한다. 전기집진기 입구에서의 처리가스의 속도는 일반적으로 0.6~2.4m/sec로 하고 있으나 유입시의 처리가스속도는 성능을 최대한 유지시킬 수 있는 속도로 조절되어야 한다. 전기집진기내에서 처리가스의 속도 및 흐름의 균등한 분포는 전기집진기 입구를 확장프렌넵입구(Expansion inlet plenum)로 사용함으로써 해결하고 있다. 흔히 사용되는 전기집진기의 처리가스 속도는 0.6~2.4m/sec 범위를 유지하도록 하고 있다. 이들 처리가스 속도는 형상비에 따라 변하는데 형상비(AR)를 1.5정도로 하면, 최적 처리가스 속도는 1.0~1.5m/sec 범위에 있도록 하고 있다.

## 6. 국내외 관련기술의 현황

최근 전기집진기 내부의 집진 프로세스의 해

석에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있으며, 이러한 연구들은 고전기저항분진과 관련하여 집진효율의 향상과 이에 관한 예측기법에 관하여 집중되고 있다. 이 가운데 몇가지 중요한 연구과제들을 소개하면 다음과 같다.

### 6.1 컴퓨터 모델(Computational Model)

미국의 SRI(Southern Research Institute) 연구소에서 처음으로 개발되었는데, 이는 집진기 모델을 미소하게 분할하여 여러가지 분진입자에 대하여 전기장과 하전민도를 수치적으로 계산하여 집진효율을 예측한다. 현재 대부분의 E.P. 본체 설계시에 Deutsch-Anderson equation,

$$\eta = 1 - e^{-\frac{A}{v} \omega}$$

을 사용하고 있는데,

여기서, A=the collection surface area of the E.P

v=the gas flow rate through the E.P

ω=particle migration velocity

이며, 이동속도(migration velocity)는

$$\omega = \frac{q E_p}{6\pi\mu r_p} \left(1 + A \frac{\lambda}{r_p}\right)$$

로 표현되는데, 이것은 E.P. 설계에서 가장 중요한 값으로, 앞에서도 언급한 바와 같이 electric field properties, dust properties, fluid flow properties, geometric properties등에 의하여 매우 민감하게 작용되는 함수로 되며 이들에 대한 전반적인 복합해가 필요하다. 현재 E.P. 생산업체에서 이 값을 결정하는데 각종 노하우(knowhow)를 보유하고 있지만, 근본적으로 매우 복잡하게 작용되는 인자이기 때문에 이에 의한 설계의 결과는 실제와 많은 오차를 유발시키고 있다. 한 예로, Deutsch-Anderson 식의 가정중의 하나가 집진판 사이의 유동이 균일하다고 가정하는데, 이러한 가정은 실제 현상과 매우 큰 차이를 보여 주었다.

따라서 이러한 컴퓨터 모델은 집진효율을 예측할 때, 가정을 배제하고 유체의 누수(sneakage), 추타 및 재비산 등의 효과에 관한 실험적인 관

계식을 이용하여 실제상황에 가까운 전기집진의 특성을 예측하는데 널리 이용하고 있다.

## 6.2 예비 하전장치(Prechargers)

예비 하전시스템의 가장 중요한 목적은 고전기저항 플라이애쉬의 집진인데, 이것은 하전과 집진을 두개의 분리된 단에서 행하도록 하는 것이다. 하전단에서는 여러가지 기법이 역코로나 현상을 감소시키기 위하여 사용되고 있는 반면, 집진단은 단지 평행판으로 구성되어 있으므로 역코로나가 발생되지 않는다. 예비하전 방식에는 적용에 따라 다음의 4가지 형태에 대하여 연구 중이다.

- 하전부의 전기장을 일정한 주기로 변화시켜 하전부에서 역코로나 현상을 억제하는 Boxer 하전방식
- 입자를 특정한 노즐과 전극배열로 빠르게 통과시켜 하전을 증가시키는 High intensity 하전방식
- 방전극과 같은 극성을 가지는 여분 그리드(grid)를 판에 인접시켜 역코로나를 방지시키는 Trialectrode 하전방식
- 물을 하전극 파이프내로 통과시켜 파이프의 온도를 낮추고 따라서 파이프에 부착된 분진의 전기저항을 강하시켜 역코로나를 억제하는 cold pipe 하전방식

등이 있는데, 현재 이들은 대부분 파이프 규모에서 개발중이며, 규모가 큰 상업적인 장치로는 아직까지 사용되지 않고 있다.

## 6.3 판간격 확대(wide-plate spacing) 방식

판간격확대 방식 또는 광폭(wide pitch)방식은 1971년 일본에서 시작된 이후 최근에 그 연구가 활발히 진행중이다. 표준 간격이 250mm에서 300mm로 증가되었으며, 최적 간격은 400~600mm 사이에 있다는 것이 일반화되고 있다. 실제의 최적간격은 기계장치의 간단화와 전기장치의 추가에 의한 비용의 평형으로부터 결정된다. 실험적으로

또는 대부분의 산업 규모의 전기집진기 시험 결과, 분진의 유효 이동속도(effective migration velocity)는 판의 간격에 따라 증가되며, 효율은 집진판의 면적에 보다 오히려 케이스의 체적의 함수로 나타남을 보여주고 있다.

이는 아직까지 정확하게 정량적, 이론적으로 설명될 수 없는 현상이며, 기존의 도이취(Deutsch) 또는 수정 도이취식으로 설명될 수 없다. 광폭집진기의 성능 향상에 영향을 주는 여러가지 인자가 있을 수 있는데, 즉 폭의 증가에 따른 분진의 재비산(re-entrainment)의 비선형성, 낮은 코로나 개시전압, 기체공간에서 분진의 응집확률을 증대 그리고 공간하전에 기인하는 집진판에서의 전기장의 증가 및 평탄한 전류 밀도 분포 등이 있다.

## 6.4 변동 전압 시스템

지난 15여년 동안 여러가지 형태의 펄스(pluse) 하전 시스템이 실험실 규모로 부터 실제 집진장치로 성공적으로 적용되었다. 이 방식에는 다음의

- 펄스(pulse) 하전
- 간헐(intermittent) 하전

두가지 방식이 사용되고 있는데, 펄스방식은 초당 250회 정도의 간격 50~200 $\mu$ s의 펄스를 사용하는 것인데, 이것의 장점은 코로나를 방전선의 전체 길이에 대하여 생성시키며 집진판에서의 전류 분포를 한층 균일하게 하여 주어서 집진효율을 향상시키고 동시에 전력소모를 줄이는 효과를 가져온다.

이 밖에도 방전극의 직경 증가 방법, 전자빔 이용 입자하전 및 이동전극형 집진장치 등에 관한 연구들이 광범위하게 행하여지고 있다.

## 7. 결 언

대기오염문제는 선진국에서만 발생하는 문제가 아닌 우리나라를 비롯한 전세계적으로 중요한 환경문제로 거론되고 있다. 이에 화력발전소에서 발생하는 분진을 제거하기 위하여 미국, 유럽 및 일본 등의 전기집진기 관련 연구기관, 산업체 등

에서는 전기집진기의 고효율화를 위한 연구/개발에 관하여, 판간격의 확대(광폭)화, 펄스하전, 유동가스 성분제어 및 2단하전식 등에 관한 연구들이 지속적으로 수행되어지고 있으며 최근에 실증되어 성공적으로 실기에 적용하고 연구는 광폭 전기집진기와 펄스하전식 집진기의 개발이다. 앞에서 언급되었듯이 한국기계연구원과 한국중공업(주) 공동으로 연구중인 광폭 전기집진기, 펄스하전식 집진기 및 전기집진기에 대한 정확한 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 연구는 E.P. 크기의 최소화 및 컴팩티화를 달성할 수 있어 현저한 시공비의 절감을 가져오게 되며, 국내에서 이러한 연구가 성공적으로 끝났을 경우 고효율의 전기집진기를 자체설계 할 수 있는 기술력을 보유하게 되어 발전소용 전기집진기의 기술을 외국으로부터 도입함으로써 발생하는 외화유출을 막는 동시에 전기집진기를 수출하는데 있어 가격과 기술면에서 경쟁력을 갖게 될 것으로 생각된다.

이에 앞으로도 계속적으로 화력발전소를 건립할 예정인 국내에서 뒤늦게나마 전기집진기의 고효율화에 대한 연구가 진행되게 된것은 다행으로 생각되며, 추후 전기집진기를 비롯한 대기오염방지 기술에 대해 과감하고 지속적인 투자가 필요한 것으로 사료되며, 본고의 내용이 전기집진기 뿐만 아니라 전기관련 집진장치 연구분야에 작은 도움이 되기를 바란다.

### 참 고 문 헌

1. OGLESY, S. and NICHOLS, G.B., "Electrostatic Precipitation", Marcel, Dekker, New York(1978)
2. SABERT O., et al., "A Manual of Electrostatic Precipitator Technology", NTIS, 1970
3. Proceeding of the 3rd International conference on Electrostatic Precipitation, 1987
4. SEYMOUR C. and HAROLD M.E., "Handbook of Air Pollution Technology", John Wiley & Sons, 1984.
5. RICHARD C.F. and JOHN H. S., "Fundamentals of Air Pollution Engineering", Prentice-Hall Inc., 1988
6. Elsevier Advanced Technology, "Filter and Filtration", 1992
7. SEKAR, S., and STOMBERG, H. : On the prediction of current-voltage characteristics for wire-plate precipitators, J. Electrostatics, 1981, 10, pp.35-43
8. KATZ, J., "The Art of Electrostatic Precipitation", Precipitator Technology, Inc., Munhall, PA. (1980)
9. FELDER, R.M., and ARCE-MEDINA, E. : 'calculation of voltage and space charge distributions in a wire-plate electrostatic precipitators', J. Electrostatics, 1984, 15, pp.3-13
10. ELMOURS, A.A., and CASTLE, G.S.P. : 'Modelling of corona quenching phenomena in duct-type electrostatic precipitators'. Proc. Second International Conference on Electrostatic precipitators, Nov. 1984, Kyoto, pp.532-539
11. LEONARD, G.L., MITCHNER, M., and SELF, S.A. : 'Partial transport in electrostatic precipitators', Atmospheric Environment, 1980, 14, pp. 1289-1299
12. MASUDA, S. : 'State of art of precharging'. Proc. of Second International Conference on Electrostatic precipitation. Kyoto, November 1984, pp.177-185
13. Third Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Thechnology, Vol.II, Orlando, 1981, pp.304-313
14. HEINRICH, D.O. : 'Review of some practical aspects of wide dust spacing', Proc. of First International Conference on Electrostatic precipitation, October 1981, Monterey, pp.638-653
15. DARBY, K. : 'Plate spacing effect on precipitator performance'. Proc. of Second International Conference on Electrostatic precipitators, Kyoto, November 1984, pp.376-383
16. 김용진 외 5인, "전기집진기 고효율화 연구", 대한기계학회경남지부 학술발표회, 1993.
17. 김종석 외 1인, "대기오염방지기술", 동화기술, 1991.