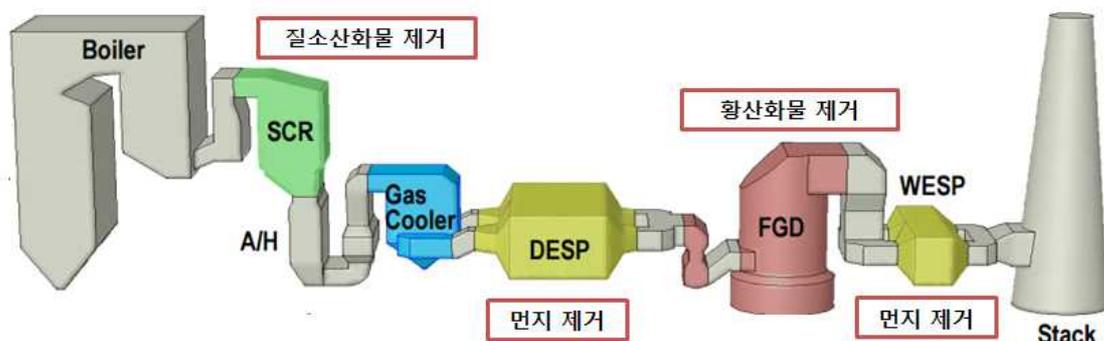


### 3. 미세먼지 제거\_고정원 배출 먼지 제거(전기집진기)

석탄은 다른 화석연료에 비해 매장량이 풍부하고 매장 지역이 고르게 분포되어 있으며 가격이 싸기 때문에 열에너지 및 전기에너지 생산에 가장 많이 이용되고 있는 자원이다. 국제에너지기구(IEA)의 발표에 따르면 신재생에너지 활용이 증가하더라도 전 세계 에너지 수요량의 대부분은 화석연료에 의해 충당 될 것으로 예측하고 있다. 전 세계 전력생산을 예로 보면 2008년 20,300TWh에서 2030년 33,000TWh로 년 평균 2.3%의 증가가 있을 것으로 예상하고 있다. 전력생산에서 석탄이 차지하는 비율은 2008년 41%에서 2030년 32%로 감소하나 석탄으로 인한 전기 생산량은 8,323 TWh에서 10,560 TWh로 증가 할 것으로 예측하고 있다. 즉, 에너지 생산 중 석탄이 차지하는 비율은 감소하나 그 사용량은 지속적으로 증가할 것이 전망된다. 따라서 석탄연소로 인한 미세먼지, 황산화물, 질소산화물, 이산화탄소 등 대기오염물 배출 증가는 불가피한 실정이다.

단일 공정으로는 석탄화력발전소에서의 대기오염물 배출이 가장 많기 때문에 석탄화력발전소에는 다른 고정원 대비 강력한 환경규제가 적용되었고 환경처리 설비도 가장 먼저 설치되어 운영되고 있다. 석탄화력발전소에 적용되어 운영되고 있는 대기오염물 처리 설비는 다음 [그림 3-1]과 같다. 설치된 시기로 구분하면 먼지 제거를 위한 전기집진장치(ESP: Electrostatic Precipitator), 황산화물제거를 위한 FGD(Flue Gas Desulfurizer), 질소산화물 제거를 위한 선택적촉매환원(SCR : Selective Catalytic Reduction) 장치 순으로 설치되어 운영 중이다.



[그림 3-1] 석탄화력발전소의 대기오염물 처리 설비.

[출처 : Bobcok-Hitachi, Advanced AQCS for oxy-fuel Combustion system; controlling Mercury & SO<sub>3</sub> (2011)]

전기집진기의 경우 배가스 온도에 따라 FGD 전단에는 건식전기집진기(Dry Electrostatic Precipitator) 후단에는 습식전기집진기(Wet Electrostatic Precipitator)나 부직여과포(Fabric Filter)를 적용하며, 위 그림중 하나의 장치를 이용하여 먼지를 제거하고 있다.

고정원에서 배출되는 먼지에 대한 규제는 배출시설의 형태, 사용연료, 설치시기 등에 따라 다양한 배출허용기준을 정하고 있다. 우리나라에서 가장 많이 가동되고 있는 발전용량 100MW이상 석탄화력발전소의 경우 2001년 6월 30일 이전 설치 시설의 경우 25mg/Sm<sup>3</sup> 이하, 2001년 7월 1일 이후 설치 시설은 20 mg/Sm<sup>3</sup> 이하, 2015년 1월 1일 이후 설치 시설 10 mg/Sm<sup>3</sup> 이하를 먼지 배출허용기준으로 설정하고 있다(출처 : 환경부, 대기오염물질의 배출허용기준(제15조 관련), 2015년 7월 21일 개정). 이러한 엄격한 대기오염물 배출허용기준을 달성하기 위해서는 먼지제거를 위해 적용하는 집진장치의 효율이 99%이상을 넘어야 한다. 석탄화력발전소에서 발생되어 대기로 방출되는 먼지(fly ash)의 주성분은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 전체 질량의 약 80~90%를 차지하고 있다. 또한 휘발성 물질로 Ca, Na, Mg, K, Ti, S등과 Se, As, Cd, Hg, Ni, Pb, Cr, Sr, Be, V, U등의 중금속 물질이 포함된다고 보고되고 있다. 일반적으로 연소로에서 배출되는 먼지의 크기는 20nm~200µm 사이이며 이중 1µm보다 작은 먼지는 약 1%를 차지하나 독성 중금속이 많이 분포되어 있는 것으로 나타났다. 또한 휘발성 물질인 Hg의 경우 과거에는 분석자체가 이루어지지 않았으나 그 위해성과 대기중 긴 반감기 등을 고려하여 수은제거에 대한 연구가 10여 년 전부터 국내에서도 진행 중이다. 인체에 영향을 미칠 수 있는 전기집진기에서 제거하지 못하고 배출되는 먼지의 크기 분포는 bimodal 형태를 나타내며 첫 번째 피크인 작은 먼지의 경우 입자크기가 약 0.07µm이며 주로 휘발성물질과 응축입자들로 독성물질이 많이 포함되어 있다. 두 번째 피크인 상대적으로 큰 입자는 약 0.4µm 크기를 가지며 비연소 광물(unburned mineral matter)인 SiO<sub>2</sub>(약 1/2), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (약 1/4)가 주성분이다. 형태로는 큰 입자들은 주로 구형이며 작은 입자들은 불규칙한 형태를 보이는 것으로 알려졌다 (출처: A. Jaworek et. al., "Modern electrostatic devices and method for exhaust gas cleaning, Journal of electrostatics, 65, 133-155 (2007)).

먼지를 제거할 수 있는 장치는 건식과 습식으로 구분할 수 있는데 건식장치는 사이클론(cyclone), 부직포(fabric filter), 세라믹필터(ceramic filter), 정전필터(electret filter)등이 있으며 습식장치는 관성력, 원심력, 벤트리, 정전기력과 습식 스크러버가 결합된 장치들이 이용되고 있으며 배가스 온도에 따라 적용되는 장치가 구분된다.

이 중 석탄화력발전소에 가장 널리 적용되고 있는 먼지 제거 정화장치는 전기집진장치이다.

전기집진장치는 전기에너지를 이용하여 가스상으로부터 먼지를 제거하는 장치이다. 전극으로부터 방전된 전기는 일반적으로 높은 음전위(negative potential) 가지고 있고 자유전자를 가스분자에 결합시켜 가스이온을 생성한다. 이러한 가스 이온은 먼지와 충돌하여 먼지를 하전 시킨다. 하전된 먼지는 반대극을 띠는 집진판에 고착되어 배가스로부터 제거된다. 전기집진기를 이용한 먼지 제거 중 가장 중요한 먼지의 하전 속도는 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

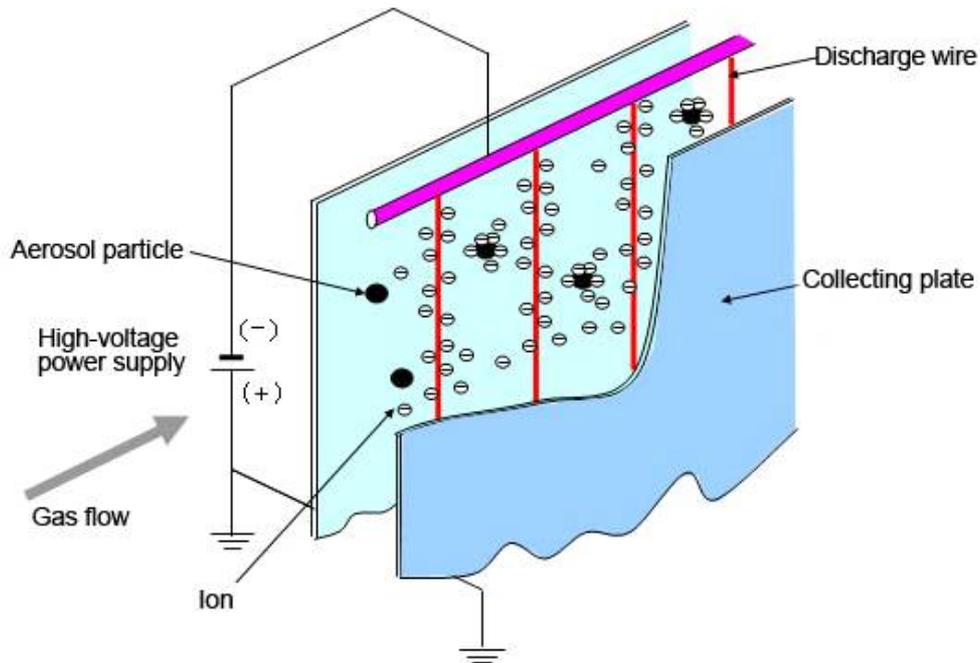
$$\frac{dQ}{dt} = 3\pi n E \mu r^2 \frac{\epsilon_T}{\epsilon_T + 2} \left(1 - \frac{Q}{12\pi \epsilon_0 r^2 E} \frac{\epsilon_r + 2}{\epsilon_T}\right)^2 + \pi n r^2 v$$

여기에서 n은 space charging density,  $\mu$ 는 ion mobility, r은 먼지 반경, v는 가스 이온의 평균속도이다.

이온전류(ionic current)에 의해 입자가 하전 되는 가장 중요한 두 반응경로는 다음과 같다. 1) 전기장하전(Field charging) : 식의 첫 번째 부분, 외부 전기장에 의해 야기된 정전기력에 의해 이온들이 입자로 이동 2) 확산충전(Diffusion charging) : 두 번째 부분, 전기장에 관계없이 가스이온의 kinetic energy에 의해 입자로 이동하는 두 부분이 반응의 주된 경로로 알려져 있다. 입자크기에 따라 주된 반응이 달라지는데 입자 크기가 1 $\mu$ m보다 클 경우는 전기장하전에 지배를 받고 0.1 $\mu$ m보다 작은 입자는 확산충전에 영향을 받는다.

전기집진기 주요 구성은 먼지에 전하를 주는 하전체(discharge wire)와 집진판(collecting plates)로 구성되어있다. 높은 전압이 하전체에 적용되면 wire와 집진판 사이에 전기장(electrical field)을 형성한다. 하전체 주위의 가스는 이온화되어 먼지와 충돌하고 먼지가 전하를 띠게 한다. 쿨롱 힘(Coulomb force)에 의해 전하를 띤 먼지들이 집진판에 부착되게 하며 이를 통해 공기가 정화된다. 집진판에 포집된 입자들은 집진판을 두드리는 방법에 의해 제거하거나, 솔(brush)이나 물로 씻어낼 수 있으며 떨어진 먼지는 호퍼에 저장된다. 전기집진기의 일반적인 가스 처리 시간은 먼지농도(일반적으로 1~50g/Nm<sup>3</sup>)에 의존하지만 10~30초 정도다. 가스 속도는 0.5~1.5m/s이며 하전된 먼지가 집진판으로 이동하는 속도는 0.02~0.15m/s 정도를 보인다. 전극의 전류 밀도는 대개 0.1~1 mA/m<sup>2</sup>이며 입력강하는 1-2 kPa 보다 높지 않고 에너지

소비는 0.3~1.8MW/1000Nm<sup>3</sup>로 알려져 있다



[그림 3-2] 전기집진기 개념도.

(출처: Hitachi Infrastructure Systems (Asia) Pte. Ltd. [www.hitachi-infra.com.sg](http://www.hitachi-infra.com.sg))

전기집진기의 먼지 제거 효율은 집진판의 전기 저항률(electrical resistivity)과 먼지 크기에 영향을 받는다. 정상적인 저항률 범위에서는 집진효율이 높고 집진 공정을 안정되게 운전할 수 있다. 낮은 저항률(low-resistivity) 영역에서는 입자에 하전된 전하를 쉽게 잃기 때문에 집진판에 먼지가 포집되어도 쉽게 재비산(Re-entrainment)되어 집진효율이 급격히 감소한다. 높은 저항률(high-resistivity)영역에서는 먼지의 전기 저항률이 증가하기 때문에 집진효율이 감소한다. 또한 집진판에 집진된 먼지층안에서 빈번한 방전(flashover)이 발생하거나 역코로나(back corona) 현상이 발생한다. 전기집진기의 범위는 먼지 저항률(dust resistivity)  $10^2 \sim 10^9 \Omega m$ 의 매우 넓은 범위에 적용할 수 있다.  $10^2 \Omega m$ 보다 작은 저항률을 갖는 먼지는 하전된 후 집진판으로 이동하여 집진될 수 있으나 재비산이 쉽게 일어난다.  $10^9 \Omega m$  이상의 높은 저항률을 가진 먼지는 집진판에 단단한 먼지층을 형성하고 전하가 축적되어 역코로나 현상을 유발한다.

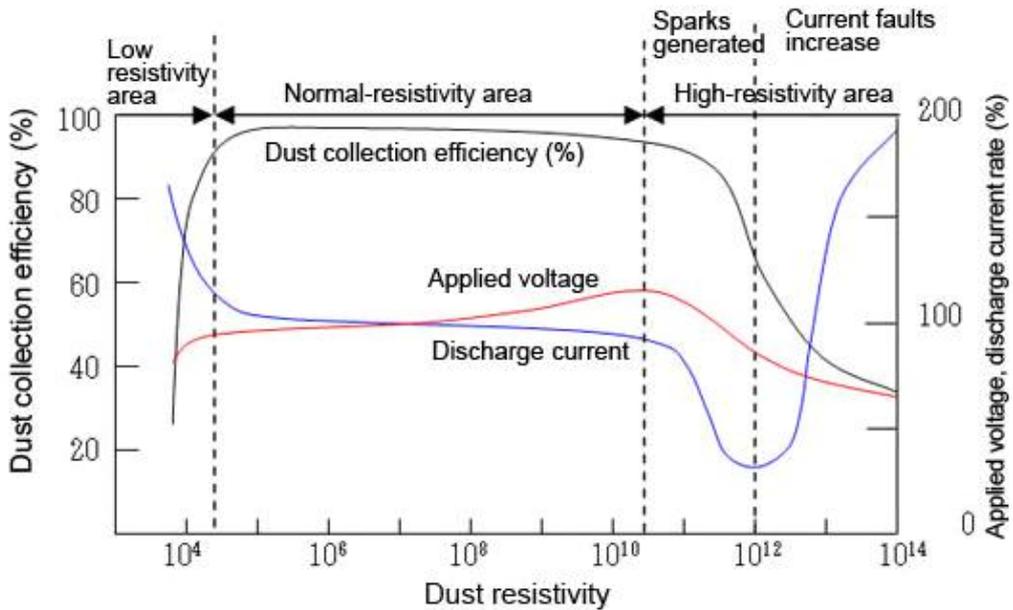
집진효율에 영향을 주는 입자크기는 집진효율과 다음과 같은 상관관계를 갖는 것으

로 알려져 있다.

$$\eta = 1 - e^{-v_m A / V}$$

여기서  $v_m$ 은 집진기 전체의 입자의 평균 이동속도,  $A$ 는 집진기 채널의 단면적,  $V$ 는 가스 유속이다.

위의 식으로부터 집진효율을 증가시키기 위해서는 입자의 이동속도를 증가시키거나 단면적을 증가시켜야 되는 것을 알 수 있다. 최근에는 펄스에너지를 공급하거나, 전기, 화학적 혹은 초음파 응집 등을 통하여 집진효율을 증가시키는 방법들이 적용되고 있다.



[그림 3-3] 전압과 집진 효율 상관관계.

(출처: Hitachi Infrastructure Systems (Asia) Pte. Ltd. [www.hitachi-infra.com.sg](http://www.hitachi-infra.com.sg))

입자크기  $3\mu\text{m}$ 보다 크고  $0.1\mu\text{m}$ 보다 작은 먼지는 전기집진기에서 집진효율이 우수한 것으로 나타난다. 집진효율이 가장 낮은 먼지크기 영역은  $0.1\sim 1\mu\text{m}$  사이로 90% 이하의 집진효율을 보인다. 아주 작은 입자의 집진효율이 낮은 것은 하전 되는 양이 작기 때문으로 하전된 양이 작은 먼지는 집진판으로의 이동성이 떨어지게 되어 결과적으로 집진효율을 낮게 나타난다.  $0.03\sim 0.2\mu\text{m}$  범위의 먼지들은 하전 되지 않은 상태로 남아 있는 경우가 대부분이며 이러한 입자들은 보다 큰 입자에 고착되어 제거 된다. 또한  $50\text{nm}$  이하의 아주 작은 입자들은 전기집진기에서 집진되지 않고 빠져나간다.

전기집진기는 석탄화력발전소뿐 아니라 다양한 고정원에서 먼지를 제거하기 위한 장치로 적용 되고 있는 성숙된 기술이다. 환경규제가 강화됨에 따라 전기집진기 효율을 증가시키기 위한 연구개발이 진행 중인데 주요 이슈는 역코로나 방지, 서브마이크론(submicron) 크기 입자 제거 효율 증진 및 재비산 방지 기술 개발 등 이다.