

# 우리나라에 있어서 전기집장치의 현황과 전망

李達雨 / 한국코트렐공업(주) 대표이사 · 本協會 理事

## 1. 序 言

우리나라 공업이 70년대 이래 급격히 신장됨에 따라 각종산업 Plant에서 배출되는 폐가스로 인한 대기오염이 여러곳에서 발생하여 환경보전에 대한 국민적 관심이 고조되어 왔다.

大氣公害는 폐가스에 내포된 분진에 의한 오염과 폐가스의 조성중 유해가스 성분에 의한 오염으로 大分할 수 있으나 이 양자가 복합적으로 발생하는 경우가 빈번하여 다양한 양상을 띄고 있다.

분진은 集塵裝置(Dust Collector)로서 捕集하여 방지할 수 있으며, 각종 유해가스는 중화연소 또는 흡수등 여러가지 화학적방식으로서 유해치 않은 물질로 변환하여 처리하고 있으며 따라서 그 방지시설의 내용은 일종의 소규모 화학 Plant를 형성하고 있다.

우리나라에 있어서 대기오염 방지시설은 아직 분진에 대한 집진장치에만 국한되고 있는 실상이어서 오늘은 집진장치 중에서도 전기집진기에 대한 이야기를 중점적으로 논하고자 한다.

## 2. 여러가지 集塵裝置

집진장치는 입자인 분진을 내포한 기체에서 입자를 분리하는 장치로서 다음의 4가지 기종으로서 분류되고 있다.

1. 전기집진장치 (Electrostatic Precipitator)
2. 여과집진장치 (Fabric Filter)
3. 기계 집진장치 (Cyclone Collector)
4. 세정집진장치 (Wet Scrubber)

電氣集塵裝置는 건식과 습식, 평판전극과 원통전극, 수평류와 수직류 등으로 분류할 수 있고 또 이들의 조합으로 다양한 기종이 가능하나 건식 평판류 수평류 전기집진기와 습식 원통형 수직류 전기집진기가 보편적으로 사용되고 있다.

여과집진기는 Bag Filter로서 널리알려져 있으며, 濾布의 표면에 捕集된 분진을 털어내는 방식 (Bag Cleaning Mechanism)에 따라 Pulse Jet Type (噴射 空氣式), Reverse Flow Type (逆洗式), Mechanical Shaker Type (기계 진동식) 또는 복합형인 Reverse Air Mechanical Shaker Type (逆洗機械振動式) 등으로 분류할 수 있고, 기종마다 특유의 장단점을 지니고 있으나 근래에 와서 점차 Pulse Jet Type의 선호도가 두드러지게 증가되고 있음은 이 방식이 지니는 Pulse Jet Air에 의한 강력한 Bag Cleaning이 Filter를 소형화 할 수 있으며, 또 그 Control이 간편하고 Bag의 교체 (Replacement)가 용이하다는 이점 때문인 것으로 觀側되고 있다.

보편적으로 Cyclone이라 알려져 있는 이 기계식 집진기는 Unit Cyclone 과 Multi Cyclone으로 분류되고 있으며 구조가 간단하고 견고하나 그 원리가 기체의 회전운동으로 그중에 내포된 분진에 가해진 遠心分離力을 이용하고 있느니만큼 그 분리력에 한계가 있어 집진효율은 낮은 편이어서 근래에는 Pre-duster (예비집진기)이외에는 별로 쓰이지 않고 있다.

洗淨集塵裝置(Wet Scrubber)는 Venturi Scrubber와 충전탑(Packed Tower)으로 大別되며 주입된 Scrubbing Liquid의 미세한 물방울(Droplet)과 입자(분진)의 충돌, 확산작용으로 기체에 내포된 입자를 액체와 함께 분리하는 집진장치로서 이 장치는 기체의 흡수(Absorption)작용도 겸하고 있어 Scrubbing Liquor의 선정에 따라 유해가스의 방지시설로서 광범위하게 쓰이고 있는 기종이나 이차적으로 발생한 폐수 또는 Slurry의 처리가 간단치 않은 문제점을 지니고 있다.

이상에 열거한 4기종의 집진장치 가운데 전기집진기를 제외한 3기종에 있어서는 입자에 가해지는 분리력을 부여하는 Energy는 그 입자

를 내포하고 있는 기체의 흐름(Fluid)에 가해지며 압력손실,  $\Delta P$ 의 형태로서 나타나며 그 공정중의 押入 또는 흡인 송풍기의 동력으로서 가해진다. 이에 반해 전기집진기에 있어서의 분리력은 기체의 흐름에 무관하며 입자에만 직접 작용하는 정전력(Electrostatic Force)이다. 이 점이 전기집진장치가 타종의 집진장치와 근본적으로 다른점이며 省 Energy면에서 탁월한 특성을 지니게 된 원인이기도 하다.

### 3. 電氣集塵裝置의 原理와 效率

曲率半徑이 작은 導體인 放電極(Discharge Electrode : D·E)의 표면에 電界強度를 점차 높여갈 때 放電極 周圍에 기체분자의 電離(Ionization)가 왕성하여 지며 마침내 Corona 放電현상이 발생한다.(Fig 1 참조). 이때 발생한 다량의 + ion과 - ion중 + ion은 -극인 放電極 D·E에 즉각 흡착되고 - ion과 電子는 집진전극 C·E를 향하여 이동하므로 D·E와 C·E사이의 공간은 -전하(Charge)로 충전된 공간전하(Space Charge)를 이루고 이 공간내에 존재하는 가스중에 내포된 입자(분진)에 전하

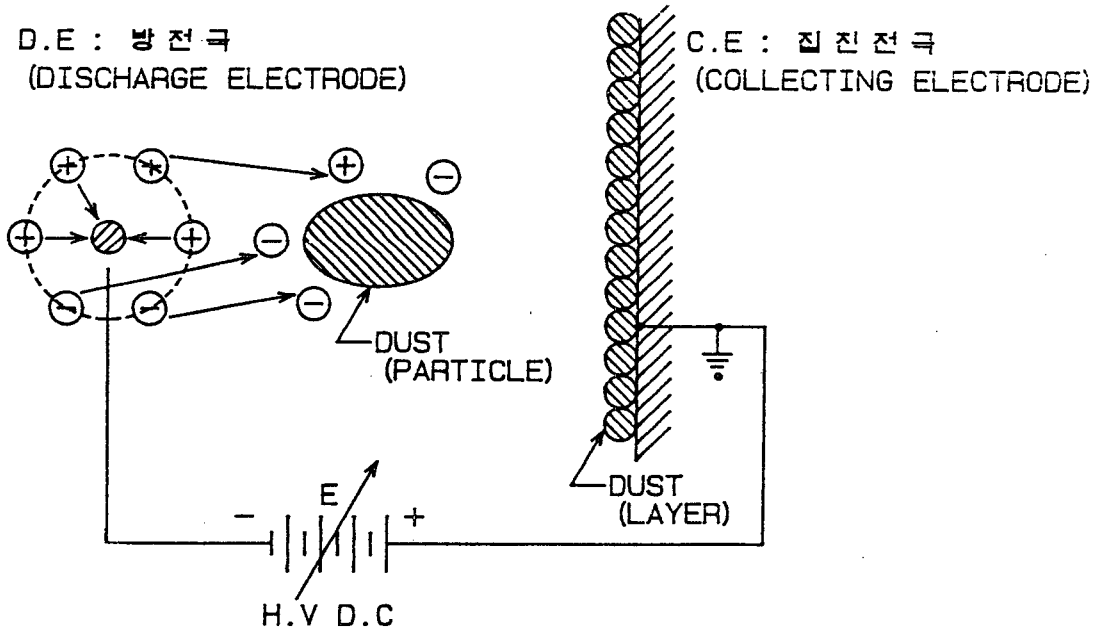
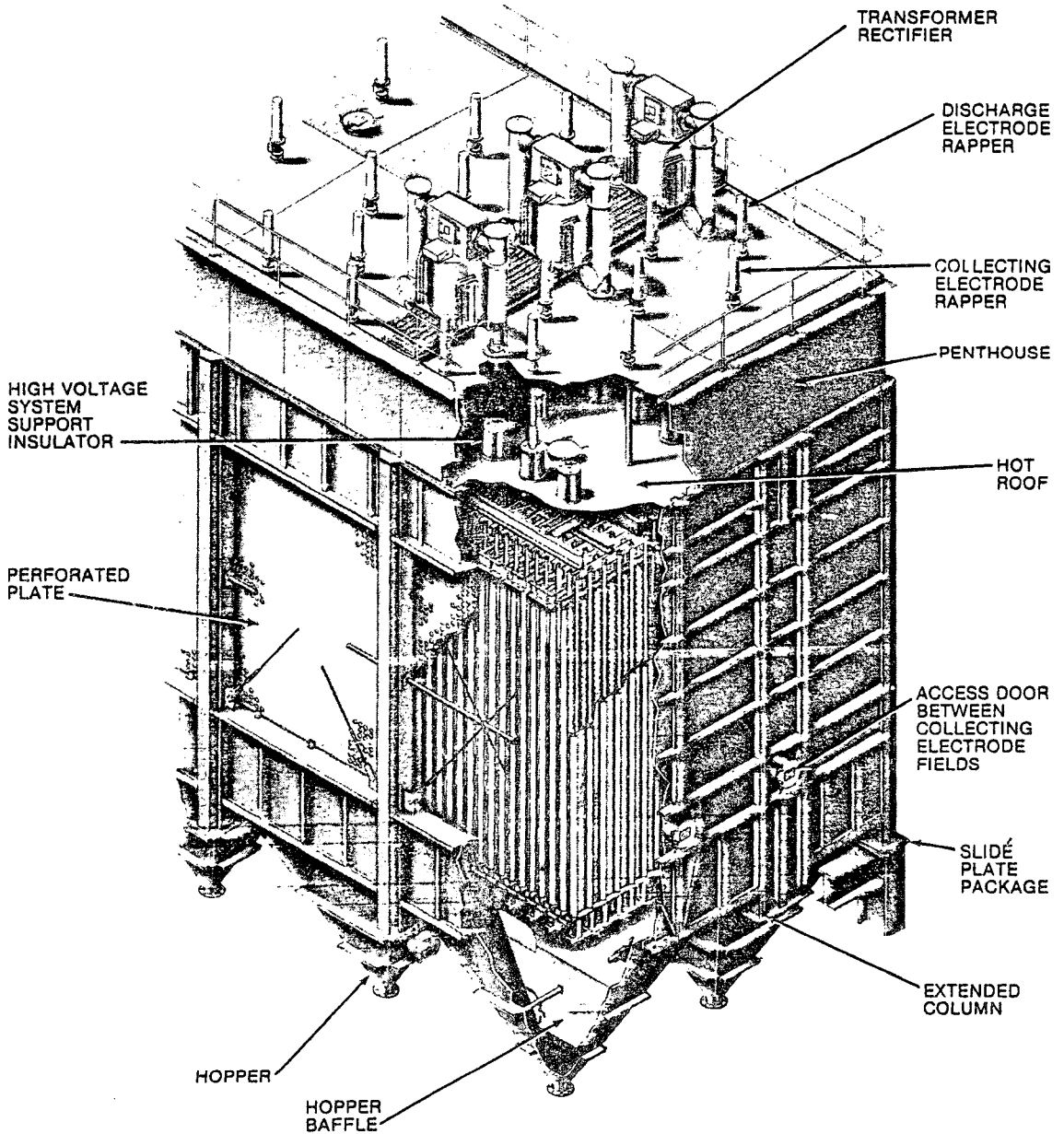


Fig 1. E·P의 원리

# Hi-R™ Electrostatic Precipitator (with Dura-Trode™ rigid discharge electrodes)



를 부여하여 帶電시키고 양극간에 형성된 電場 (Electric Field)에 의한 쿨롱의 힘 (Columb Force)이 입자에 작용하여 집진전극을 향하여 주행케 하여 이곳에 集積한다.

集塵極에 도달한 帶電된 입자는 이곳에서 放電하고 중화되어 정전력을 상실하고 집진극에 가해지는 탈진장치의 충격력 (Rapping Impact)에 의해 탈착 낙하하여 Hopper에 저장된후 반출된다.

입자의 이동속도 (Migration Velocity) W는 전기집진장치를 논하는데 중요한 Factor 이며 아래의 식 (1)과 같다.

$$W = K \frac{a E_0 E_P}{6 \pi \mu} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, W : 이동속도, m/sec

K : 定數

E<sub>0</sub> : 放電極 電界強度, Kv/m

E<sub>P</sub> : 集塵電界強度, Kv/m

a : 粒子徑, Micron

: 기체의 점성계수, kg·s/m<sup>2</sup>

E<sub>0</sub> x E<sub>P</sub>는 印加전압 E의 자승에 대체적으로 비례하므로 (Back Corona 현상이 발생하지 않은 정상 상태에 한함) W는 인가전압의 자승에 비례하고 입자의 크기에 비례하며, 기체의 점성계수에 반비례하는 사실에 주목하여야 한다. 기체점성계수는 입자의 기체로부터의 분리를 방해하는 요소로서 온도의 상승과 더불어 증가하므로 이동속도 W는 기체의 온도가 높아질수록 감소한다.

전기집진장치의 집진효율 (Collecting Efficiency)에 대한 최초의 기본적인 식은 Deutsch Anderson Equation으로 알려진 다음 (2)식이다.

$$Y = 1 - E^{-\frac{A}{V} W} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Y : 집진효율

A : 집진면적, m<sup>2</sup>

V : 처리가스량, m<sup>3</sup>/sec

W : 입자의 이동 속도, m/sec

앞에서 A/V는 단위풍량을 처리하는데 필요한 집진면적을 의미하며 비집진면적 (Specific Collecting Area : SCA)이라 칭하고, sec/m 또는 SF/KACFM의 단위를 실용하고, 있으며, 전기집진기의 크기 (Sizing)을 기본적으로 규정하는 중요한 수치이다.

이 식에서 주목하여야 할 것은 SCA와 Migration Velocity W가 집진효율에 대하여 대등한 위치에 있다는 사실이다.

식(1)에서 검토된 바와 같이 W는 E<sub>0</sub>, E<sub>P</sub>, a, μ와 같은 운전조건을 반영하는 요소들에 의하여 규정되고 있으며, 이들은 실지운전에 있어 간단 없이 변화하는 변수들이다.

예를 들어 설명하면 Particle Diameter a는 정수가 아니며 일반적으로 0.1에서 100 Micron까지 광범위하게 분포되어 있고 Case 마다 그 분포가 특이함으로 대표적 입자분포 (Particle Size Distribution)로서 취급되어야 한다.

W는 인가전압 E의 자승에 비례하므로 E를 최대치로 유지하는 것은 큰 W의 값을 획득하기 위하여 가장 중요한 요점이기도 한 E의 최대치는 실지운전에서 전기집진장치에 관한 모든 Factor가 종합된 결과로서 나타나는 값으로서 인위적으로 조정될 수 없다. 또한 W에 크게 영향을 미치는 Gas의 온도, 습도, 성분등도 실지적으로 상당한 폭을 가지고 변동한다.

이와같은 점을 감안할 때 전기집진장치의 효율은 확률적요소가 커서 경험공학적인 취급이 중요하다라는 점을 이해하게 된다.

1922년에 이론적으로 유도된 上述한 Deutsch Anderson Equation은 그후 실지응용에서 정확성이 欠如되어 있음이 판명되었고 1957년에 Particle Size Distribution이 ESP Efficiency에 미치는 영향을 고려한 Modified Deutsch Equation(3)이 C.Allander와 S.Matts

에 의해 작성되어 광범위하게 이용되기 시작했다.

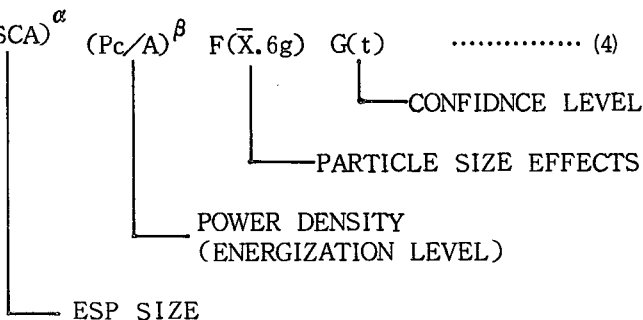
$$- \left\{ \frac{A}{V} W_R \right\}^K$$

$$E = 1 - e \dots\dots\dots(3)$$

Wk : Modified Deutsch Constant  
k : 0.5 - 0.6

$$E = 1 - e^{-k(SCA)^\alpha (Pc/A)^\beta F(\bar{X}, 6g) G(t) \dots\dots\dots(4)}$$

여기서 Pc : Power Input(watt)  
: Mean Particle Size  
: Geometric Median Size



#### 4. 粉塵의 固有電氣抵抗 (Resistivity)

전기집진장치에 있어 분진의 고유 전기저항은 집진효율과 E.P Sizing의 검토에 있어 대단히 중요한 항목이다. 荷電되어 집진극에 도달한 분진은 전극표면에 부착하여 얇은 층을 형성하고 이때 고유저항이 대체로  $5 \times 10^{10} \Omega - cm$ 이하의 분체에 있어서는 荷電된 Charge를 Dust 층을 통하여 순조롭게 방전하여 전기적으로 중화가되어 정전력을 상실한다는 설명은 이미 했었던 것과 같다.

Resistivity가  $5 \times 10^{10} \Omega - cm$ 의 범위를 벗어나 점차적으로 그 값이 증가할 때 極板에 있어서의 분진층의 방전은 이에 따라 더욱 곤란해지며 마침내  $1 \times 10^{13} \Omega - cm$ 를 초과하는 경우 전극은 마치 絶緣體로 둘러쌓인 것과 동일한 결과가 되어 電荷의 Discharge가 전혀 불가능한 상태에 이른다. 이에 이르면 +極인 집진극이 - Charge로 포위되어 공간에 형성된 靜電場의 전계강도가 현저히 약화되어 집진성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 심한 경우에는 누적된 -Charge에 의한 Dust 표면의 전계강도가 Corona를

P.C Boiler와 Cement Plant 등 많은 응용에 있어 k의 값을 0.5로 택할때 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있다.

근래에 이르러 Computer의 계산능력과 Data Bank를 이용한 통계학적 방법으로 더욱 정확한 효율책정이 가능하여 졌다.

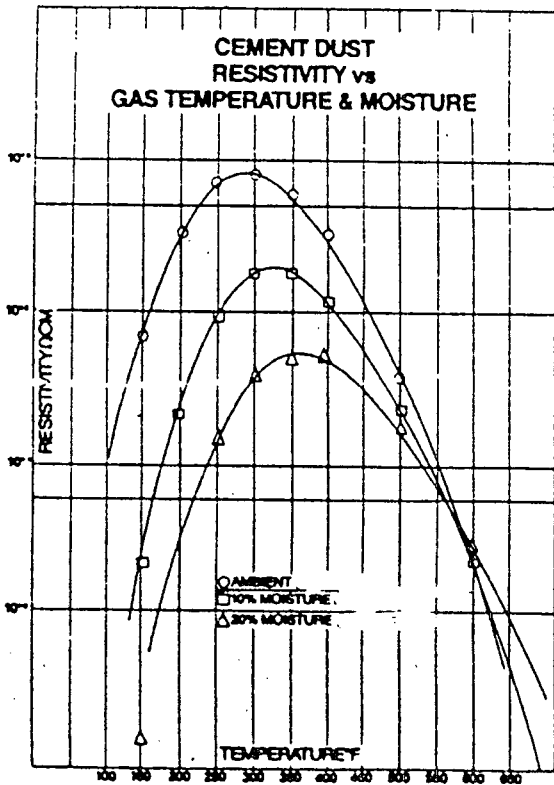
—예를 든다면,

발생하기에 충분한 값에 도달하여 소위 Back Corona 현상을 발생한다. 이리하여 전기집진의 기능을 완전히 상실하게 되는 것이다.

이와 같이 전기집진에 있어 중요한 요소인 Dust의 Resistivity는 Dust 자체의 화학성분 (Chemical Composition of Dust)과 Dust를 둘러싸고 있는 분위기인 기체의 온도, 습도,  $SO_3$ 와 같은 일부 Gas의 조성 등에 영향을 받는다. 일반적인 경우에 있어 Dust는 여러가지 화학성분으로 조성되고 있으며 그중  $SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO$ , 등은 전기의 흐름을 방해하는 요소들이며  $Na_2O, Li_2O, K_2O, Fe_2O_3$  및 C 등은 導電의 역할을 하는 요소들로서 양 요소의 혼합비율에 의하여 Resistivity를 산정하고 있다.

Dust의 Chemical Composition과 못지않게 Gas의 온도, 습도 및  $SO_3$  등의 Dust를 둘러싼 분위기가 Dust의 Resistivity에 미치는 영향은 광범위하다.

Cement Dust의 Resistivity와 Gas 온도 및 습도와의 관계를 Fig.2에 예시하였으며 석탄연소 Boiler의 Fly Ash Resistivity와 Gas 온도



- Fig 2. -

및  $SO_3$ 의 관계는 Fig.3에 표시하였다.

이 온도特性曲線에서 어떠한 일정온도에서 최고의 Resistivity를 나타내며 이 점을 분계점으로 하여 온도가 낮아지거나 높아질때 Resistivity는 감소하며 또 습도나 미량의  $SO_3$ 의 증가에 따라 Resistivity는 현저하게 저하되고 있음을 알 수 있다.

분계점의 좌측 저온 영역에서 Resistivity가 온도저하와 더불어 감소하는 원인은 표면누설전류(Surface Leakage Current)가 온도저하에 따른 Condensate의 증가로 인하여 더욱 용이하게 흐를 수 있기 때문이며 우측 고온영역에서는 온도의 상승에 따른 Dust분자의 운동 Energy의 증가가 體積導電(Volumatic Conduction)을 촉진하기 때문이다. 잘 알려진 고온전기집진기(Hot E.P)는 바로 이 고온영역에서의 낮은 Resistivity를 이용하여 저온측에

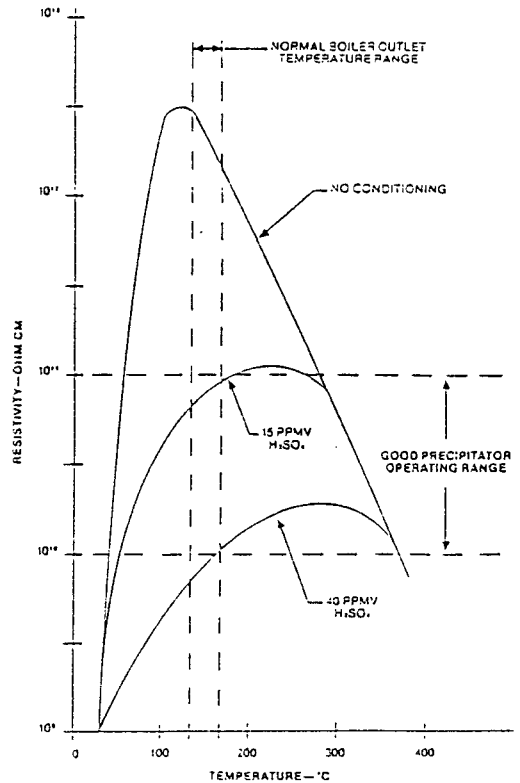


Fig 3. Coal Ash Resistivity V.S Gas Temperature &  $SO_3$

서 집진하기 곤란한 Dust를 집진하고자 하는 목적에서 설계된 것이다.

Fig.2에서 보는 바와 같이 Gas의 온도를 내리는 동시에 습도를 증가하였을때 Cement Dust의 Resistivity가 현저히 저하되어 집진 가능한 상태로 개선되었음을 알았다. 실지로 Cement Plant에 있어서 Evaporative Spray Cooler를 써서 이와같은 목적을 달성하고 있으며 調濕(Stabilization)이라 불리우며 자주 쓰이는 방법이다.

Fig.3에서 보는 바와 같이 발전소 P.C Boiler의 High Resistivity Fly Ash를 Gas의 온도를 변화시키지 않고 미량의  $SO_3$ 를 주입하므로 집진가능케 하는 방법을 Flue Gas Condition(FGC)라 칭하며 빈번히 이용하고 있는 수단이다.

## 5. 韓國에 있어서의 電氣集塵機

### 5.1 火力發電

韓國에 있어서 최초의 전기집진기는 1963년 11월 완성된 마산화력 제 1, 2호 (25MW×2) 국산무연탄 P.C Boiler 용 이었으며 미국 Research Cottrell 사 제품으로 집진기 본체뿐만 아니라 Support, Flue-Duct, Heat-Insulation Mt'1 까지 100%가 수입되었던 것이다.

국산탄에는 비교적 풍부한 Na (Sodium) 이 존재하고 저열량이어서 연소가 완전치 않아 잔류 Carbon 이 높았으므로 Resistivity 가 극단으로 높지 않아 비교적 양호한 성과를 거두며 발전소 폐지시까지 운전되었다.

마산화력 이후 한전의 모든 석탄연소 화력 발전소에 전기집진기가 설치되었으며 근래에 와서 발전 Unit 의 용량증가와 함께 500 MW급 Boiler 용 E.P가 국산화되기에 이르렀다.

특기할 사항은 그간 연료가 수입유연탄으로 교체되었으며 다양한 외국탄가운데 상당수의 석탄이 Ash Composition 에 Na (Sodium) 의 欠如와 다량의 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유로 극히 높은 저항치를 지녀 Cold EP 만으로서는 집진불능, 또는 극히 至難한 사태에 봉착하게 된다는 점이다. 다양한 외국탄에 대비하여서는 Cold EP 와 함께 반드시 Flue Gas Condition 이 兼備되어야 소기의 효율을 획득할 수 있으며 또 경제적이다.

근래에 와서 油燃機 Boiler 에 대한 배출농도 규제강화에 따라 Oil Fired Boiler 에도 전기 집진설비를 갖추게 되었다. Oil Fired Boiler 에서 배출되는 Oil Ash 는 Resistivity 가 극히 낮고 비중이 가벼우며 또 연료중의 S 가 연소하여 발생하는 SO<sub>3</sub> 가 Gas 의 Dew Point 를 현저하게 높인다.

이와같은 특성때문에 Oil Fired Boiler 용 EP 는 再飛散防止와 Acid Mist 를 고려한 설계이어야 하며 대형 Plant 에 있어서는 Ammonia Injection 으로 SO<sub>3</sub> 를 중화하여 Dew Point 를 낮추어야 한다.

최근에 여러 공단지구 또는 대형 Plant 에서 Fluidized Bed Boiler 가 설치되고 있으며 수 입탄을 사용하는 것으로 알려지고 있다. 전술한 바와 같이 외국탄 중에는 전기집진에 불리한 탄이 많아 집진기 설계에 있어 SCA 를 충분히 택할 필요가 있고 가능하다면 Resistivity 를 낮추는 방법이 강구되어야 할 것으로 사료되고 있다.

### 5.2 Cement 공업

우리나라의 Cement 공업은 타공업에 앞서 '70년대 초기부터 발전하기 시작하여 다수의 Cement Plant 가 외자도입으로 건설되었고 그 후도 꾸준히 Kiln 의 증설과 Unit 의 용량증가가 지속되어 왔다. Plant 도입과 함께 수입된 초기의 전기집진기는 거의 완제품으로 Kiln Preheater 와 Raw Mill 용 이었다. 전술한 바와 같이 Kiln Preheater Gas 는 Evaporative Spray Cooler 로서 調濕하였고 일부의 Kiln Gas 는 Raw Mill 에 Bypass 하여 Raw Mt'1 의 Drying 에 충당한후 Combine 하였으므로 습도 Min. 12% by Vol, 온도 105℃로서 비교적 집진이 용이하며 Kiln 단독 운전시에는 온도 150℃ 습도 17% by Vol 정도로서 별문제 없으나 Spray System 에 이상이 있어 온도가 180℃를 초과할 때 집진은 불량하다.

근래에 와서 Clinker Cooler 에 EP 를 사용하기 시작하였고 양호한 결과를 얻고 있다. Clinker Coller 의 Exhaust Gas 는 고온이면서 온도의 변동이 심하며 Moisture 가 전무하다는 점이 특성이다.

111 KVP 고온압을 적용한 Wide Spacing (400mm) EP 와 Gas Temp 가 300℃를 초과하지 않도록 Fresh Air 의 주입장치로서 모든 문제가 해결되었다.

### 5.3 제철소

제철소에 있어서 E.P의 적용은 다양하며 근래에 와서 고집진효율의 소요 (Requirement) 에 따라 종래의 Cyclone 이 E.P로 대체되고

Dew Point보다 충분히 높은 안전한 온도를 유지하여야 한다.

또한 Support Insulator의 Seal Air System에는 특별한 고려를 가하여 과다한 Fresh Air의 주입없이 碍子가 보호되어야 한다.

排Gas 중의 SOx를 촉매로서 SO<sub>3</sub>로 Convert하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Mist로서 황산을 회수하는 Mist E.P는 FRP 또는 Pb로 제작된 耐酸構造의 Pipe형 Vertical Flow E.P가 쓰이게 된다.

### 3) Pulpe 공장

Pulpe 공장의 Recovery Boiler에서 배출되는 Gas는 습도가 극히 높으며 Dust의 Density가 극히 얇은점이 특징이다. 따라서 Casing을 철제로 제작하는 경우 가열등 적극적인 방지대책을 필요로 하며 E.P내 유속을 충분히 얇게 유지하여 재비산을 방지하여야 한다.

## 6. 展 望

1963년 마산화력에 최초의 전기집진기가 수입되어 설치된 이래 24년이 경과하였다. 그간 우리나라는 눈부신 공업발전을 성취하여 도처에

각종 산업 Plant가 가동되어 환경보전의 문제는 높은 국민적 인식과 함께 중요한 국가적 시책으로 확립되었다.

대기공해방지 시설중 중요한 위치를 점유하고 있는 전기집진에 관한 기술도 그간 꾸준히 신장되어 대부분의 국내수요를 국산으로 공급하기에 이르렀으나 아직도 독자적 기술의 확립까지는 미흡하다고 할 수 있다.

전기집진에 관한 기술이 경험공학적 요소가 크다는 사실은 독자적 기술확립에 장시일의 경험의 축적과 자체의 실험을 통한 기술개발을 필요로 한다. 아울러 선진기술 정보에 민감하여야 하고 이의 수입에 과감하여야 함은 물론이다.

한국에 있어서 전기집진분야에 있어 당면한 신기술의 과제는 아래와 같다고 전망되고 있다.

1. E.P Sizing의 전산화
2. Flue Gas Conditioning
3. Micro Processor Type T/R Control
4. Wider Spacing E.P
5. Intermittent Energization System
6. Pulse Energization System
7. Energy Management System \*

## 그/립/으/로/보/는/환/경

