

새로운 집진기술 동향 New Directions of Particulate Control Technology

김 용 진 · 정 상 현
한국기계연구원 열유체시스템연구부

1. 서 론

산업발달에 따라 불가피하게 생성되며, 대기오염의 주종을 이루면서 인체에 가장 유해한 분진입자는 산업체의 오일(oil) 및 석탄연소 보일러, 자동차, 제철/제강 및 시멘트 플랜트 등으로 부터 배출되는 미세입자(fine particle)들이며, 앞으로 이들의 제어에 관한 연구가 지속적인 관심의 대상이 될 것이다. 한 예로, 석탄연소 화력발전소로부터 $1\mu\text{m}$ 이하의 입자들의 배출량은 무게비로는 1% 이하이지만 입자수의 비율에서는 99%를 차지하고 있다. 이들은 매우 높은 중금속 함유량을 지니고 있기 때문에 인체의 호흡시 심각한 문제를 유발시킬 뿐만 아니라, 이러한 미세입자들은 대기중에 부유하고 있다가 비(rain)에 의하여 세정되어 수질오염까지도 유발시킨다. 1992년 2월 공포된 대기환경보전법 시행규칙에 따라 분진배출 허용기준이 장기 입법예고 되므로써 1995년 1월과 1999년 1월의 2단계에 걸쳐 현재 적용 받고 있는 분진배출 규제치보다 훨씬 낮은 선진국 수준의 분진배출 규제가 요구되고 있으며, 분진이 배출되는 인근지역주민의 민원에 대처하기 위해서는 연돌로부터 분진배출이 눈에 감지되지 않을 정도까지 분진배출농도를 관리해야 할 필요성이 높아지고 있다. 이에 따라 집진장치의 효율도 증류전소 Boiler의 경우는 90% 이상, 석탄전소 Boiler의 경우는 99.5% 이상의 고효율이 요구되고 있다.

이와같이 미세 분진입자의 제어가 매우 중요하며, 이러한 분진배출의 방지시설로서 대표적인 것이 전기집진기와 여과집진기이다. 일반적으로 화력발전소 등에서 배출되는 대유량 가스의 처리에는 전기집진기가 널리 사용되며, 중소규모의 산업체에서 배출되는 가스의 처리에는 여과집진기가 주로 사용되고 있다. 본 글에서는 이러한 전기집진기와 여과집진의 고효율화에 대하여 연구사례와 함께 최근의 기술개발 및 연구동향을 기술한다.

2. 전기집진(Electrostatic Precipitation) 기술

전기집진장치는 가스중에 부유하는 분진입자를 코로나(corona)방전으로 하전하고 여기에 전계를 형성시켜 정전기력으로 포집제거하는 것으로 각 공업의 배출가스중에서 분진을 제거하는 장치로서 널리 사용되고 있다. 그러나 배출가스를 전기적으로 처리한다는 원리에 따라 그 성능특성은 포집하는 분진의 전기저항율에 크게 좌우된다. 특히 전기저항율이 높은 분진의 경우 "역전리(back corona)현상" 이라고 하는 이상현상이 발생하고 집진능력이 저하한다. 따라서 이러한 역전리 현상 대책에 대하여 전 세계적으로 많은 연구개발이 진행되고 일부는 실용화되고 있다.

전기집진기의 성능은 각 PLANT에서 사용하는 연료종류나 공정별로, 각각 다른 특성을 가지고 배출되는 가스와 분진의 성상에 따라 큰 차이를 보이며 특히 분진의 전기저항은 전기집진기의 성능에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 분진의 전기저항이 $10^4 \sim 10^{10} \Omega\text{-cm}$ 범위에서는 고효율의 집진성능을 쉽게 얻을 수 있으나, $2 \times 10^{10} \Omega\text{-cm}$ 를 전후해서 전기저항의 상승에 따라 집진효율이 급격히 저하되는 임계점을 갖는다. 전기저항이 이 임계점보다 더욱 상승되어 $2 \times 10^{10} \sim 10^{11} \Omega\text{-cm}$ 의 범위에서 운전되는 경우 집진기에서 Sparkover를 증가시키는 원인이 되어 운전전압을 낮게 설정할 수 밖에 없도록 되며, 이에따라 집진효율은 저하하게 된다. $10^{11} \Omega\text{-cm}$ 이상으로 전기저항이 높아지는 경우 이러한 현상은 더 심화되고 $10^{12} \Omega\text{-cm}$ 이상으로 상승함에 따라서 집진극에 부착된 분진층내에서 국부적인 절연파괴를 일으키고 분진층으로부터 양극의 이온(ion)이 발생되어 방전극쪽으로 이동되므로 음으로 대전된 분진입자를 전기적으로 중화시켜버리는 역전리를 유발시키게 된다. 이 경우 입자의 포집뿐만 아니라 대전효과도 크게 저하되어 결국 요구되는 고효율의 집진을 위해서는 필연적으로 집진기 용량의 증

가를 필요로 하게된다. 유연탄을 연료로 사용하는 BOILER의 배출가스나 CEMENT KILN, 제철소의 소결 공정 등에서 발생하는 배출가스중의 분진은 대부분의 경우 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 높은 전기저항을 가지며 통상의 전기집진기로는 용량을 크게 설계할 수 밖에 없으나, 많은 경우에 집진기 설치부지는 제한을 받으며 특히 기 설치되어 운전중인 전기집진기의 성능을 큰폭으로 개선시키고자 할때에는 설치가능한 부지여건 때문에 송풍기의 용량을 키우거나 추가로 설치해야 하며 이에 따라 PLANT 운전 PATTERN까지 바꾸어야 하는 문제에 부딪치며 막대한 투자비가 소요된다.

2. 1 역전리현상 및 대책

역전리 현상은 집진극 표면에 부착된 분진의 전기저항이 극도로 높은 경우에 분진층에 흐르는 전류에 의해 분진층내에 전위강하가 크게 발생하고 분진층내에 절연과피를 일으키는 현상을 말한다. 역전리의 개시조건으로서는 일반적으로 분진층의 절연과피 조건으로 볼 수 있으며 ρ_d 가 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 특수한 경우를 제외하고는 아래의 식으로 간단하게 주어진다.

$$i_d \times \rho_d \geq E_{ds}$$

여기서, i_d 는 분진층내의 전류밀도, ρ_d 는 분진의 전기저항율, 그리고 E_{ds} 는 분진층의 절연과피 전계강도이다. 그러나 E_{ds} 는 분진의 입경, 조성 등의 물질 및 분진층의 두께, 면적, 요철상황, 가스온도, 전계밀도 등에 의해서 대폭으로 달라진다. 역전리가 발생하면 집진극표면의 분진층의 절연과피점으로 부터 다량의 반대극성(+)의 이온이 방전극측(집진공간)으로 향해서 방출되기 때문에 집진공간에 있어서 대전분진 전기적 중화와 대전전압의 극단적인 저하 및 방전전류의 이상증가(반대극성 이온에 의해 대전입자의 전기적 중화에 의해 전류의 무효)의 상태로 되어 전기집진장치의 집진성능은 대폭으로 저하한

다.

전기집진장치에서 고저항 분진을 높은 효율로 포집하기 위해서는 역전리에 의한 장애를 방지할 필요가 있고 그 발생조건식을 만족하지 않도록하면 된다. 석탄전소보일러용 전기집진장치를 보면 그 분진의 전기저항율이 ASH 성상 및 배출가스온도에 크게 좌우되고 특히 저온영역(가스온도 $130 \sim 160^\circ\text{C}$)에 있어서는 포집분진의 전기저항율은 높아지게 된다. 석탄전소보일러용 전기집진장치에 있어서 최대의 과제는 역전리 현상의 극복이다. 역전리 대책으로서는 (1) 고온집진방식, (2) 가스성분 조정, (3) 수냉집진극, (4) 3전극직류하전방식, (5) pulse하전 방식, (6) 예비하전방식 등이 있는데, 역전리 발생조건식을 만족하지 않도록하기 위해 일반적으로 고려되고 있는 경우별 대응책을 표 1에 나타내었다.

2. 2 예비하전방식

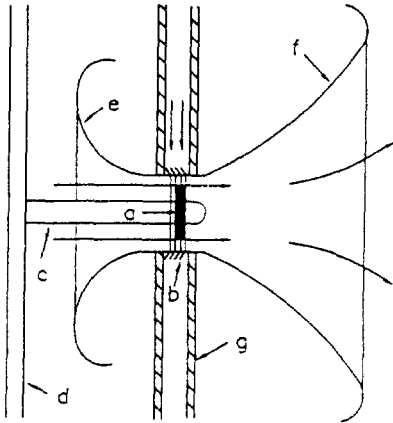
예비하전식 방식은 입자가 전기집진기 내부로 유입되기 직전의 위치에서 분진을 대전 시키는 방법이며, 이방법은 대규모 처리유량에 적합하며, 유지보수가 용이하고 경비절감 측면에서도 매우 유용하나 집진성능은 예비하전장치의 성능에 좌우된다. 예비하전장치는 낮은 전기비저항을 가지는 입자를 대전시키는 경우와 높은 전기비저항을 가지는 입자를 대전시키는 것으로 크게 2종류로 나눈다. 개발, 적용되어지고 있는 몇 종류의 분진 예비하전장치에 대하여 간단히 언급하면 다음과 같다.

(1) 강력 이온화 방식

그림 1은 강력이온화 장치를 나타내는 것으로, 이 장치의 구조적인 특징은 벤츄리(ventury)형상의 양극(anode)과 디스크(disk)형상의 음극(cathode)으로 이루어져 있으며, 대전영역에서의 가스속도는 매우 크게 되며 보통 가스속도는 약 30m/s 이상 유지되어야 대전

표 1. 건식전기집진장치에서의 역전리 대응책

역전리 발생조건식	요 인	역전리 발생방지조건	대 응 책
$\rho_d \times i_d > E_{ds}$	ρ_d	(1) 분진층의 제거, 두께축소	이동전극형 전기집진장치
		(2) 분진의 전기저항율을 낮춤 (i) 온도를 올림 (ii) 온도를 낮춤 (iii) 가스조절 (iv) 혼탄, 혼소	고온형 전기집진장치 수냉전극형 전기집진장치 조절계주입(SO ₂ , NH ₃ 등) 연료대용
	i_d	(3) 분진층을 흐르는 전류의 제어 (i) 하전제어 (ii) 대전부, 집진부의 분리	간헐하전(ms), PULSE하전(μs , ns) 예비하전방식(BOX CHARGER, 3전극형, PULSE 하전형)



- a : discharge electrode(disc)
- b : anode
- c, d : supporting rod
- e : inlet bellmouth
- f : outlet cone
- g : partition wall

그림 1. 강력 이온화 방식

효과가 만족스럽다고 알려져 있다. 이와같은 고속의 가스는 코로나 발생시의 스파크 전압을 높여, 양극과 음극 사이의 같은 거리에 대하여 일반하전장치에 비하여 훨씬 높은 공급전압을 작용할수 있고 따라서 평균전장, $E=10[\text{kv/cm}]$, 이상의 매우 높은 전장강도를 가지는 전계를 형성시킬수 있다. 이에따라 대전영역에서의 코로나 전류밀도는 일반 예비하전장치에서의 코로나 전류밀도값인 약 $0.2[\text{mA/m}^2]$ 에 비하여 약 $J=40[\text{mA/m}^2]$ 이상으로 높게 형성되며, 따라서 공간전하밀도를 매우 크게 증가시켜 결국 강력한 대전효과를 나타낼수 있다. 그러나 높은 전류밀도로 인하여 입자의 전기 비저항이 낮은 입자에 대하여도 역전리(back corona)현상이 발생하기 쉽다. 또한 대전영역에서의 매우 큰 가스속도 ($V=30\text{m/s}$)를 집진부 입구에서 약 1m/s 정도로 낮추어야 하므로 대전부와 집진부 사이에 약 2m 이상 길이의 연결부가 필요하게된다. 결국 이종류의 예비하전장치는 분진비저항이 보통영역이거나 낮은영역에서 효과적이며 또한 작은 가스유량을 취급할때 효과적이다.

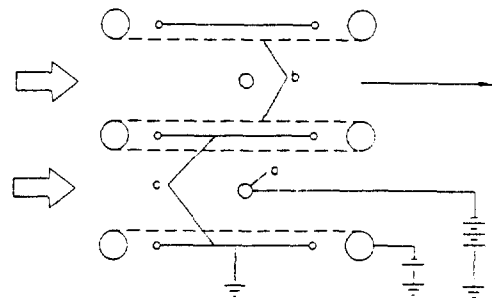
(2) 3전극(TRI-Electrode) 방식

그림 2는 3전극형 예비하전장치의 구조를 나타낸다. 이 장치의 구조적인 특징은 방전극과 집진극사이에 제 3의 전극역활을 하는 Grid 전극을 설치하여, 이 Grid

전극에 DC bias 전압을 작용시킨다는 점이다. 그리드 전극의 설치목적은 방전극주위의 대전영역으로부터 나온 음이온은 자유롭게 집진극으로 이동시키고, 역전리 영역으로부터 나온 양이온은 Grid 전극에 부착시켜 대전영역으로 도달하지 않게 하는것이다. 이것은 Grid전극의 공급전압의 크기가 음이온이 Grid에 부착되지 않을 정도로 충분히 클때 가능하지만, Grid와 집진극 사이에서의 전장강도가 스트리머 전파의 한계전장(5kv/cm in Air at NPT)을 넘어설 정도로 너무 커지면 역전리의 측면 전파가 일어날 수 있으므로 Grid 전극에 작용시키는 공급전압의 세심한 조절이 필요하다. 만일 역전리의 측면 전파 현상이 일어나게 되면 Grid와 집진극 사이의 공간은 스트리머(streamer)형 역전리에 의해 양이온으로 가득차게 되며 이럴경우 양이온들은 Grid를 통과하여 대전영역으로 들어오게 된다. 따라서 이종류의 예비하전장치는 방전극의 코로나 방전시에 Grid 자체에서의 역전리 현상도 일어나지 않고 역전리의 측면전파도 일어나지 않는 조건으로 조절하여야 한다는 단점도 있으나 적절한 설계와 운전조작으로 인하여 역전리 방지형 예비하전장치로 사용할 수 있다.

(3) 수냉전극(Water-Cooling) 방식

이 예비하전장치는 그림 3에서 보는 바와 같이 물냉각 파이프를 접지극으로 하여, 접지극에 분진이 축적될 때 파이프내를 순환하는 물에 의해 분진의 온도를 낮추어 분진의 전기비저항을 감소시켜 역전리현상을 피하는 방식이다. 이장치에 대한 실험의 결과, 석탄 비산재(fly ash)를 예비하전 시키는 경우 파이프 내부의 물의 온도는 40°C 이하로 유지시킬경우 역전리에 의해 변형된 전



- a : discharge electrode
- b : grid electrode
- c : collecting electrode

그림 2. 3전극 하전 방식

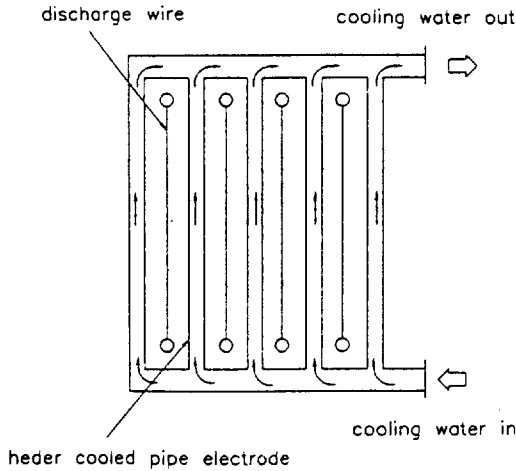


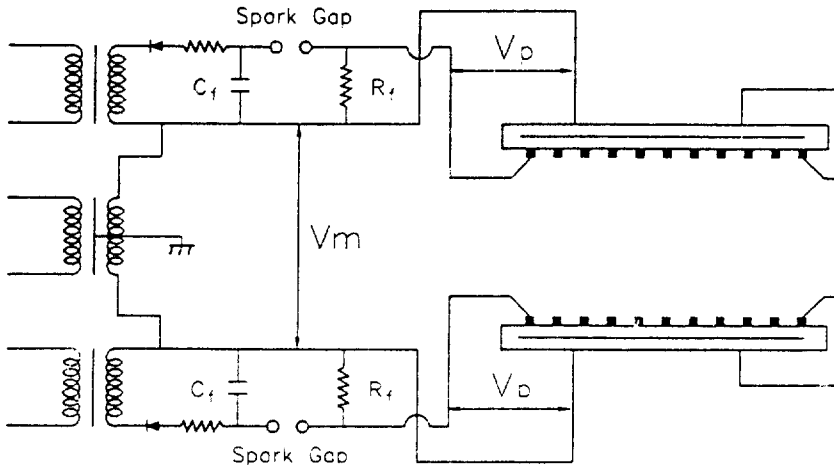
그림 3. 수냉 하전 방식

류-전압곡선이 정상상태로 수정되는 것으로 보고되었다. 이종류의 예비하전장치의 큰 이점은 구성과 작동이 간단하고 또한 기존의 집진부 사이의 제한된 공간에서 설치 가능한 작은 크기로도 제작가능 하다는 점이다. 그러나 이장치 역시 만족스러운 결과를 달성하기 위해서는 분진의 성질과 가스 조성에 대한 세심한 고려가 필요하며, 특히 가스속에 포함된 SO₃의 양과 파이프내부의 물온도

와는 매우 밀접한 관계를 가지며, 요구되는 물의 온도가 너무 낮을경우 열교환기 혹은 물냉각기의 용량이 커지게 된다.

(4) Box Charger

그림 4는 분진의 조성 및 비저항에 무관하게 역전리 없이 고효율의 대전효과를 기대할수있는 BOX Charger의 구조를 나타낸다. 다른 종류의 예비하전장치와 다른점은 대전영역에서 50~500Hz 정도의 저주파 교류전압과 100~500ns의 간격을 갖는 펄스전압을 이용한다는 것이다. 그림에서와 같이 서로 마주하는 두개의 방전극 유닛 사이에 정현파의 교류 주전압을 공급하고 이때 주전압이 음의 전압을 갖는 동안 5~20KHz의 고주파 교류전압이나 100~500ns의 간격을 갖는 펄스전압을 작용시켜 주전압과 동조시킨다. 이렇게 하면 이기간 동안 반대쪽의 방전극은 정지되어 코로나 전압이 걸리지 않으며, 그결과 방전극이 음극성을 가질때 방전극에서 Plane형 플라즈마가 생성되며 주전압에 의해 음이온들만 반대쪽의 방전극으로 밀려나간다. 마찬가지로 교류주전압의 다음 반사이클동안에는 반대쪽 방전극이 작동하고 발생된 음이온들은 반대쪽의 방전극으로 공급된다. 따라서 음이온들은 대전영역을 지나면서 양쪽의 방전극에 대해 상하로 이동하게 되며 이때 양쪽에서의 분진입



- V : A.C. Main Voltage Applied between Two Ionizer Units
- V : Pulse Voltage Applied between Corona and Inausion Electrodes
- C : Pulse Forming Capacitor
- R : Pulse Forming Resistor

그림 4. Box Charger 방식

자는 음이온으로 대전되게 된다. 방전극에 높은 비저항의 분진들로 덮혀있을때 음이온들로 대전된 분진층 표면에 음전하의 충분한 축적에 의해 역전리가 발생하게 되나, 이 장치의 경우 역전리가 일어나기전에 AC주전압의 극성이 바뀌게 되고 이때 전하의 축적도 정지된다. 이 장치는 매우높은 입자의 비저항에서도 역전리가 생기지 않으며, 또한 사용온도가 매우낮은 온도로 부터 350°C 이상의 고온까지 매우 광범위 하다는 장점을 가진다.

2. 3 이동전극형 전기집진기

일본 HITACHI PLANT 건설(주)에서 개발한 이동전극형 전기집진기(Moving Electrode type Electrostatic Precipitator, 이하 MEEP로 생략)는 종래의 전식전기집진기와는 달리 집진극을 회전시키면서 가스흐름이 없는 집진극의 하단부에서 BRUSH를 사용하여 집진극에 부착되는 분진을 100% 탈락시켜, 집진극을 항상 분진이 부착되지 않은 상태를 유지하기 때문에 분진의 고전기저항에서 야기되는 역전리 현상을 방지하고 적은 집진 용량으로 고효율의 집진이 가능한 전기집진기이다. 따라서 MEEP의 상대적인 효과는 분진의 전기저항이 높을수록 유리하며 고정전극을 사용하는 기존의 전기집진기보다 설치부지 면적을 50% 이하까지도 줄이는 것이 가능하다. 특히 기운전중인 전기집진기의 성능을 개선시키고자 할 때, 기존전기집진기에 직렬로 1 FIELD의 MEEP의 증설이나, 증설공간이 전혀없는 경우는 기존 전기집진기의 최종극을 MEEP로 교체설치하므로서 대폭적인 성능개선 효과를 얻고 있다. 일본에서는 1979년 이래 각종 PLANT에 27기의 MEEP를 납품하여 집진기내의 구동부에 대한 마모대책 등을 개선하였으며, 석탄전소 화력발전소로는 전세계에서 가장 큰 1000MW 규모의 SOMA 공동화력의 SINCHI 1호기 BOILER용으로 MEEP를 설치하여 현재 운전중에 있어 집진성능과 부품의 신뢰도를 입증하고 있다.

2. 4 펄스(PULSE)하전 및 조합형 전기집진기

이동전극형 전기집진장치가 입자경이 미세한 분진에 대해 보다 유효하다는 것과 입자가 크고 고농도의 분진 분위기에서는 내구성 저하하는 경향이 있는것 뿐만 아니라 경제성의 면에서 가스의 상류측에 종래의 고정전극형(추타방식), 하류측에 이동전극형을 조합하여 배치한 조합형 전기집진 장치가 사용되고 있다. 이러한 조합형 전기집진장치에 10¹³ Ω-cm영역의 고저항 분진의 포집도 가능하지만 고정전극부의 경제성 및 여기에 고저항 분진

영역에의 안정된 집진성능의 유지 향상을 피하기 위해 고정전극부에 펄스하전방식을 채용하는 방식의 개발이 진행되고 있다. 펄스 하전방식은 역전리 대책상 효과적인 수단이라는 것이 관명되어 있고 세계적으로 보급이되고 있는 신기술이다.

펄스하전방식은 종래의 직류하전방식에 비교하여, 먼저 수십 100μs 정도의 펄스 폭의 경우 직류하전시의 음극 코로나에 의한 방전극에서의 코로나 불꽃이 없고(극부적인 코로나의 강약이 없고) 방전극 전체로 부터 코로나가 발생하며 집진극에의 코로나 전류밀도가 거의 균일화 된다. 따라서 고저항분진의 경우 직류하전에서는 국소적인 코로나 전류의 집중에 의해 발생한 역전리 현상이 펄스 하전에서는 전류밀도의 저하에 의해 발생이 억제된다. 그리고, 직류하전에 비해 불꽃개시전압이 높아지기 때문에 분진에의 대전량을 증가시키고 집진성능이 향상된다. 또한 직류하전에서 역전리가 발생하면 방전전류의 조정은 곤란해지지만 펄스 하전의 경우 하전전압과 고치, 펄스 폭, 펄스 주파수를 변경시키는 것으로 용이하게 방전전류를 조절할 수 있다. 이상으로부터 가스상류측에 펄스 하전방식 고정전극형을 하류측에 이동전극형을 조합한 전기집진장치는 역전리 대책형 전기집진장치로서는 가장 효율적인 시스템으로 말할 수 있으나, 전원장치의 가격 상승에 따른 COST 문제, 고농도 미소입자의 하전약화에 의한 집진효율저하 등의 문제에 대해서는 계속적인 연구와 타당성 검토가 필요하다.

3. 여과(Fabric Filter) 집진기술

전기집진기는 연료의 성상과 분진의 전기저항 및 연소조건의 변화에 따라 집진성능의 변동이 심하게 되며, 특히 배출규제의 강화 및 유휴분이 많은 연료의 사용에서 저유황 연료사용으로 이행되는 과정에서 고저항 분진의 전기집진에 대한 역전리현상(back corona)이 문제가 되었다. 이와같은 전기집진기의 문제점에 비하여 분진의 전기적 특성에 의존하지 않고 안정되며 높은 집진효율이 얻어지는 여과집진의 집진특성에 착안하여 1973년 미국의 Pennsylvania Power & Light사의 Sunbury발전소의 175MW의 석탄보일러에 여과포 집진장치가 처음으로 설치되어 초기에는 많은 문제점에 직면하였지만 뛰어난 집진성능과 높은 신뢰성으로 종래의 전기집진장치에 충분히 대체할 수 있는 가능성이 인정되었다.

이러한 여과집진에서 가장 큰 문제는 압력손실과 여과포의 수명향상 등에 있는데, 여과집진의 성능을 증가시키기 위한 새로운 기술은 정전기력(Electrostatic For-

ce)을 이용하는 기술과 합진가스에 화학약품을 첨가시키는 방법 등이 최근에 활발히 논의되고 있다.

3. 1 정전기 이용기술

여과포 집진의 근본적인 문제점인 높은 압력손실과 매우 미세한 분진에 대한 집진성능 감소는 대형 공해방출 시설에 여과포 집진의 적용을 방해하는 요인이다. 이와 같은 여과집진의 근본적인 문제점을 해결하는 방안으로써 정전기력을 이용한 정전 여과포 집진장치의 개발에 대한 필요성이 대두되었으며 외국의 경우 많은 연구자들에 의해 기초 또는 응용연구가 활발히 행해지고 있다. 여과식 집진장치에 정전기력을 응용하는 방안에 대한 연구는 이미 약 50년전부터 시작되었으며, 초기의 연구에서는 정전기력에 의한 집진효율의 증가에 목적이 있었지만, 차츰 연구가 진행됨에 따라 정전 여과포의 경우 기존의 여과포 집진장치의 문제점인 압력손실의 증가문제를 해결할수 있다는 가능성이 밝혀졌다.

이로 인해 최근의 정전여과포 집진장치의 연구방향은 정전기력에 의해 입자 포집효과를 높이는것 이상으로 전기집진기의 경우와 비교하여 더커지는 여과집진의 압력손실을 저감 시키는것이 연구의 목표가 되고있는 경향이 다.

일반적으로 여과포집진시 압력손실이 일어나는 원인은 입자가 여체의 공극을 통과 하거나 여체의 틈에 붙어 탈진시 여체가 지지틀 방향으로 수축할 때 깨끗한 반대면 방향으로 빠져나와 탈진되지 않고 여포에 머물러 여체의 눈막힘 현상을 유발시키는데 기인한다. 이경우 여과포면에 강한 전기장을 형성시키면 정전기력에 의해 분진입자는 여과포 표면에 덴드라이트(dendrite)구조의 분진층을 형성시키고, 여체내로 미세입자의 침투를 방지하며 여포의 눈막힘 현상을 감소시킴과 동시에 집진효율을 향상시킨다. 분진을 예비하전 시키는 경우는, 여포는 하전된 입자의 정전기력에 의해 분극화 되고 하전된 입자와 분극화된 여포 사이에 작용하는 전기적 쿨롱력(Coulombic force)에 의해 유도되어 여과포 표면에 포집된다. 집진된 입자는 같은극성의 전하에 의한 쿨롱력으로 서로 반발하지만 입자에 적절한 질량과 기류의 관성력에 비해 쿨롱력이 훨씬 작으므로 입자는 여포면에 바늘상의 형태로 부착된다. 따라서 여과포의 표면은 불규칙하고 느슨하여 여과 표면적이 상대적으로 커져 마찰손실이 줄어들게 된다. 정전여과포 집진장치의 종류는 크게 1) 여과포의 전단에서 분진을 대전시켜 전하를 띤 분진을 여과포 내부로 유입시키는 예비하전(precharging)방식, 2) 여과포 지지틀에 고전압을 가함으로써 여

포의 표면에 전계를 형성시키는 방식인 유전식, 3) 여과포 중심에 방전극을 설치하여 집진과 대전을 동시에 수행하는 일단식 등으로 크게 분류한다.

(1) 예비하전식

전기집진기의 경우에서와 마찬가지로 여과포집진부 전단에 여러가지 방식으로 분진을 하전시키는 방식으로, 그림 5와 그림 6은 분진을 예비하전 시킨경우, 집진효율의 향상과 압력손실의 감소 결과를 보여주고 있다. 그림에서 여포를 탈진시키기 직전과 직후 두가지 경우에 대하여 모두 예비하전이 있는 경우의 압력강하가 낮게 나타나고 있다. 또한 상대압력손실은 여과속도에 크게 영향을 받지 않음을 나타낸다. 그림 5는 정전여과포 집진장치와 일반여과포 집진장치인 경우의 집진효율의 차이를 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 직경 $1\mu\text{m}$ 이하의 입자에 대하여 정전여과포 장치인 경우가 일반여과포 장치인 경우에 비하여 집진효율이 매우 높게 나타난다. 즉

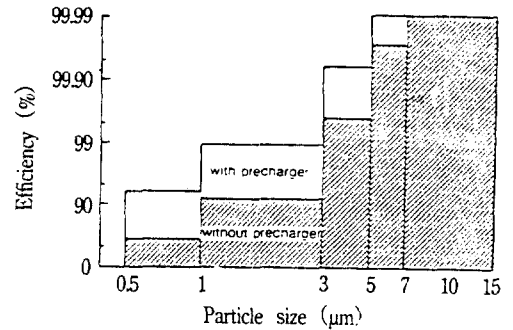


그림 5. 전기여과포의 집진효율 비교

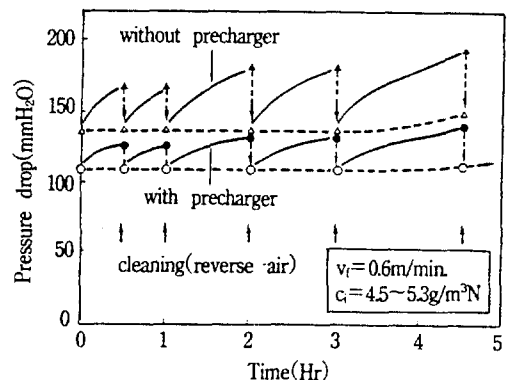


그림 6. 전기여과포의 압력손실 비교

일반여과포인 경우 직경 $1\mu\text{m}$ 이하의 입자는 관성과 차단효과 모두 작아서 집진효율면에서 불리하나, 정전여과포인 경우 정전기력의 작용에 의한 집진이 확연히 나타나고 있다. 그림 6은 정전여과포 장치와 일반여과포 장치인 경우에 대해 역기류 방법에 의해 탈진하였을 경우 탈진주기에 대한 압력손실의 증가를 나타낸다. 전체적으로 탈진시간에 관계없이 전기여과포 장치가 일반여과포 장치에 비하여 압력강하가 작다. 또한 탈진주기 60분 까지에 대하여 살펴보면 정전여과포인 경우는 탈진주기가 증가하여도 압력강하는 일정한데 비하여, 일반여과포 집진장치에서는 탈진주기가 증가할수록 압력강하도 증가함을 보인다. 결국 이상의 여러연구자의 연구결과에서 나타나듯이 정전여과포 집진장치인 경우 집진성능은 증가하고 압력강하는 감소하며 서브마이크론(submicron)크기의 입자인 경우 일반여과포 집진장치에 비하여 집진효율이 매우 증가한다.

(2) 유전식

여과포의 지지틀(retainer)에 고전압을 가하여 여과포 표면에 전계를 형성하는 방식이다. 그림 7은 유전식 여과포의 형상을 나타내며, 여과포를 서로 번갈아가며 전극을 배치하여, 여과포면에 평행한 방향으로 전기력선이 형성되는 구조를 가진다. 이 방식의 적절한 탈진방법

은 Reverse Air, 또는 Pulse Jet식이 유용하고 Reverse Air 탈진방식인 경우는 여과포 외부에 전극을 설치하고 Pulse-Jet 탈진방식에 대하여는 여과포 내부에

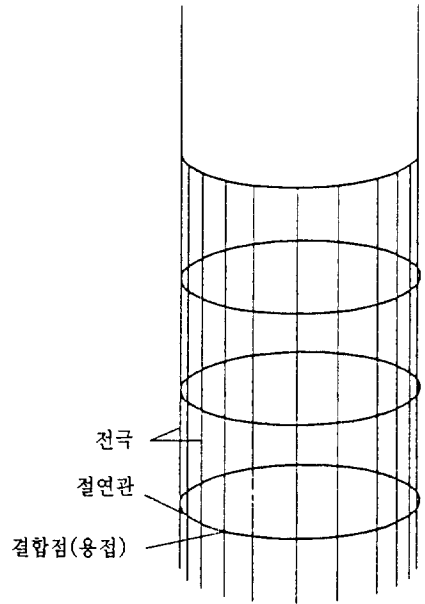


그림 7. 유전식 정전 여과포 구조

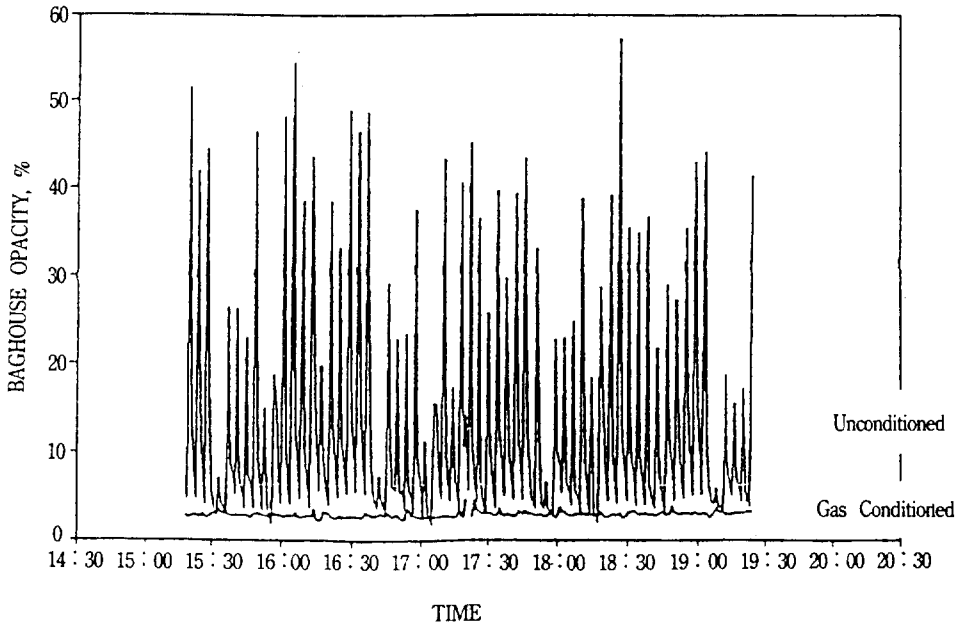


그림 8. 가스조절에 의한 opacity 효과 비교

전극을 설치하는것이 통례이다. 이 방식은 종래의 방식에 비해 여과속도를 1.5배 정도 증가시켜 연간 30%정도의 운전비용의 절감이 가능하다고 보고 하였다.

(3) 1단식

1단식 전기집진기의 경우와 마찬가지로 동일전계내에서 분진의 하전과 집진을 동시에 수행하는 구조의 정전 여과포 이다. 즉 여과포의 내부중심에 코로나 방전극을 설치하여 분진이 여과포 내부로 진입하였을때 코로나 방전극의 방전에 의해 분진을 대전시키므로, 대전된 분진은 여포에 집진되는 방식이다.

3. 2 가스조절(Gas Conditioning) 기술

여과포 가스흐름의 상류에 화학적인 약품을 첨가하면 입자사이의 결합력이 좋아지고 그결과 집진효율이 증가하고 압력강하도 감소하여 여과포 집진장치의 성능향상에 크게 기여할수 있으며, 이때 가스에 첨가하는 첨가제는 NH₃와 SO₃의 복합제가 가장 좋다고 보고되었다. 실스케일의 석탄연소 보일러용 여과포 집진기에서 15ppm의 SO₃와 30ppm의 NH₃를 첨가한 결과 여과포의 저항은 약 50% 감소하였으며, 여과포 하류부분에서 광원(light source)을 주사하였을 경우 투시광의 불투명도

(opacity)가 크게 낮아짐을 보였다. 불투명도가 낮아진 이유는 집진효율 증가로 여과포를 통과한 분진의 농도가 매우 낮아졌음을 의미하며 결국 집진효율이 매우 증가하였음을 알 수있다. 그림 8은 가스 Conditioning을 하였을 경우와 하지않은 경우에 대한 투시광의 불투명도를 나타내며, 그림 9는 Pilot Scale의 보일러에 첨가제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우에 대한 압력손실을 시간에 대하여 나타내었다. 여과포 집진장치의 성능개선을 위한 이방법은 매우 효과가 크나 첨가제로 인한 가스의 응축과 암모니아 슬립(slip) 문제 등 설계상의 문제로 인하여 아직은 상용화 되지않고 있다.

3. 3 새로운 탈진기술

일반적으로 여과포의 탈진기술의 개발은 기존의 기술을 수정, 보완 하여 점점 새로운 기술로 발전시켜 나가는 방법을 사용하며, 전형적인 탈진기술은 역세형(Collapse), 진동형(Shaker), Pulse-Jet 방식 등이 있으나, 대부분의 새로운 기술은 Pulse-Jet 방식의 수정에 의하여 개발되는 경향이다. 전형적인 Pulse-Jet 방식 탈진장치의 작동원리는 각각의 여과포의 뒷쪽에 놓인 노즐에서 간헐적으로 분출되는 압축공기에 의해 주위의 2차 공기를 휩쓸어 가게 되며 벤튜리튜브를 통해 여과포

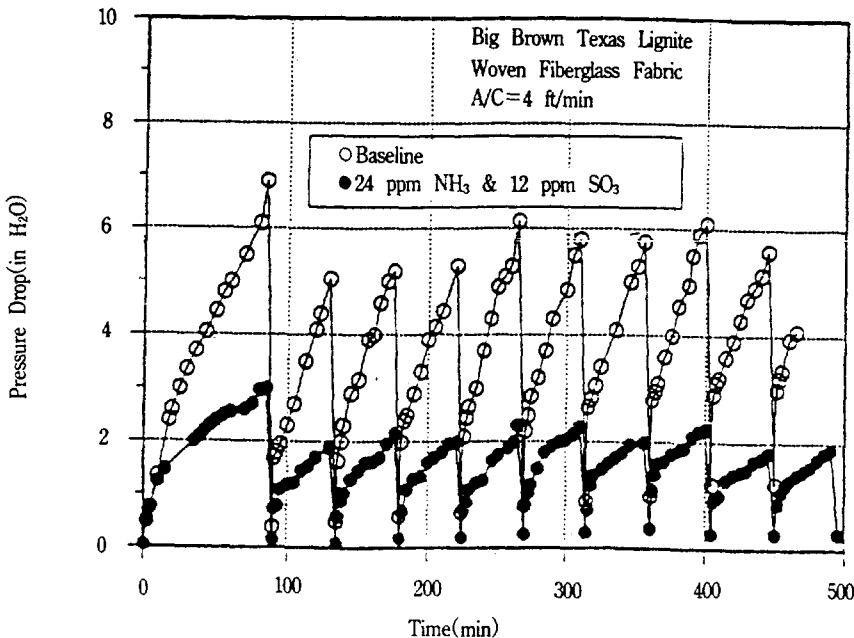


그림 9. 가스조절에 의한 압력손실 효과 비교

내부로 불어 넣음으로서 순식간에 탈진이 일어나는 원리이고, 분진의 농도가 높은 경우에 적합한 방법이다. 이 방식의 장점은 다실구조이며 탈진을 위해 운전정지실을 여분으로 둘 필요가 없으므로 풍량의 변동이 작고, 또한 털어내기효과가 강력하므로 원통상 부직포와 함께 쓰는 일이 많으며 여과속도를 2~6m/min 까지 증가시킬수 있어 여과면적을 감소시킬수 있다. 이 방식의 탈진기술은 현재 전 세계적으로 가장많이 사용하는 탈진기술이며, 대부분의 새로운 탈진기술은 이 방법에 기초를 둔 여러가지 변형기술이다.

또하나의 새로운 탈진기술은 140~150dB의 초음파를 사용하여 여과포에 공기의 진동을 주어 탈진시키는 기술이다. 이 방식은 역세형과 마찬가지로의 구조이며 여과실의 내부에 싸이렌등의 초음파 발생장치를 설치한 것이다. 정상적인 여과포 탈진기간중에 초음파를 발생시키면 여과포 탈진후 압력강하는 약 40~50% 이상 감소하게 된다. 이 방식은 저주파 영역에서 가장 성능이 좋으며, 정상적인 방법에 의해 여과포 탈진이 부적절한 곳의 높은 압력강하 문제를 개선하기위해 빈번히 사용하고 있다. 이 방법은 여포의 장기간 사용을 기대할수 있으나 청정가스의 출구쪽에 소음기를 설치하는 등의 방음대책을 필요로 한다.

3. 4 고온, 고압용 여과집진

석탄가스화 복합발전 시스템에 세라믹 필터를 이용한 여과집진장치의 적용은 복합발전시스템 자체의 특수성으로 인하여 세라믹 필터와 같은 새로운 방식의 집진장치가 필요하다. 석탄가스화의 가스중에는 약 3g/m³N의 입자상물질과 300~2000ppm의 H₂S가 포함되어 있어 입자상물질은 터어빈 부분을 마모시키고 H₂S는 부식의 원인이 되므로 이것들을 제거하는 집진 및 탈황기술이 필요하다. 그러나 석탄가스화 복합발전 시스템의 집진은 고온, 고압(500°C 이상, 20기압 이상), H₂S 등을 포함하는 부식성 가스, 입구의 입자상 물질의 높은 농도, 출구의 입자상물질의 농도허용조건, 입자상 물질의 낮은 전기저항(10³~10⁴ Ω cm) 등의 집진상 곤란한 특징을 갖는 대단히 특수한 조건하에서 이루어 진다. 이를위해 종래의 각분야에서 사용된 집진방식을 그대로 적용하기는 어려우므로 새로운 집진방식이 개발되어야하며, 이 조건에 적합한 것이 고온세라믹 필터를 이용한 여과집진 방식이다. 이 방식의 특성은 필터의 내열성, 기계적강도, 내부식성 및 집진효율면에서 대단히 성능이 좋으나 압력손실은 분진부하의 상승과 더불어 증가하기 때문에 이러한 점들은 해결되어야 할 과제들이나 실용화 가능성은 높다. 현재 세라믹 여과포의 대표적인 것은 미국 3M사에서 제작한 NEXTEL이 있으며 이것은 약 760°C

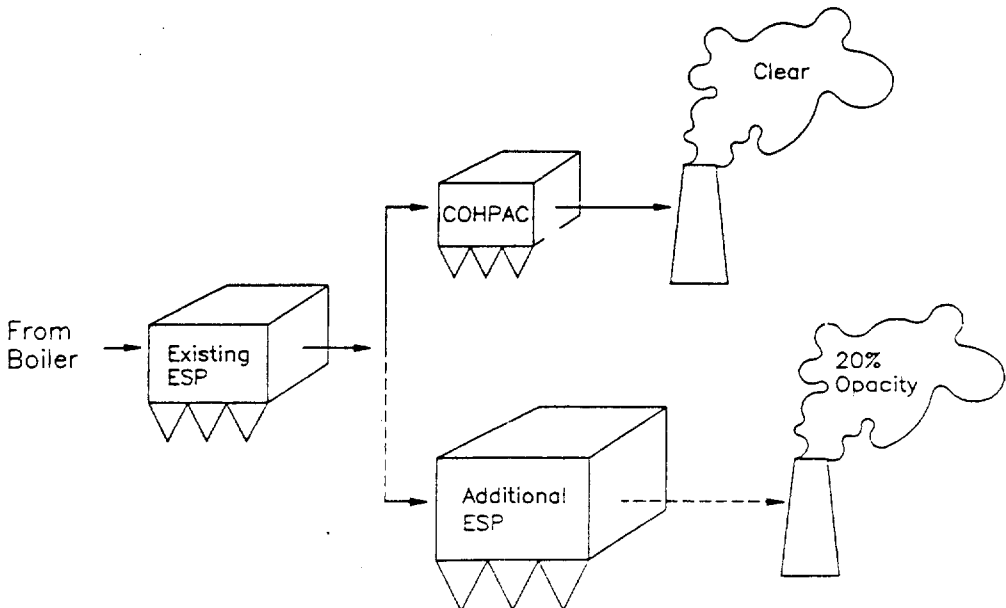


그림 10. COHPAC 개념도

정도의 고온에서도 고효율 집진이 가능한 것을 실증시험을 통하여 입증하였다.

3. 5 COHPAC

전기집진기의 낮은 성능문제를 보완하기 위한 또하나의 새로운 기술은 Compact Hybrid Particulate Collector(COHPAC)이다. 이것은 그림 10과 같이 전기집진기의 출구부에 여과포 집진장치를 설치하여 집진성능을 증가시키는 방식이며, 응용원리는 초기에 전기집진기에서 분진이 제거되고 전기집진기에서 집진되지 않은 분진들은 여과포 집진장치에 유입되어 집진되는 원리이며, 이때 여과포 집진장치에 유입되는 분진의 농도는 전기집진기를 통과한 분진이기 때문에 농도가 낮으며 정전기를 띄고 있으므로, 예비하전식의 정전여과포 집진장치의 효과도 동시에 기대할 수 있다. 따라서 같은 처리유량일 경우 COHPAC 방식의 여과집진기는 독립된 A/C 4fi/min인 경우의 여과포 장치에 비하여 압력손실의 증가나 분진의 방출없이 6~20fi/min 정도의 매우높은 여과속도로 운전할수 있어 크기가 매우 작게된다.

3. 6 집진, 탈황 및 탈질 동시처리 적용

근래에 들어서 배출규제대상 유해가스의 다양화, 배출규제의 강화로 각 규제대상 물질에 대하여 개별적으로 처리장치가 설치되어 있지만 하나의 처리장치에 많은 기능을 갖추도록 종합적인 배기가스를 처리할 수 있으면 보다 더 효과적이다.

이와 같은점에서 쓰레기 소각로에 사용하는 여과식 집진기는 종합적인 배기가스의 처리를 위하여 크게 유효한 장치라고 말할 수 있다. 즉 여과식 집진기가 오로지 집진기 기능만이 아니라, 기체와 고체를 아주 효율이 높게 접촉시킬수 있는 집진기구를 가지고 있기 때문에 기체와 고체의 반응기(reactor) 역할을 할수있다는 것이다. 즉 여과식 집진기는 가스를 분진층에 여과하여 제거시키는 시스템인데, 만일 이 분진층에 유해물질 흡수제거제를 혼합하여 배기가스와 접촉시켜주면 고체와 기체의 반응을 일으켜 유해물질의 흡수제거를 할수있기 때문이다. 이점에 착안하여 여과식 집진기를 적용하므로써 집진기 능만이 아니라 탈염, 탈황, 탈질 기능을 하나의 Process에서 행할수 있는 시스템을 설계할 수 있다. 이와같은

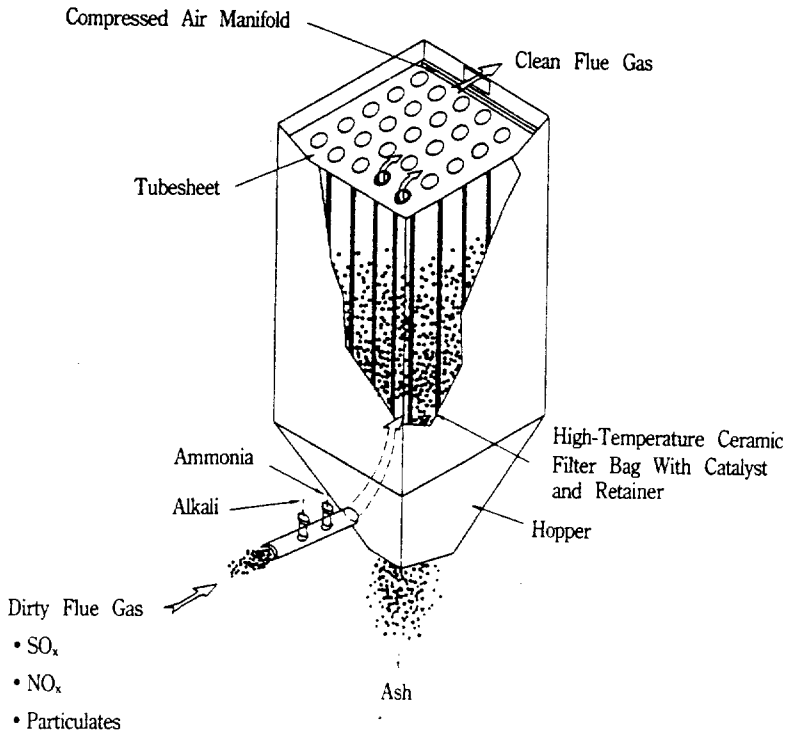


그림 11. SNRB 개략도

유리한 점 때문에 쓰레기 소각로 건설에 있어서 전기집진기보다 여과식 집진기의 채택이 검토되는 경우가 점점 증가하는 추세이다. 그림 11은 여과포 집진을 이용하여 탈황, 탈질 및 집진을 동시에 수행하는, B & W사의 특허인 SNRB(SO_x, NO_x, RO_x, BO_x)의 개략도를 나타낸다. 이 장치의 핵심부분은 동시처리를 발생시키는 고온 Pulse-Jet 여과포 집진장치이며 여과포는 3M의 NEXTEL을 사용한다. 480~590°C 정도의 여과포 상류에 소석회와 같은 건식용제와 암모니아를 상류에 분사하여, 황산염 생성물과 비산재는 여과포 집진기에서 집진되고 이후 370~455°C의 청정가스는 촉매제를 지나면서 암모니아에 의해 NO_x를 NO₂와 물로 분해한다. 이것은 촉매제의 SO₂ 독성을 감소시키고 비산재에 의한 촉매제의 부식과 침식을 방지한다. SNRB장치는 집진과 탈황, 탈질을 하나의 UNIT에서 동시에 할 수 있으며, 경제적이고, 작동이 간단하며, 유효공간을 줄여준다.

4. 결 론

집진장치는 환경 규제치의 강화에 따라 그 수요가 지속적으로 증가하면서 고집진 효율화가 요구되어지는데, 특히, 미세한 입자의 집진과 가스상 오염물의 동시제어 기능에 의한 원가 및 운전/유지비 절감 시스템에 관한 개발 연구가 향후 중요한 과제로 될 것이다. 전기집진기에서는 여러가지 본진에 대하여 집진효율의 예측기술과 고전지저항의 본진문제 등에 관하여 집중적인 연구가 수행되고 있으며, 결국, 운전 에너지 절감 및 집진효율 증대의 측면에서 전기집진기 개발의 추세는 일본과 유럽을 중심으로 하는 펄스하전공급방식, 광폭전극공간(wide plate spacing)방식, 이동집진전극방식에 관한 연구와 미국을 중심으로 하는 유입항 제어 기술, 전처리 하전 및 2 단하전 방식 등에 관한 연구가 매우 활발히 진행중이다. 그리고, 여과집진 기술은 정전여과포 장치 등의 여과포 성능향상 방안에 대한 연구, 고온, 고압 등의 극한조건에서의 집진, 초음파 등을 이용한 새로운 탈진기술의 개발 및 고효율 여포재질의 개발등 새로운 분야의 여과포 집진장치의 적용방안에 대해 활발히 연구되고 있다.

산업시설에서 배출되는 대기오염 물질들은 지구환경을 심각하게 파괴하였고 세계적인 차원의 지구환경 보호운

동이 활발히 전개되고 있으며, 또한 각국의 배출물 규제도 점점 강화되고 있는 현 시점에서, 집진기술의 넓은 활용범위와 신기술 개발가능 부분을 미루어볼 때, 전기집진과 여과집진기술은 집진기술의 가장 기본적인 기술인 만큼 향후 발전 또는 개발되어야 할 부분이 매우 많은 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Oglesby, S., Jr.,(1990) "Future Directions of Particulate Control Technology: A Perspective," J. Air Waste Manage. Assoc., Vol. 40, No. 8, 1183-1185.
2. D.H. Pontius, P.V. Bush: A New Precharger for Two Stage ESP of High Resistivity Dust, Proc. EPS-Symposium on Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, Vol. 1, pp 275-285(1978 in Denver, Colorado, USA :EPA-600/7-79-044a, february 1979)
3. G.P Grainer, D.A. Furlong, D.W. vanOsdell: Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration, JAPAC,1981, Vol. 31, No.10, pp 1125-1131
4. W. Humphries, C. Jones and G. Miles; Electrostatic Enhancement of a Filter Bag-House, Proc. 2nd. Int. Conf. on ESP (Nov. 1984, Kyoto, Japan) pp. 471-475
5. Wallace B. Smith, Joseph D. McCain et al.; Electrostatic Augmentation of Mechanical Collection, Proc. 2nd. Int. Conf. on ESP(Nov. 1984, Kyoto, Japan) pp. 444-452
6. Richard F henry, Walter F. Podolski and Satish C. Saxena; A Review of Electrostatically Augmented Gas Cleaning Device for Particulate Removal, IEEE Tras. on Industry Application, Vol. IA-21 No. 4 July/August 1983
7. E.R. Fredrick, Fibers, Electrostatics, and Filtration: A Review of the New Technology, JAPAC, 1980, Vol. 30, No.4, pp. 426-433