

# 신 여과집진(bag filter) 설비

기존의 여과집진장치(bag filter)의 성능 향상과 기능을 부여하기 위해 개발된 하이브리드형 신 여과집진 설비를 소개하고자 한다.

박영옥

한국에너지기술연구원 (yopark@kier.re.kr)

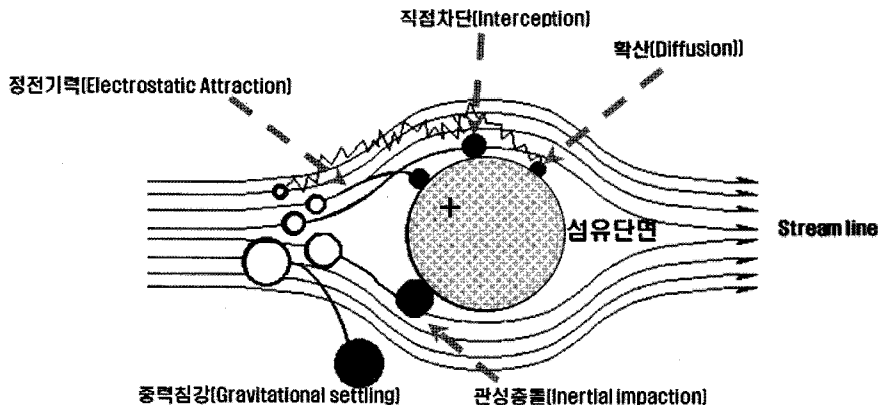
## 여과에 의한 집진원리

여과집진에 의한 집진원리는 집진필터의 재질과 직조구조에 크게 좌우되나 주로 사용되는 집진필터로는 직조방식에 따라 직포(woven fabric)와 부직포(nonwoven fabric)가 있으며, 집진필터에 의한 집진 조작에서 집진필터의 공극보다 작은 먼지입자들은 대개 집진필터의 공극을 구성하는 단일섬유와 집진필터의 표면과 먼지층에 의해서 포집된다. 집진필터의 공극을 구성하는 단일섬유에 의한 집진원리를 5가지로 분류하였으며, 이와 같은 집진 기구에 의해서 단일섬유의 집진효율이 결정된다. 그림 1에 집진필터의 공극을 구성하는 단일섬유에 의한 집진에

서 5가지 집진원리 즉, 중력침강, 관성충돌, 직접차단, 확산 및 정전기력에 의한 먼지포집을 나타냈다.

연소배가스내에 함유된 먼지입자의 크기와 밀도가 큰 입자는 기체의 흐름을 따라가지 못하고 먼지입자의 자체무게에 의해서 침강되어 집진되는 작용을 중력침강이라고 말한다. 집진필터를 구성하는 단일섬유 주위를 통과하는 배출기체내에 함유된 먼지입자의 크기가 상대적으로 커 충분한 관성력이 있어 섬유주위로 흐르는 기체의 흐름을 따라 진행하지 못하고 섬유표면에 충돌 부착되는 현상을 관성충돌이라 한다.

먼지입자크기가  $0.5 \mu\text{m}$  이하의 먼지입자는 기체의 흐름을 따라 운동하지 않고 자체적인 무작위운동으



[그림 1] 여과집진에 의한 집진원리



로 확산에 의해 운동된다. 이때 먼지입자는 배출기체의 흐름을 따라 이동하지 않고 브라운운동을 하게 되며, 이들 미세한 먼지입자들은 배출기체의 이동속도와 다른 속도로 움직이다가 결국은 집진필터의 공극을 구성하는 단일섬유에 접촉 포집되는 원리를 확산이라한다. 정전기력에 의한 집진원리는 먼지입자와 집진필터의 섬유 사이에 작용하는 정전기력에 의해 포집되는 현상을 말한다.

그림 2는 충격기류 탈진방식 여과집진장치를 나타냈다. 여과집진장치는 탈진방식에 따라 구조가 다르나 그림 2의 구조는 국내의 산업체에서 대부분이 사용되고 있는 형식인 충격기류 탈진방식(pulse jet cleaning)이다.

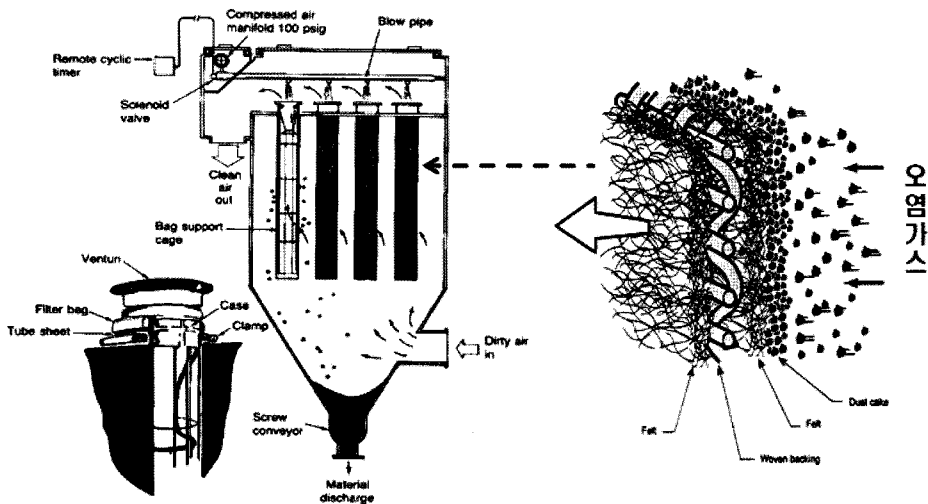
충격기류 탈진방식 여과집진장치는 집진필터, 집진필터의 형상유지용 bag support cage, 탈진공기 분사시 외부공기 유도용 venturi, 탈진공기 분사용 blow pipe, 집진장치 출구와 입구 및 본체, 탈진공기 분사 제어설비로 구성되어 있다. 오염가스에 함유된 먼지입자는 장치의 하부로 유입되어 집진필터 외부에서 집진되고 정제된 청정가스는 상부 유출구를 통해 외부로 배출된다. 집진필터 외부에 집진된 먼지층이 두꺼워지면 가스의 통과저항이 커 압력손실이 상승된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해 집진필터 상부의 블로우파이프에 부착된 노즐에서 고

압의 압축공기를 집진필터 내부로 분사하여 집진필터 외부에 집진된 먼지층을 털어 준다. 이와 같은 조작을 반복적으로 수행하여 일정한 압력손실을 유지한다. 집진필터의 종류는 그림 2에서 나타낸 것과 같이 부직포를 원형으로 형상으로 봉제하여 사용한다.

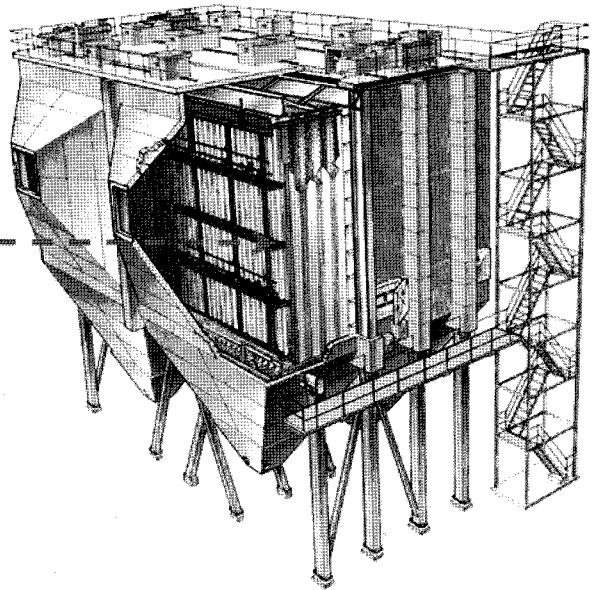
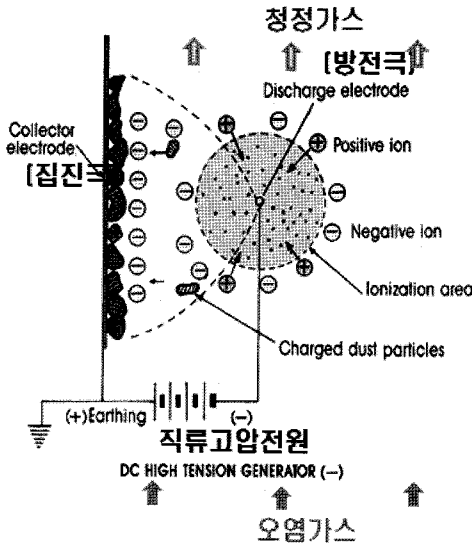
### 전기력에 의한 집진원리

전기집진에 의한 집진원리와 전기집진장치의 구조를 그림 3에 나타냈다. 평형한 평판형 집진극의 중심으로 침상의 방전극에 직류 고전압을 인가하면 방전극에서 발생하는 -코로나 방전에 의해 유입된 오염가스를 이온화 된다. +이온은 방전극에 의해 바로 중화되지만 -이온은 집진극을 향해 이동하면서 오염가스중에 함유된 먼지입자와 충돌한다. -이온으로 하전된 먼지입자는 양극 간에 형성된 전계에 의해 강한 쿨롱력의 작용을 받아서 집진 극으로 이동하여 집진된다.

일반적으로 산업용 전기집진장치는 1단형으로 -극이 방전극의 형상은 침상전극으로 되어 있고 +극은 평판형의 집진 극으로 구성되어 있다. 방전극을 -극으로 한 가장 큰 이유는 불꽃방전에 의해 단락이 억제되고 오염가스를 대상으로 하기 때문에 오존



[그림 2] 충격기류 탈진방식 여과집진장치



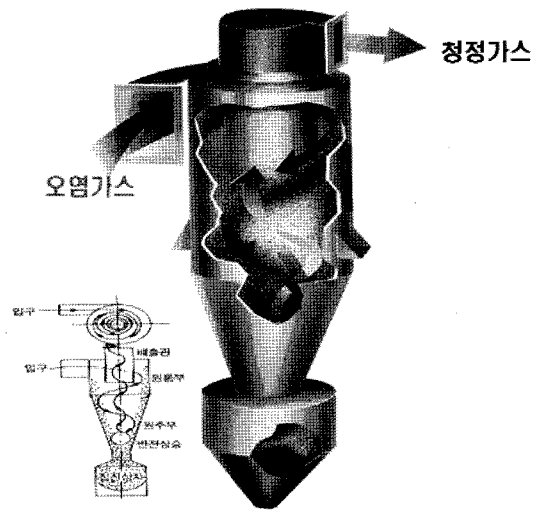
[그림 3] 전기집진에 의한 집진원리 및 전기집진장치 구조

의 발생이 크게 제약을 받지 않기 때문이고 동일한 조건에서 가능한 고전압을 인가하여 그 효율을 높일 수 있기 때문이다.

가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 평판형 전기 집진장치는 다단으로 분리되어 교대로 배치된 집진판과 방전극 사이를 오염가스를 통과시켜 오염가스 중에 함유된 먼지입자를 하전 시켜 집진판에 집진시킨다. 집진판에 부착된 먼지층은 햄머형의 추타장치의 연속적인 작동으로 털어지게 하여 하부의 호퍼에 저장되도록 구성되어 있다. 집진판의 간격은 통상 200 ~ 300 mm 정도로 설계하였으나, 설치비용과 유지보수비용을 절감하기 위해서 최근에 와서는 400 ~ 600 mm 정도 범위에서 설계하고 있다.

### 원심력에 의한 집진원리

원심력에 의한 집진원리와 싸이크론의 구조를 그림 4에 나타냈다. 원심력에 의한 집진원리는 오염가스를 유입과 동시에 선회류 형성에 의한 원심력으로 인해 오염가스중에 함유된 먼지입자가 싸이크론 벽면과 충돌하여 침강시켜 집진이 이루어진다. 싸이크론의 집진효율은 선회류의 접선속도를 좌우하는



[그림 4] 원심력에 의한 집진원리 및 싸이크론의 구조

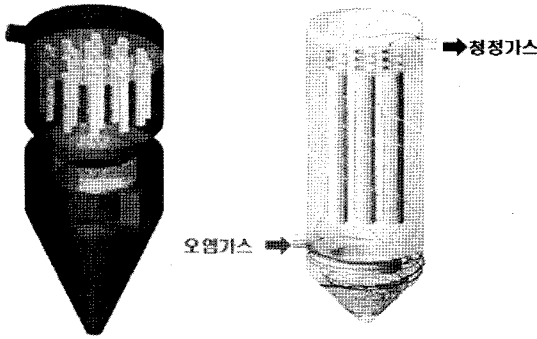
오염가스 유입속도, 싸이크론의 기하학적 구조, 먼지입자의 크기와 밀도에 의해서 결정된다. 일반적으로 싸이크론은 5 μm 이상의 먼지입자를 제거에는 효율적이거나 5 μm 이하의 입자크기에서는 집진효율이 낮아진다.



### 원심력집진 원리와 여과집진 원리가 조합된 cybag filter

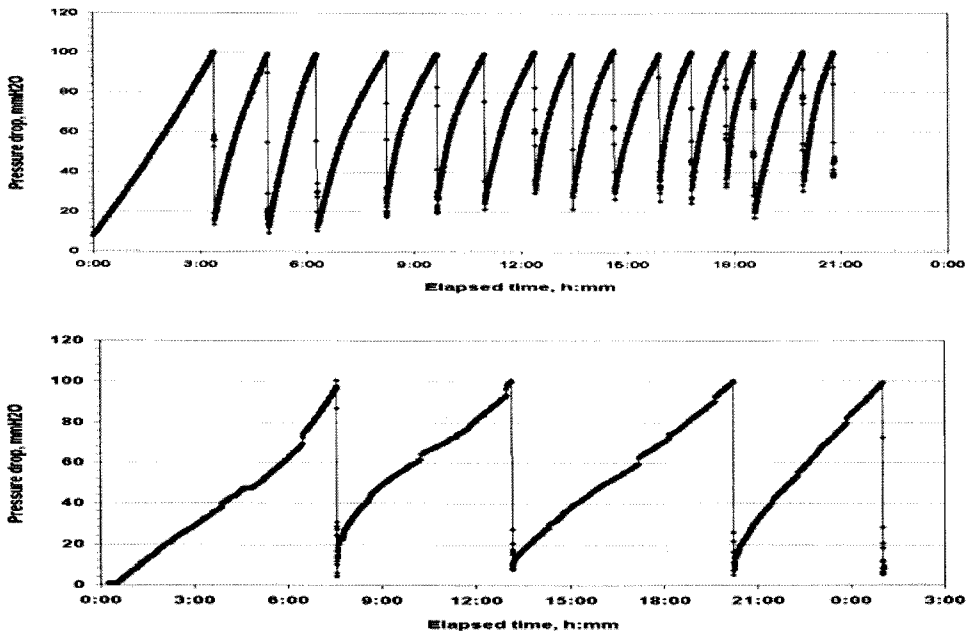
cybag filter는 하부는 이형 원심력집진장치, 상부는 충격기류 탈진방식 여과집진장치로 구성되어 있으며 그 구조를 그림 5에 나타냈다. 장치 하부의 유입구 부분은 오염가스가 유입과 동시에 선회류가 형성되는 구조로 설계되었으며 중앙에 내통(inner

tube)을 설치하여 1차로 먼지입자가 원심력에 의해 제거 된 후 미세먼지입자와 오염가스는 상부로 상승하는 구조로 되어 있다. 상승된 미세먼지입자는 집진필터에 의해 포집되고 청정가스만 장치 상부의 유출구를 통해 배출된다. cybag filter의 하부에서의 집진효율은 내통의 길이, 유입속도, 내통각도, 내통직경 등에 의해서 좌우되므로 최적조건을 도출하여 설계에 반영해야 한다.



[그림 5] 원심력집진 원리와 여과집진 원리가 조합된 cybag filter의 구조

그림 6은 기존의 여과집진장치와 cybag filter의 압력손실 변화경향을 비교하여 나타냈다. 일정한 운전조건에서 기존의 여과집진장치의 압력손실이 cybag filter의 압력손실 상승속도에 비해 3 ~ 4배 정도 빠르게 상승하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 기존의 여과집진장치는 오염가스 중에 함유된 먼지입자가 바로 집진필터로 이동하여 집진되므로 집진필터에 부여되는 먼지부하가 높아 가스의 통과 저항이 크기 때문이다. 그러나 cybag filter는 오염가스중에 함유된 먼지입자가 장치의 하부에 유입과 동시에 원심력에 의해 1차적으로 집진되고 여기서 집진되지 않은 미세먼지입자만 상부의 집진필터로 이동하기 때문에 집진필터에 부여되는 먼지부하가 낮



[그림 6] 기존 여과집진장치의 압력손실(상부 그림)과 cybag filter의 압력손실(하부 그림)의 변화 경향

아 가스의 통과저항이 낮아 압력손실의 상승속도도 느리다.

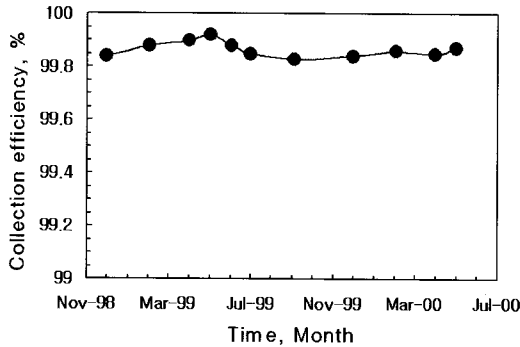
그림 7에 쌍용양회 영월공장에 18,000 m<sup>3</sup>/hr 용량의 cybag filter를 설치하여 21개월 동안 집진효율을 측정 한 결과를 나타냈다. 설치위치는 소성된 시멘트 클링커를 운반하면서 발생하는 비산먼지를 포집하는 공정에 설치하였다. 집진효율은 99.85 ~ 99.9% 정도의 미세한 차이의 범위에서 유지된 것으로 확인되었고 압력손실은 50 ~ 75 mmH<sub>2</sub>O 범위 정도에서 유지되었다. 산업체 현장에서의 cybag filter 운전조건은 여과속도가 1.3 m/min, 탈진공기 압력은 5.5 kg/cm<sup>2</sup>, solenoid valve 개폐시간은 60 m/sec 이었다. cybag filter의 출구먼지농도는 0.234 mg/Sm<sup>3</sup> 정

도로 유지되었고, 클링커 먼지입자크기가 0.835 ~ 0.898 μm의 범위에서 부분집진효율은 97%로 유지되었고, 입자크기가 0.65 μm 이하의 입자크기기와 1.2 μm 이상의 입자크기에서는 99.9% 이상 집진된 것으로 확인되었다.

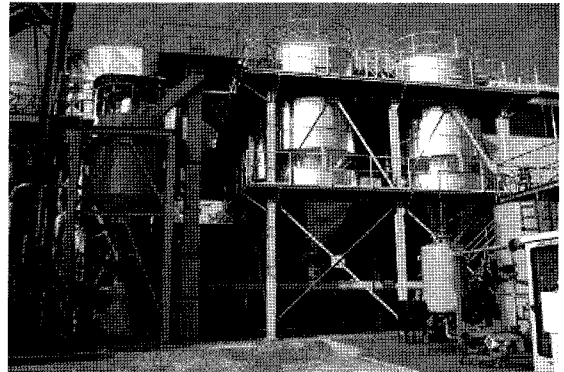
그림 8에 한국네슬레 청주공장에 설치된 cybag filter를 나타냈고, 커피박 소각시설(6 ton/hr)의 소각 배가스 정제공정용으로 설치하여 운전 중에 있다.

### 전기집진 원리와 여과집진 원리가 조합된 Hi-filter

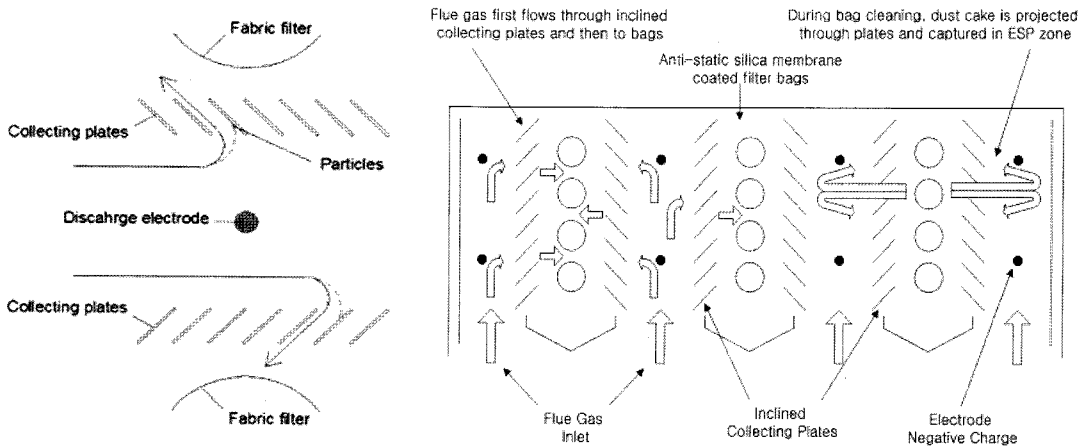
전기집진원리가 조합된 Hi-filter의 구조는 그림 9



[그림 7] 쌍용양회 영월공장에 설치된 cybag filter의 집진효율



[그림 8] 한국네슬레 청주공장에 설치된 cybag filter



[그림 9] 전기집진 원리와 여과집진 원리가 조합된 hi-filter의 원리(좌측)와 구조(우측)



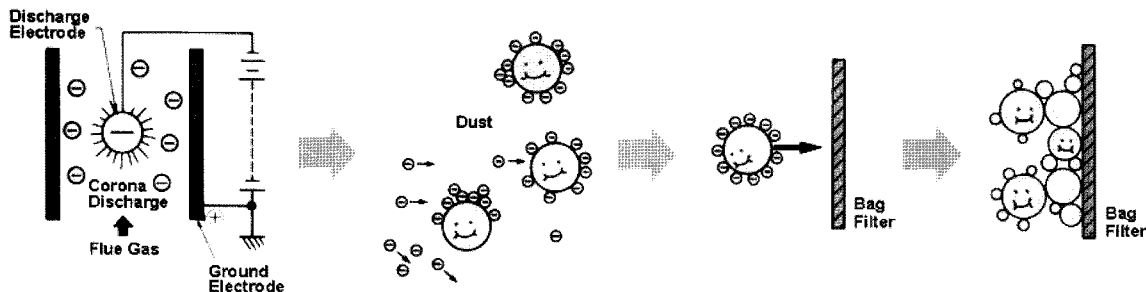
에 나타낸 바와 같이 전기집진부분인 방전극과 집진판, 여과집진부분인 집진필터를 최적구조로 결합한 구조로서 오염가스중에 함유된 먼지입자는 방전극으로 유입하면서 방전극에서 발생된 불꽃방전에 의해 -이온으로 하전 되어 +극의 집진극에서 거의 집진되고 여기서 집진되지 않는 미세먼지입자는 집진필터에서 최종적으로 집진하는 원리로 구성되어 있다. Hi-filter의 구조적인 특징은 집진필터에 포집된 먼지입자층은 탈진조작에 의해 유리되며 유리된 먼지입자층은 대부분이 집진극으로 이동되어 거의 다시 집진되어 탈진조작에 의한 재비산이 일어나지 않는 점이다. 또한 집진판에서 장치로 유입된 먼지입자를 거의 포집 제거하기 때문에 집진필터로 유입되는 먼지량이 극히 낮아 집진필터의 효율향상과 수명증대에 크게 기여하는 또 다른 특징이 있다. 집진판을 경사형태로 배치하고 있어 방전극에서 발생된 불꽃방전이 집진필터로 이동을 원천적으로 차단하

므로서 불꽃방전에 의한 집진필터 표면의 pinhole 발생을 원천적으로 방지하는 기능을 한다.

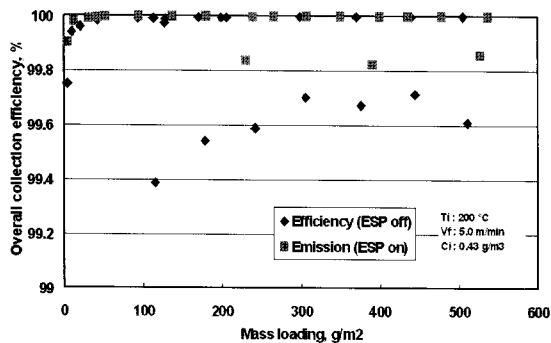
그림 10에 전기집진부분으로 유입된 먼지입자가 방전극에서 -이온으로 하전 되고 집진판에서 집진되지 않는 미세먼지입자는 집진필터 표면으로 이동하여 집진필터 표면에서 집진되어 먼지입자층을 형성하게 되는 과정을 나타냈다.

집진필터 표면의 먼지입자층은 하전효과로 인해서 서로 응집되어 먼지입자층의 공극률이 커져 여기를 통과하는 가스의 통과저항이 낮아 압력손실이 낮고 탈진조작에서 유리효과도 커진다. 미세먼지입자는 서로 응집되기 때문에 집진효율이 최대로 증대되는 효과를 얻을 수 있다.

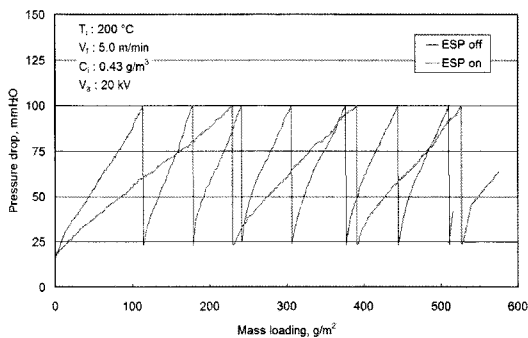
Hi-filter에서 전기집진부분을 가동한 조건과 가동하지 않은 조건에서의 총괄집진효율 변화경향을 그림 11에 나타냈다. 운전결과에 의하면 전기집진부분을 가동하지 않고 집진필터에 의해서만 먼지입자



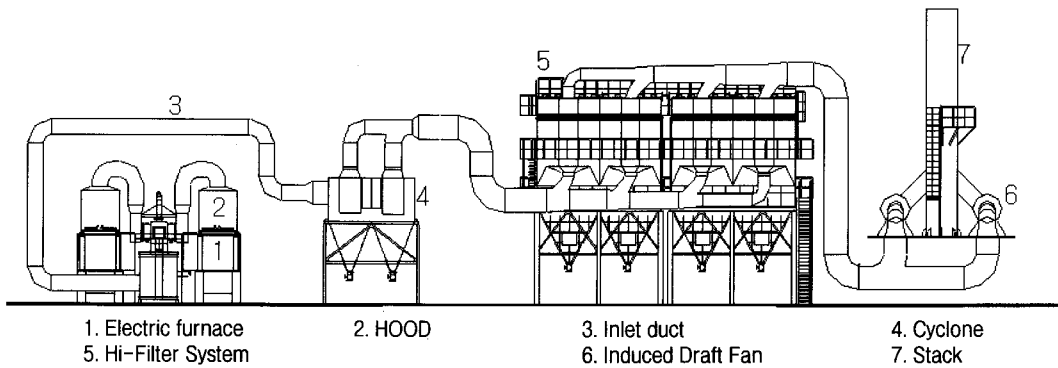
[그림 10] Hi-Filter에서 입자상물질의 하전 및 집진필터 표면에서의 응집원리



[그림 11] Hi-Filter에서 전기집진부분을 가동한 조건과 가동하지 않은 조건에서 총괄집진효율 변화경향



[그림 12] Hi-Filter에서 전기집진부분을 가동한 조건과 가동하지 않은 조건에서의 압력손실 변화경향

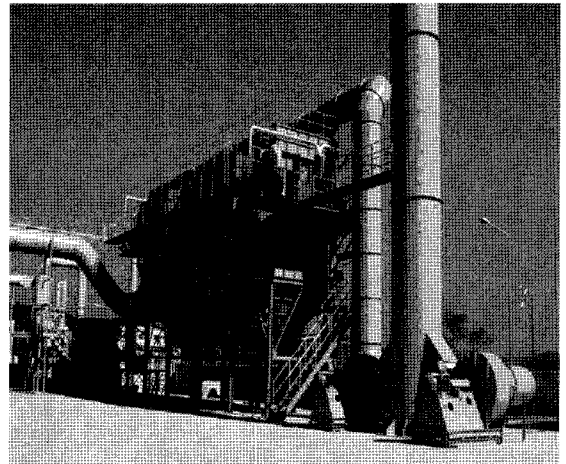


[그림 13] 상용화 규모의 Hi-filter system(1,200 CMM)의 구성 및 공정 흐름도

집진에서 총괄집진효율은 약 99.5% 정도 유지했으나 전기집진부분을 가동한 조건에서는 총괄집진효율이 거의 100%에 근접한 고효율 유지가 가능한 것으로 확인되었다.

전기집진부분을 가동하지 않고 집진필터에 의해서만 먼지입자를 집진하는 조건에서 압력손실 변화경향과 전기집진부분을 가동하여 20 kV의 고전압으로 먼지입자를 하전한 조건에서 압력손실 변화경향을 그림 12에 나타냈다. 운전결과에 의하면 전기집진부분을 가동하지 않은 조건에서의 압력손실 증가속도는 전기집진부분을 가동한 조건에서의 압력손실 증가속도에 비해 약 2.5배 정도 빠르게 증가하였다. 이와 같은 현상은 먼지입자에 고전압을 인가하지 않는 조건에서는 집진필터 표면에서 먼지층이 조밀하게 형성하기 때문에 가스의 저항이 증가되어 나타난 현상이다. 따라서 Hi-filter system은 기존 여과집진장치에 비해 압력손실 증가 속도가 약 2.5배 이상 낮아 탈진간격은 2.5배 이상 증가한다. 이러한 결과는 Hi-filter system은 기존 여과집진장치에 비해 집진필터의 수명을 2.5배 이상 연장이 가능하다는 것을 증명해 주고 있다.

그림 13에 1,200 m<sup>3</sup>/min 규모의 Hi-filter system의 공정도와 그림 14 전체사진을 나타냈다. 전기로에 발생된 먼지입자를 함유한 오염가스는 일차적으로 싸이크론을 통과하면서 큰 입자들은 집진 제거된 후 미세먼지입자만 유입배관을 통해 Hi-filter system으로 유입된다. 유입된 미세먼지입자는 방전극에서 불꽃방전에 의해 먼지입자들은 -전하로 이온화되



[그림 14] Hi-Filter System의 전체사진

어 +극인 집진판으로 이동, 여기서 대부분이 집진되며, 집진되지 않은 미세먼지입자는 집진필터로 이동하여 집진필터 표면에서 부착 집진된다. 시간이 경과함에 따라 집진필터의 표면에 부착된 먼지입자들이 먼지층을 형성하게 되어 가스의 통과저항이 커진다. 이로 인해 압력손실이 증가하면 집진필터 표면에 형성된 먼지층을 털어내기 위해 집진필터 상부에서 고압의 압축공기를 순간적으로 분사한다. 압축공기의 분사로 인해 집진필터 표면으로부터 유리된 먼지입자들은 집진필터의 근접한 집진판에 거의 포집된다. 이로 인해 유리된 먼지입자들의 재비산은 원천적으로 방지된다. 방전극과 집진판에 포집된 먼

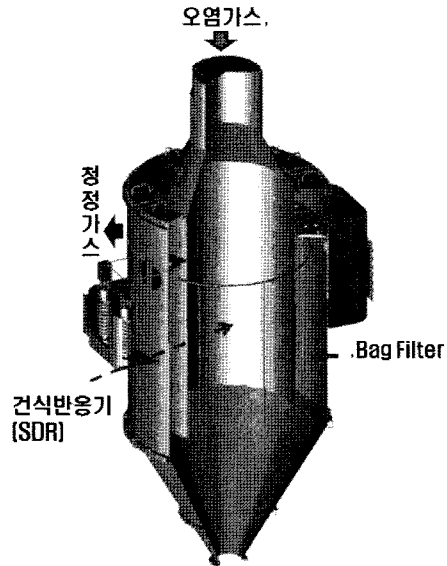


지층은 주기적으로 회전하는 hammer로 추타하므로서 완전히 털어내어진다. 털어내어진 먼지입자들은 본체의 하부의 hopper에 저장되어 screw convert에 의해 외부로 배출되어 진다. 집진필터를 통과한 청정가스는 유도 흡인팬에 의해 흡인되어 대기 중으로 배출된다.

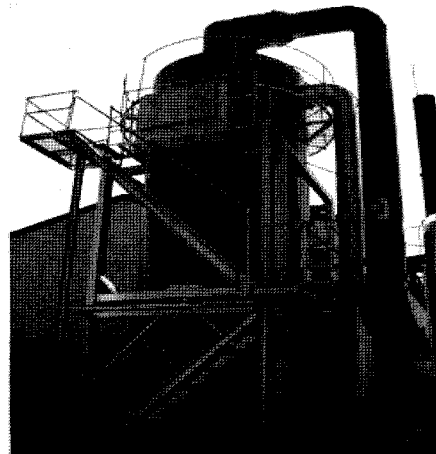
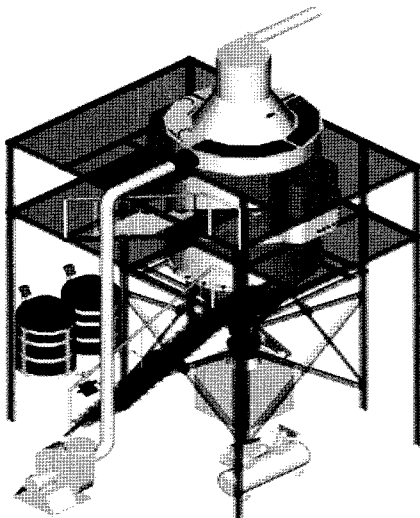
### 반건식탈황 원리와 여과집진 원리가 조합된 SDBAG

반건식 탈황기능과 여과집진기능이 동시에 발휘되는 SDBAG의 구조를 그림 15에 나타냈다. 장치의 중앙에는 반건식 탈황장치가 위치하고 있고 반건식 탈황장치의 주변에 집진필터가 설치되어 있다. SO<sub>2</sub>와 HCl 등 산성가스와 먼지입자가 함유한 오염가스는 장치의 상부 중앙에서 유입하여 반건식 탈황장치를 통한 후 반건식 탈황장치 하부에서 외부 주위의 집진필터 상부로 이동한다. 반건식 탈황장치에서 산성가스는 장치의 상부에서 분사된 Ca(OH)<sub>2</sub> 현탁액이 오염가스와 접촉하여 산성가스를 흡수 제거한다. 이미 반응된 흡수제와 미반응 흡수제는 가스와 함께 장치 외부의 bag filter로 유입된다. Bag filter로 유입된 먼지입자와 반응 흡수제 및 미반응 흡수제는 집진필터 포집제거 되고 청정가스만 외부

로 배출된다. 집진필터 표면에서 포집된 미반응 흡수제는 흡수제 층을 형성하게 되며 여기서 2차로 산성가스가 흡수 제거되는 특징이 있다. 그림 16에 중유연소보일러 배출가스를 정제하기 위해 산업체 현장에 설치되어 운전되고 있는 SDBAG의 설비구

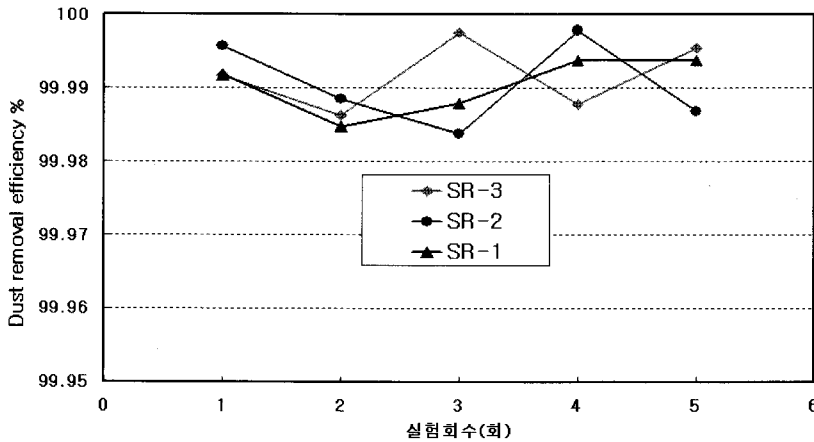


[그림 15] 반건식탈황 원리와 여과집진 원리가 조합된 SDBAG의 구조

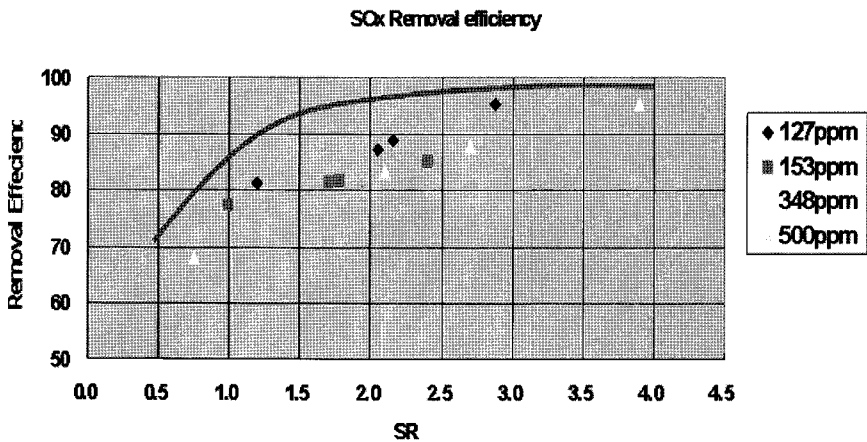


[그림 16] 산업체 현장에 설치된 SDBAG의 설비구조와 설비 사진





[그림 17] Ca/S 몰비(SR) 변화에 따른 SDBAG의 집진효율



[그림 18] Ca/S 몰비(SR) 변화에 따른 SDBAG의 탈황효율

조와 설비의 사진을 나타냈다. 배가스의 조건은 온도가 150~200℃, 황산화물(SOx)의 농도범위는 50 ~ 500 ppm, 질소산화물(NOx)의 농도범위는 20 ~ 300 ppm, 먼지입자의 농도범위는 20 ~ 150 mg/Sm<sup>3</sup>이다.

그림 17에 Ca/S 몰비(SR) 변화에 따른 SDBAG의 집진효율 변화경향을 실험횟수에 따라 나타냈다. 실험결과에 의하면 SR이 변화에 관계없이 집진효율은 99.99% 정도를 평균값으로 유지하는 것으로 확인할 수 있다.

그림 18에는 Ca/S 몰비(SR)의 증가에 따른 SDBAG의

탈황효율을 유입되는 황산화물의 농도변화에 따라 나타냈다. 설비의 운전결과를 보면 Ca/S 몰비가 증가하면 탈황율은 증가하는 경향을 보이고 있으나, Ca/S 몰비가 2.0 이상에서 부터는 탈황율 증가 경향이 크게 변화하지 않았다. 이와 같은 현상은 SDBAG에서는 흡수제인 슬러리의 주입량을 계속 증가시킨다고 하여도 탈황율은 어느 한계점을 초과하면 증가하지 않는 특성이 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 SDBAG에서는 Ca/S 몰비를 1.5 정도만 유지하여도 탈황율은 94% 이상 유지가 가능한 것으로 나타났다. ㉔