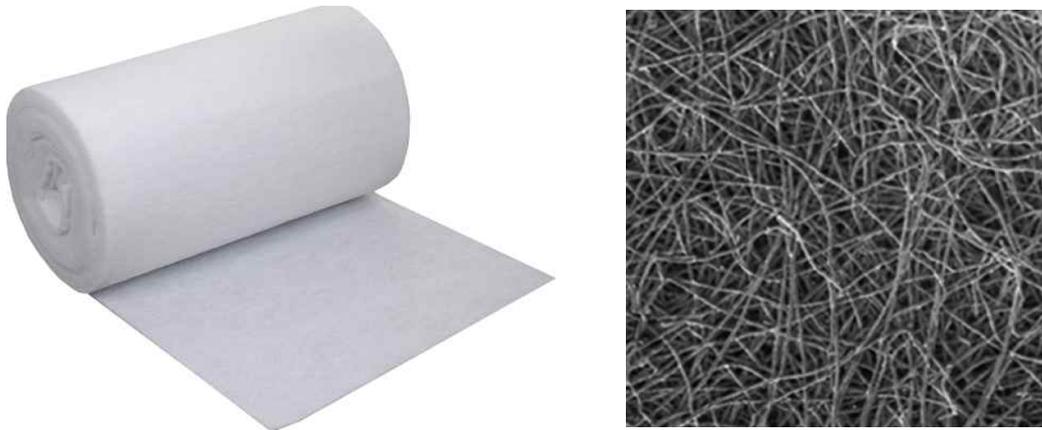


4. 미세먼지 제거_고정원 배출 먼지 제거(Bag Filter)

배가스 중에 포함된 미세먼지를 제거하는 환경정화 장치 중 가장 널리 적용되고 있는 장치는 필터백(filter bag)을 이용한 것이다. 필터백은 주로 부직포(non-woven fabric)를 이용하여 제조한 필터의 먼지제거 기능을 이용한다. 부직포는 섬유를 기계적, 화학적 또는 열로 처리하여 만든 섬유집합체로 여러 크기의 기공을 갖는 특징이 있다. 고효율 부직포를 이용한 먼지제거는 마스크와 같은 호흡기 보호(respiratory protection), 반도체 공정과 같은 clean room, 산업공정, 건물 공조(ventilation systems)등 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 부직포로 사용되는 재질은 PE, Nylon, Polypropylene, Acetal, PTFE(Teflon), Polyurethane 등 다양하며 마모도, 화학적 내성, 온도, 내충격성 등 조업조건에 따라 적합한 재질을 선정하여 제조되고 있다.



[그림 4-1] 부직포 및 기공 형태.

[Source : QFILTR, Reichelt Chemietechnik GmbH]

부직포를 이용한 미세먼지 제거에 대한 가장 큰 오류는 부직포를 일정크기 이상의 입자를 거르는 체(sieve)와 같이 인식하는 것이다. 부직포를 이용한 필터는 부직포의 기공크기 보다 작은 입자의 집진도 이루어지며 기공크기 보다는 주로 먼지 크기와 부직포로 유입되는 유체의 속도에 큰 영향을 받는다. 이는 먼지 크기와 유속 조건을 명시하는 것 없이 집진효율을 나타내는 것은 의미가 없음을 나타낸다. 부직포를 이용한 집진효율은 다른 오염물의 제거 효율과 유사하게 아래의 식으로 표현된다. 이러한 집진효율을 표기할 때는 반드시 유속, 먼지크기를 병기하여야 하며 적용 예는 아래와 같다.

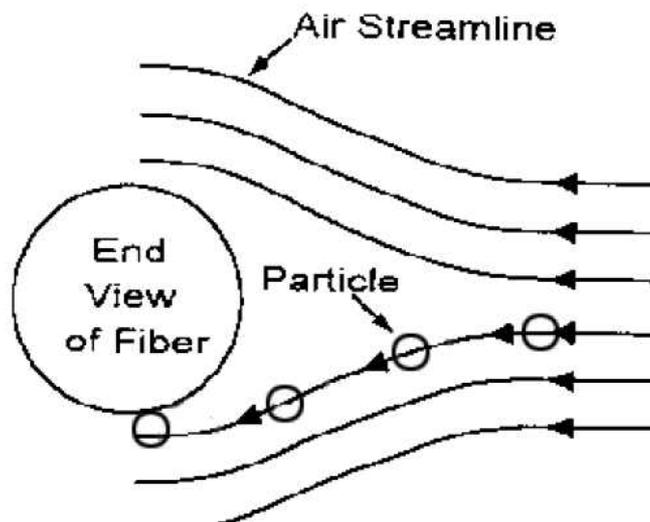
$$\text{Percent Efficiency (\%)} = \left[1 - \frac{\text{Downstream Concentration}}{\text{Upstream Concentration}} \right] \times 100$$

가장 우수한 집진효과를 보이는 HEAP급 필터(P100, respirator filter)는 유속 85 liter/min 조건에서 0.3 μm 입자를 99.97% 이상 제거할 수 있는 필터를 의미한다. 유사하게 N95급 필터는 85 liter/min에서 0.3 μm 입자를 95% 이상 제거하는 것을 기준으로 한다. 0.3 μm 입자 크기를 기준으로 삼는 이유는 다른 입자 크기보다 0.3 μm 크기 입자의 제거가 가장 어렵기 때문이다.

부직포를 이용한 먼지제거 기작은 다음과 같다. 여러 가지 입자 제거 기작이 작용하는데 그 중 가장 중요한 기작은 차단(interception), 관성충돌(inertial impaction), 확산(diffusion)을 들 수 있다[Source: Mechanisms of filtration for high efficiency fibrous filters, APPLICATION NOTE ITI-041, TSI]

차단(interception)

차단은 가스상에 포함된 먼지가 필터 섬유 표면으로부터 입자의 반경보다 안쪽에 있을 경우 포집되는 기작을 의미한다. 주어진 입자 크기에서 어떤 유선(streamline)이 필터 섬유에 아주 가깝게 있다면 입자가 포집될 수 있다는 것이다. 유선과 필터 섬유의 거리가 입자 반지름보다 크다면 차단 기작은 작동하지 않는다.

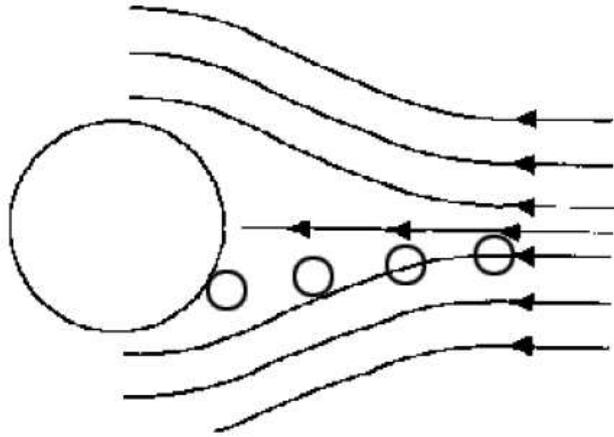


[그림 4-2] 필터에 의한 입자의 차단기작.

관성충돌(inertial impaction)

관성충돌은 유선상에 존재하는 입자의 크기가 매우 커서 필터 섬유 근처에서 유선의 진행 방향이 변화해도 입자의 진행방향이 변하지 않을 때 발생한다. 입자는 자체 관

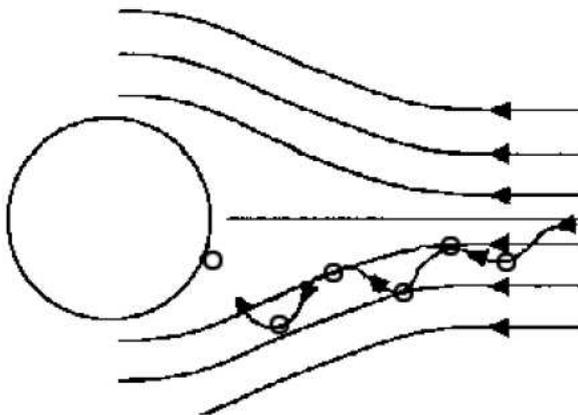
성력을 가지고 있기 때문에 유선의 흐름 방향이 변화해도 원래의 흐름 방향으로 운동하게 되어 필터섬유와 충돌하고 포집된다. 이러한 기작은 가스속도가 매우 빠르고 부직포의 밀도가 촘촘할 경우 지배적으로 작용한다.



[그림 4-3] 필터의 관성충돌 기작

확산(Diffusion)

기체 속에 존재하는 작은 입자는 유선을 따라 이동하는 것이 아닌 지그재그 형태의 브라운 운동을 한다. 유체 흐름이 어떤 물체 주위를 흐를 때 브라운 운동에 의해 유선을 벗어나 물체에 도달하는 입자는 물체에 부착된다. $0.1\mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 입자는 브라운 운동이 활발하고 필터 섬유에 부착될 확률이 증가한다. 이러한 확산기작은 주로 낮은 유속과 작은 크기의 입자의 집진에 지배적으로 나타난다.

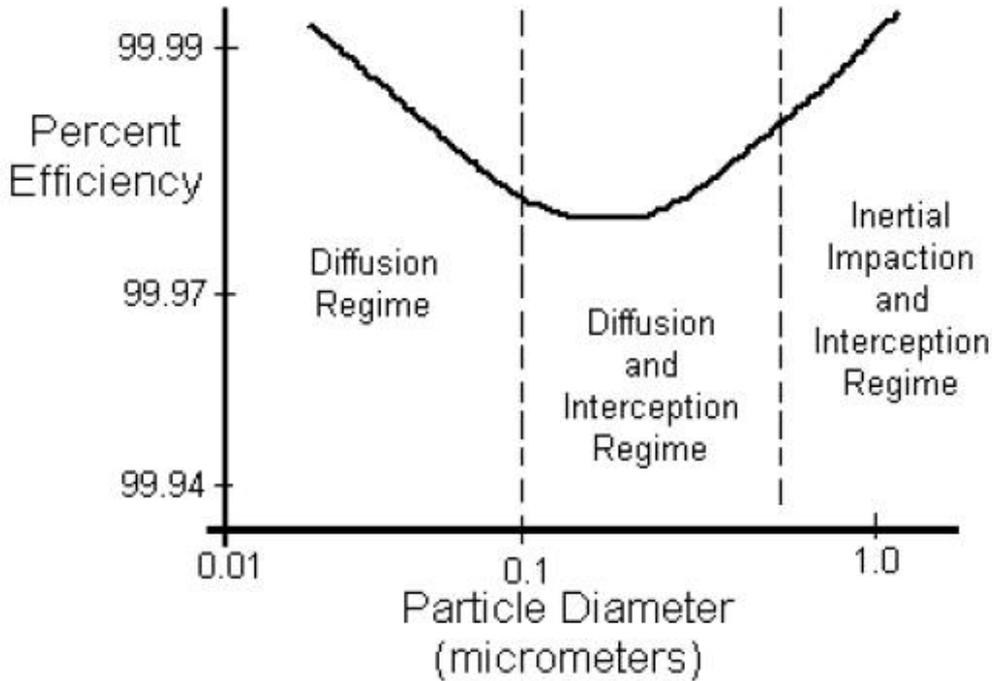


[그림 4-4] 부직필터의 확산 기작.

입자크기와 필터 효율

입자크기는 필터의 집진효율과 밀접한 관련이 있다. 다음 그림은 입자크기와 필터 효

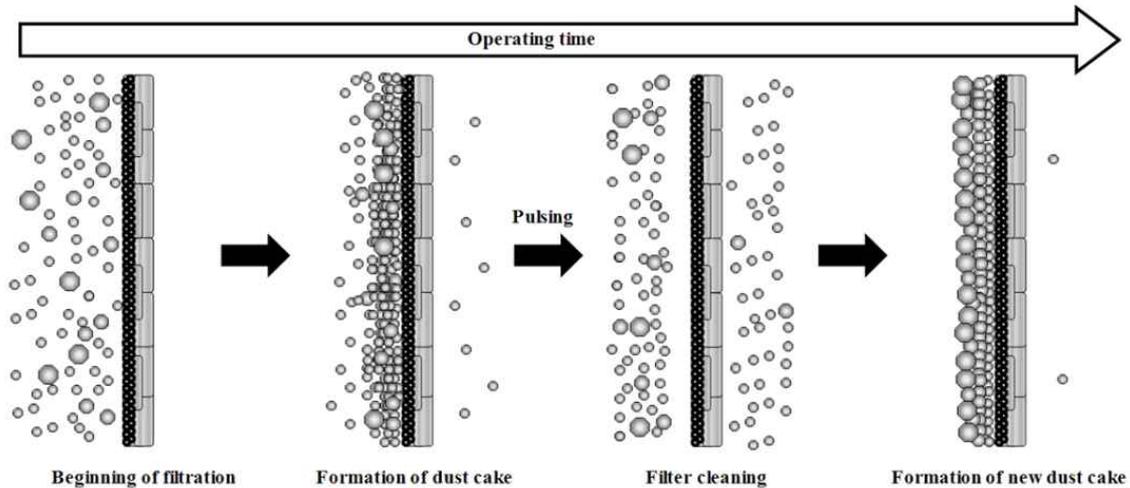
율의 상관성을 나타낸 그림이다. 0.1 μ m보다 작은 입자는 확산 기작이 주된 집진 기작이며 높은 집진효율을 보인다. 0.4 μ m보다 큰 입자는 관성충돌이 포함된 차단기작을 통해 집진되며 매우 효과적인 집진효율을 보인다. 0.1~0.4 μ m 사이의 입자는 확산효과를 얻기에는 너무 크고 차단효과를 얻기에는 너무 작기 때문에 상대적으로 집진효율이 낮게 나타난다.



[그림 4-5] 필터의 집진효율과 입자크기 상관성.

산업공정에서 이용하는 집진필터 공정의 경우 내부에 pulse jet cleaning시스템이 내재된 pulse jet system이 가장 많이 적용되고 있다. 적용 처는 발전소, 소각로, 화학공장, 제철소, 시멘트, 음식, 제약, 금속 등 거의 모든 산업분야에서 사용하고 있다. 이 시스템은 조업조건의 변화에 크게 영향을 받지 않고 환경 규제치를 만족시킬 수 있을 정도로 우수한 집진효율을 보이며, 가격이 저렴하고 compact한 장점이 있다. 필터백을 적용한 미세먼지 제거는 위에서 언급한 먼지 제거 기작과는 별도로 필터 표면에 형성된 먼지 케이크(dust cake)에 의해 집진 효율이 크게 증가한다. 조업 시간이 지속됨에 따라 입자들이 필터 표면에 부착되고 새로 유입되는 입자들이 부착된 입자에 충돌하여 더 큰 층을 이룬다. 먼지 케이크라 불리는 이러한 층은 새로운 필터 역할을 하여 집진효율을 크게 증가시킨다. 그러나 압력손실이 증가하기 때문에 일정 압력손실값에 도달했을 때 pulse-jet에 의해 탈진(cleaning) 작업을 진행하여야 한다.

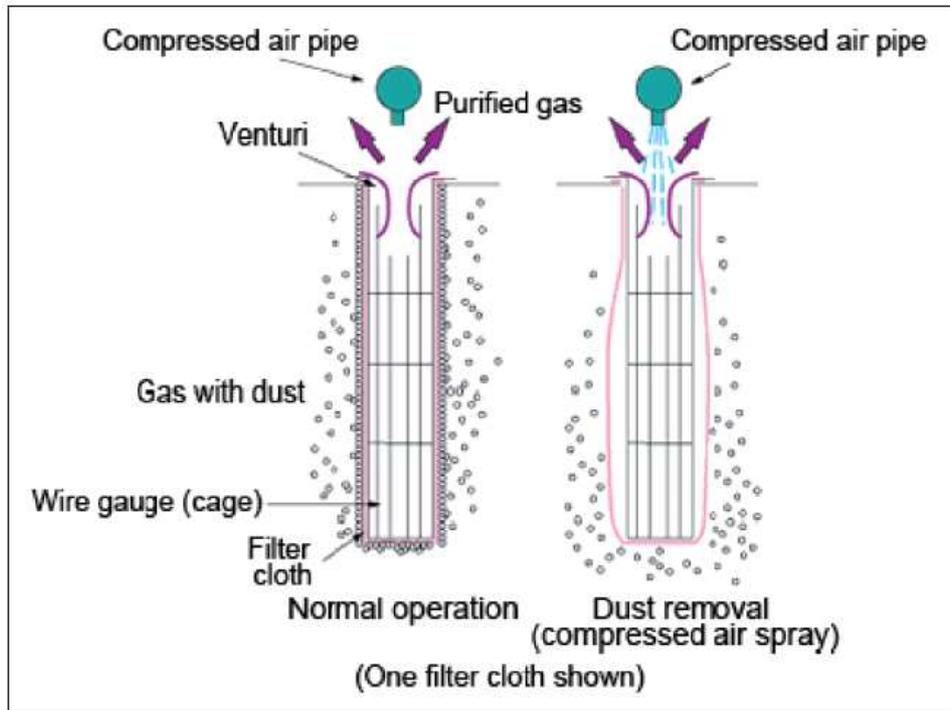
탈진 작용에 의해 분산된 먼지들은 침강하여 아래의 호퍼에 저장되며 일부 입자들은 필터표면에 다시 고르게 부착되어 새로운 먼지 케이크를 형성하며 이러한 케이크가 미세먼지 집진효율을 크게 증가시킨다.



[그림 4-6] pulse jet bag house 시스템의 집진 기작.

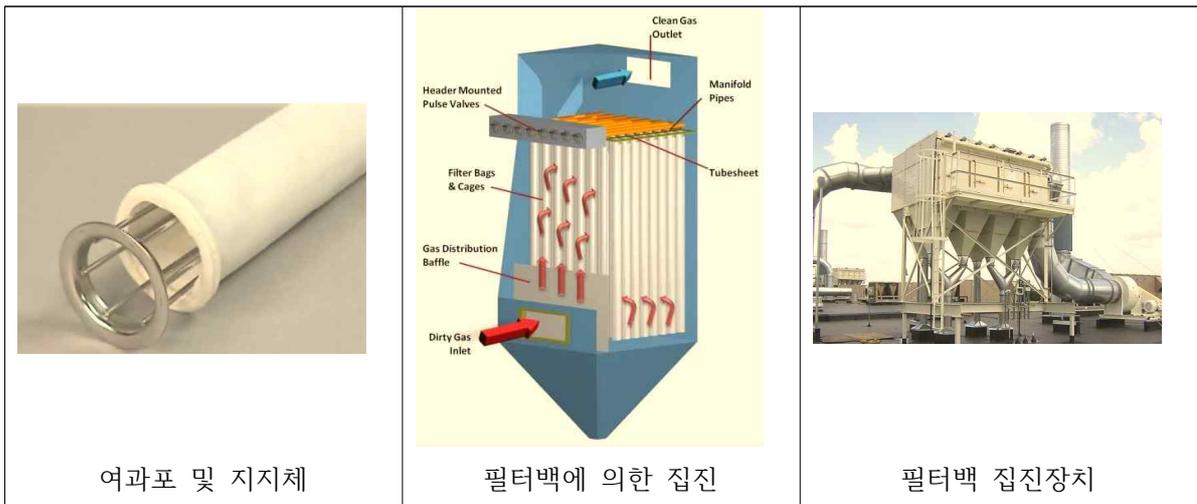
[Source; B.H. Park et. al. "Filtration Characteristics of Fine Particulate Matters in a PTFE/Glass Composite Bag Filter", Aerosol and Air Quality Research, 12: 1030-1036, 2012]

필터의 탈진을 부연설명하면 부직필터를 이용한 먼지의 집진은 먼지가 부직섬유 표면에 쌓이거나 부직포 기공을 막기 때문에 공정 전체의 압력손실을 증가시킨다. 따라서 부직섬유 표면에 존재하는 먼지를 일정 주기에 따라 제거해야만 하며 jet pulse를 이용한 재생이 가장 많이 이용되고 있다. 여과시스템에 설정해 놓은 압력강하 값에 도달하면 높은 압력의 jet pulse를 유체흐름의 반대 방향으로 짧은 시간동안 주입한다. 이때 필터백 표면에 있는 먼지층이 분리되고 분리된 먼지는 필터백 하단의 호퍼로 저장된다. 먼지층이 제거된 후 압력강하는 크게 감소하고 이후 새로운 집진을 수행하는 연속공정이 이루어진다. 제트펄스에 의해 먼지층을 제거하여도 100% 제거되지 않고 필터백의 기공에 일정량의 먼지가 존재하기 때문에 공정 운영시간이 지속됨에 따라 필터백 시스템에 걸친 압력손실은 서서히 증가하고 일정 한계에 도달하면 필터백을 교체하여야 한다. 필터백 시스템에 의한 압력손실은 곧 에너지 손실을 의미하기 때문에 동일한 조업 조건에서 압력손실이 낮은 필터백 소재를 개발하는 것이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 일반적으로 필터백 시스템의 운영비 중 약 60~80%는 팬(fan) 구동에 소요되는 동력비이며, 약 10~15%가 pulse jet에 의한 것으로 알려져 있다.



[그림 4-7] 필터백에서 pulse jet에 의한 탈진.

[Source ; “Selection of cleaning pulse pressure for pulse jet fabric filtration” Filtration+Separation July/August 50(4) 28-30 2013]



[그림 4-8] Filter bag 먼지 제거 시스템.