

정전필터의 종류와 특징

Aerosol filtration by electret and electrostatic filters

안 강 호
K. H. Ahn
한양대학교 기계공학과



- 1958년생
- Particle의 측정 및 거동에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

기존의 섬유필터는 고효율을 얻기위하여 섬유를 일정한 공간에 많이 넣어, 즉, solidity를 높였다. 이렇게 하면 입자의 포집효율은 증가하나 압력강하가 커져 운전비용이 많이 들어가게 된다. 이러한 단점을 보완하는 방법으로 정전기력을 이용하여 입자를 포집하기 시작하였으며 정전기력을 이용하는 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째는 필터 섬유 주위에 강한 정전하를 띤 입자를 부착시켜 필터를 만드는 것이며, 두 번째 방법은 전하를 띤 섬유를 사용하여 필터를 만드는 것이다. 세 번째 방법은 필터 주위에 강한 전기장을 만들어 필터 섬유에 극성을 띄게 하는 방법이 있다. 이렇게 제조된 정전 필터들은 일반섬유 필터에 비해 압력강하가 낮으면서 집진 효율이 매우 좋아 진공청소기, 방진마스크, 공기청정기 같은 곳에 널리 사용되고 있다.

2. 필터구조 및 특성

약 100여년 전에 Oliver Lodge는 대기중 먼지를 정전기에 의하여 잡을 수 있다는 것을 보여 주었다. 그 후 덴마크의 Hansen은 매우 성긴 섬유에 음전하를 띤 수지가루를 묻혀 정전필터를 처음으로 개발하였다. 성능을 개선하기 위하여 Hansen은 여러 시도를 하였으며 그 결과 양모 패드에 전기적으로 우수한 부도체인 수지가루를 묻힌 정전필터를 발명하였다. 이 정전필터는 개인용 방진마스크로 널리 사용되었으며, 특히 1933년 덴마크, 프랑스, 독일, 이탈리아 군인의 군사용 장비로 사용되었다. 1943년에는 영국은 영국시민을 보호하기 위해 양모와 수지를 재료로 하는 민수용 정전필터를 사용하였으며, 이 필터는 기존의 양모나 석면만으로 제작한 필터로 제거할 수 없었던 $0.2\mu\text{m}$ 직경의 비소연기를 효과적으로 제거할 수 있었다. 수지 입자의 크기는 직경 약 $1\mu\text{m}$ 정도이며, 전기저항은 약 10^{21}ohm cm 이므로 필터의 수명이 길고 정전기를 오래 간직할 수 있다. 양모만으로 만들어진 필터는 효율이 50% 정도에 지나지 않지만 수지를 첨가한 필터는 99.99%의 효율을 보이는 것으로 보고되었다.

그후 여러가지 폴리머재질 특성을 조사한 결과 폴리스타일렌이 전기적 저항이 가장 크고 표면에 상당량의 전하를 저장할 수 있는 것으로 알려져 이 물질을 유리섬유 표면에 코팅하여 만든 필터도 성능이 뛰어난 것으로 알려졌다. 또한 폴리프

로필렌 쉬트를 코로나 방전을 일으키는 곳에 넣어 전하를 주입하여 정전필터를 만들 수 있으며, 이렇게 제작된 폴리프로필렌 쉬트는 한 면은 양전하를 다른 한 면은 음전하를 띄게 된다. 이 쉬트를 가늘게 잘라 직사각형 단면의 섬유를 만들어 필터를 만들기도 한다. 이와 같은 정전필터의 섬유를 전자현미경 그림 1에 보여주고 있다. 그림 1(a)는 기존 유리섬유 필터를 1000배 확대하여 촬영한 것으로 섬유의 굵기가 1~2 μm 에서 10 μm 에 이르는 다양한 크기의 원형 단면을 갖고 있는 것을 볼 수 있다. 반면 사진1(b)는 정전필터를 150배 확대하여 촬영한 것으로 30~80 μm 굵기의 직사각형 단면의 섬유들로 구성되

어 있는 것을 볼 수 있다.

단면이 직사각형인 정전필터의 입자포집 과정을 보면 그림 2와 같다.⁽²⁾ 그림 2는 단면이 30 \times 10 μm 이고 섬유의 상류측면이 (+) 전하를 하류측면에 (-) 전하를 띄고 유속이 1.5cm/s인 경우 -10e 으로 대전된 직경 1 μm 입자의 궤적을 수치 해석적으로 보여준 것이다. 일반적으로 직사각형 단면의 정전섬유는 원형단면의 정전섬유보다 강력한 전기장 구배를 모서리 부분에 형성하므로 정전섬유 주위를 지나는 입자에 대해 강력한 분극력을 발생시켜 입자포집 성능이 우수하다. 이 분극력은 입자직경이 클수록 더욱 강하게 발생한다.

기존의 섬유필터와 정전필터의 입자포집효율 실험결과를 그림 3과 4에 각각 나타내었다. 일반적으로 중·저성능의 섬유필터의 최대통과 입자크기(most penetrating particle size, MPPS)는 약 0.2~0.3 μm 근처에서 나타나며 이와 같은 현상을 그림 3에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 그러나 정전필터의 경우는 MPPS가 0.03~0.04 μm 부분에 존재하며, 일반적으로 필터성능을 나타내는 입자크기 0.3 μm 에서 입자포집효율이 매우 높은 것을 그림 4에서 볼 수 있다. 또한 정전필터는 기존 섬유필터에 비해 압력강하가 작아 필터성능지표가 매우 좋다. 여기서 필터의 성능지표는 다음과 같이 표시하며,

$$q_f = \frac{1}{\Delta p} \ln \frac{P}{P_0}$$

P는 입자의 통과율, Δp 는 필터의 압력강하를 나타낸다. 필터의 면속도 2.8cm/s, 입자크기 0.221 μm 에서의 필터성능지표를 비교해 보면 일반필터

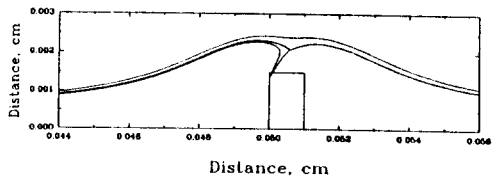


그림 2 유속 1.5cm/s에서의 -10e 으로 대전된 직경 1 μm 입자의 운동 궤적



(a) 유리섬유필터의 전자현미경사진, 1000배 확대



(b) 정전필터의 전자현미경사진, 150배 확대

그림 1 정전필터 섬유의 전자현미경

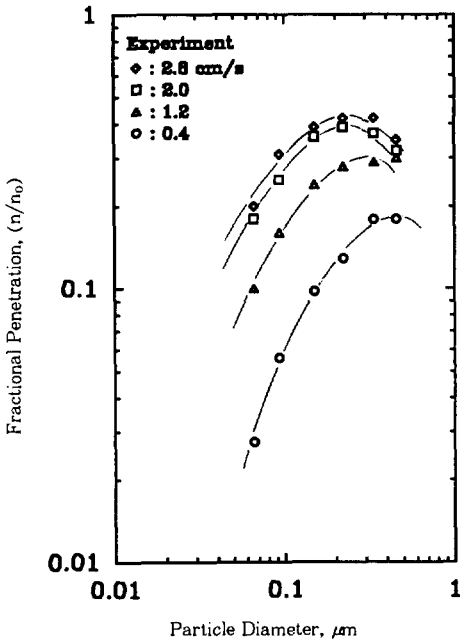


그림 3 중·저성능 섬유필터의 면속도에 따른 입자의 투과효율

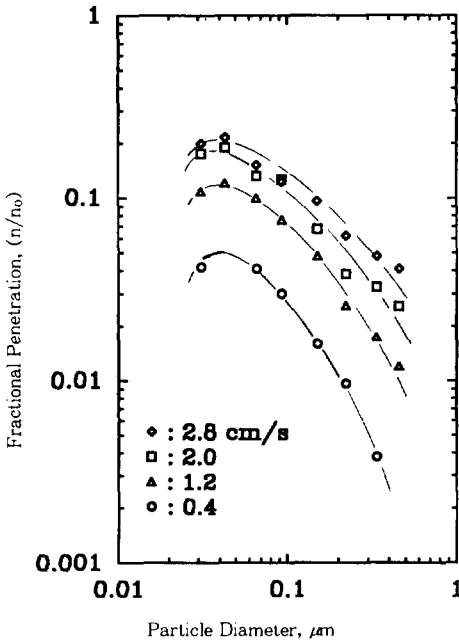


그림 4 정전섬유필터의 면속도에 따른 입자의 투과효율

는 0.927, 정전필터는 9.27로 매우 뛰어난 것을 알 수 있다.⁽¹⁾

그러나 이러한 좋은 장점을 갖는 정전 섬유필터도 반대극성의 입자가 많이 포집되거나 화학물질에 노출되면 정전섬유 표면의 정전기를 상실하여 입자의 포집효율이 극히 나빠지는 단점이 있으며 또한 효율이 급격히 감소하는 시기를 정확히 예측할 수 없어 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

한편, 섬유자체가 정전기를 띠지 않고 외부의 인가 전압에 의해 섬유에 분극현상이 발생하여 입자의 포집성능을 향상시키는 형태의 정전필터에 대한 연구도 진행되어왔다.⁽³⁾ 이러한 정전필터의 구조를 그림 5에 보여주고 있다. 이 그림에서 단위는 mm이며 인가전압은 600V이다. 그 구조는 약 0.008cm 직경의 와이어를 필터양면에 짜서 와이어에 전압을 가하면 와이어 사이에 있는 필터에는 분극현상이 발생하여 필터섬유는 극성을 띄게되며 또한 가는 와이어로 인하여 와이어 주변에는 강한 전기장의 구배가 발생하므로 전하를 띤 입자나 전하를 띠지 않은 입자 모두 전기장을 따라 움직이게 된다. 이렇게 포집된 입

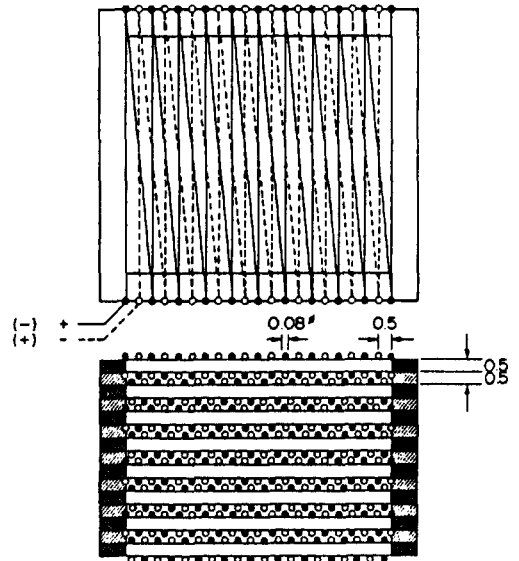


그림 5 Walkenhorst(1969)의 2중 구조형의 정전필터

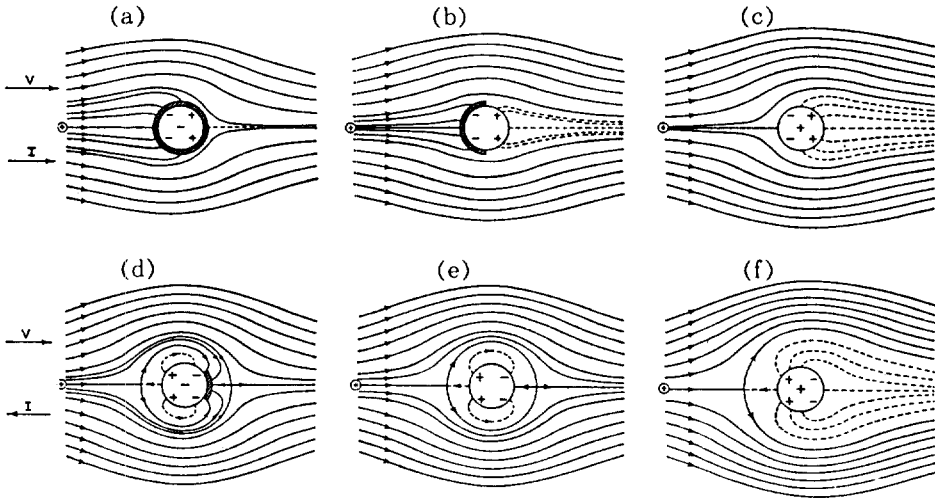


그림 6 외부전계의 방향, 유체흐름의 방향, 그리고 필터섬유의 대극전성에 따른 입자의 포집특성

자가 많아지면 와이어 주변의 전기장의 세기는 약해지므로 일정한 값 이하가 되면 와이어에 걸리는 전기의 극성을 반대로 가하여 준다. 이렇게 하면 포집된 입자의 전하량과 와이어에 걸리는 전압에 의해 더욱 강력한 전기장을 형성하게 된다. 이와같이 극성을 주기적으로 바꿔주면 포집된 입자의 극성은 주기적으로 반대극성을 띤 입자의 층으로 이루어져 포집된 입자는 서로 결속된 상태로 존재하게 된다. 이와 같은 형태가 가장효율이 좋고 압력강하가 작은 작동방법으로 제시되었다.

이와 같이 외부인가 전압에 의해 필터섬유는 분극이 형성되고, 강력한 전기구배가 형성된 와이어 주위를 지나는 입자 또한 분극이 되어 입자 포집 효율이 높게 된다. 이때 인가전압의 방향과 유체의 흐름방향에 따라 입자의 포집특성이 달라질 수 있으며, 또한 필터섬유 자체가 이미 대전되었을 경우에도 그 극성에 따라 포집특성이 달라질 수 있다. 이에 대한 연구는 Zebel(1965, 1969), Brown(1981)등에 의해 연구되었으며, 그림 6에 그 결과를 보여주고 있다. 그림 6(a), (b), (c)는 외부 전기장의 방향이 유체의 흐름 방향과 같은 경우이며, (d), (e), (f)는 전기장의

방향이 유체의 흐름 방향과 반대일 경우 \oplus 로 대전된 입자의 궤적을 보여주고 있다. 그림 (b), (e)는 섬유가 초기에는 대전되지 않은 상태에서 외부 전기장에 의해 분극된 경우를 나타내며, (a), (d)는 섬유가 초기에 \ominus 로 대전된 후 외부 전기장을 가하였을 경우 궤적을 나타낸 것이다. 한편, (c)와 (f)는 섬유가 초기에 \oplus 로 대전된 후 외부 전기장을 가하였을 경우의 입자 궤적을 나타낸다.

3. 맺음말

정전기를 이용하여 입자를 포집할 경우 입자와 필터섬유 사이에 작용하는 힘들은 정전기력(Coulomb force), 분극력(polarization force), 영상력(image force) 등이 있으며 이를 정리하면 그림 7과 같다. 그림 7은 입자의 하전형태와 필터의 하전형태에 따라 입자와 필터섬유 사이의 관계를 보여주고 있다. 이와 같이 정전필터는 기존의 필터가 갖는 입자포집 기작(mechanism) — 즉 관성, 확산, 접촉 — 이외에 정전기력이 부가되므로 낮은 압력강하로 고효율의 집진 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

필터형식	대전상태		정전기력	
	입자	섬유		
하전기 이이이이 이이이이 이이이이 이이이이 이이이이		무대전	대전	
		대전	대전	
		대전	무대전	
		무대전	외부전계	
		대전	외부전계	

그림 7 정전필터의 종류

참고 문헌

1. 안강호, 배귀남, 1994, “필터여재의 성능평가”, 공기조화 냉동공학 논문집 제6권, 제4호, pp. 417~426.
2. 안강호, 1996, “정전섬유 필터 주위의 입자포집 및 거동에 관한 수치해석적 연구”, 대한기

3. Walkenhorst, W., 1969, “Überlegungen und Untersuchungen zur Filtration staubhaltiger Gase unter besonderer Berücksichtigung elektrischer Kräfte” Staub-Reinhold, Luft. 29,(12), pp. 483~493.
4. Zebel, G., 1965, “Deposition of aerosol flowing past a cylindrical fibre in a uniform electric field”, J. of Colloid Science, Vol. 20, No. 6, pp. 522~543.
5. Zebel, G., 1969, “Zur Aerosolabscheidung an einer Einzelfaser unter dem Einfluss elektrischer Kräfte I”, Staub-Reinhold, Luft. 29,(2), pp. 62~66.
6. Brown, 1981, “Capture of dust particles in filters by line-dipole charged fibres”, J. of Aerosol Sci., Vol.12, No.4, pp. 349~356.
7. Pich, J., Hitoshi Emi, and Chikao Kanaoka, 1987, “Coulombic Deposition Mechanism in Electret Filters”, J. of Aerosol Sci., Vol. 18, No. 1, pp. 29~35.
8. 안강호, 김남효, 1994, “전기장내 입자의 운동”, 대한기계학회 ‘94 추계 학술대회논문집 (II), pp. 243~246.