

필터(Filter)산업의 현황 및 향후전망

-에어필터를 중심으로-



최 현 오

(공기조화 연구실장)

- '74~'78 서울대학교 원자력공학과 졸업(학사)
- '79~'82 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '81~'86 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사)
- '86~'89 한국기계연구소 열유체실 선임연구원
- '90~현재 한국기계연구소 공기조화실장



김 용 진

- '83.2 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업(학사)
- '86.2 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '91.2 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사)

1. 서 론

현대산업의 급속한 발전에 수반하여 대기 및 수질오염 문제가 심화되고, 환경에 대한 사회적 요구의 증가로 산업각계분야에서 집진장치의 설치가 급속히 증가되고 있다. 그리고 고부가가치를 창출하는 반도체, 항공기, 원자력 및 유전공학 등의 첨단산업분야 등에서 고도의 정밀성이 요구되어지며 이를 달성하기 위하여는 산업용 및 생물학적 청정공간(clean room)이 요구되어 진다[1]. 그리고 최근 석유화학산업, 제약, 식품가공공정 등에서 그 원료의 청정도가 엄격히 요구되고 윤활유, 절삭유 및 산업폐수등의 폐기시 환경오염의 원인이 되고 있는 물질들의 재정제, 재활용의 필요성이 중요시 되고 있다.

기체와 액체속에 함유된 불순입자를 분리(separation)시키는 가장 중요하고 기본적인 장치가 필터(filter)이다. 기록에 의하면 약 4,000년 전부터 필터는 인간생활과 매우 밀접한 관계를 유지하며 발달해 왔다. 특히 1, 2차 세계대전중 미국에서 군사용으로 개발된 이후 급진적인 발전을 가져와 현재는 0.1 μ m 입자를 99%이상 분리할 수 있는 초고효율 필터 및 가스상의 유해물질 까지도 분리할 수 있는 기체필터가 개발되고 있다. 현재 국내에서는 환경오염과 초청정 문제에 직접 직면하고 있으면서도 원활한 대처에 어려움을 겪고있는 것은 자체 필터 설계 기술을 확보하지 못하고, 거의 전량을 수입에 의존하고 있기 때문이다. 특히 초청정 연구에 응용되는 고효율의 필터와 관련된 국내산업의 역사는 불과 6-7년 밖에 되지 않고

가장 많이 사용되어 지고 있는 섬유(fibre) 필터에서 단일섬유에 대하여 입자의 분리모형을 보여주고 있다.

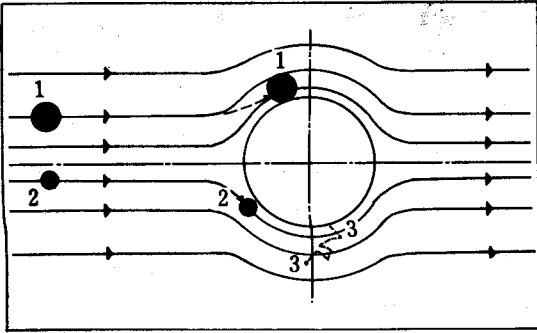


그림 2) 단일섬유에 대한 입자분리 메카니즘

1) 중력(Gravity)

비교적 큰 입자인 경우 중력에 의한 침강으로 유체로부터 분리 시킬 수 있는 메카니즘이며 미세한 입자인 경우 또는 10cm/s 이상의 유동인 경우 이 효과는 무시된다.

2) 관성충돌(Inertial Impaction)

유동장내에 포함된 입자들은 그 질량과 속도에 해당되는 운동량을 갖고 있고, 이 입자들은 필터 여재를 통과 할때 유동저항이 발생하면, 유체는 여재 주위로 흐르게되나 입자는 입자 자체의 운동량으로 인하여 직접적인 유동을 하게되고, 이 결과 입자는 유동에서 이탈되어 여재의 섬유에 부딪쳐 부착하여 분리 된다. 일반적으로 액체에서 입자의 밀도차이는 매우 작으므로 액체 유동장에서 입자의 이탈은 거의 없으므로 이 메카니즘에 의한 여과효과는 매우작다.

3) 확산(Diffusion)

유동장 내에서 매우작은 입자는 유체분자와 충돌하게 되고 이러한 충돌로 부유 입자는 Random하게 움직인다. 이러한 운동을 브라운(Brown) 운동이라 하는데, 이 운동으로 인해 유동장의 유선으로 부터 이탈한 입자는 여재 섬유의 표면에 부딪혀 제거된다. 기체중의 미소입자들의 대부분은 이 메카니즘에 의해서 분리되지만, 액체속에서의 입자분리에는 액체분자의 평균자유경로(mean free

path)가 짧기 때문에 이 효과는 큰 역할을 하지 못한다.

4) 직접 차단(Direct Interception)

직접차단의 기본원리는 그림2에서 보는 바와 같이 입자가 비록 유선을 따라 운동하더라도 입자의 크기치수로 말미암아 섬유표면에 차단, 부착되어 유체로부터 분리된다. 직접차단을 이용한 필터는 필터여재의 크기와 제거하고자 하는 입자의 크기가 필터의 설계에 중요한 인자가 된다. 관성충돌이나 확산차단에 의한 입자 제거는 기체에서 아주 효율적이거나 액체에서는 큰 역할을 하지못하나 이 직접차단 메카니즘은 기체, 액체 모두에 효과적이다. 따라서 액체에 함유되어 있는 입자의 제거는 주로 이 메카니즘을 이용하여 제거 된다.

이상에서 언급된 분리 메카니즘들은 입자의 크기에 따라 독립적으로 또는 서로 병행해서 작용하게 된다.

3. 기술현황 및 향후전망

앞에서도 언급된 바와같이, 1 μ m 이상의 비교적 큰 입자들은 운동의 예측이 용이하고 분리하기가 비교적 쉽지만 1 μ m이하의 매우 미소한 입자들은 기체분자 운동에 영향을 받기 때문에 정확히 그 운동을 예측 할 수 없고 따라서 분리 및 제어 기술이 어렵다. 따라서 매우 미세한 입자를 고성능으로 분리하는 현재 에어필터 산업중에서 핵심부품인 고성능 에어필터(HEPA/ULPA; High Efficiency Particulate Air/Ultra Low Penetration Air)의 개발에 대한 현황과 향후전망을 주로 기술하고자 한다. 고성능 에어필터의 개발에서 가장중요한 인자는,

- ① 입자포집 효율과
- ② 압력손실, 그리고
- ③ 교체수명

이라 하겠다. 일반적으로 필터의 포집성능은 포집효율과 투과율로 표시된다. 필터입구측의 입자농도를 C_i [kg/m³], 출구측의 입자의 농도를 C_o [kg/m³]라고 할때 포집효율은,

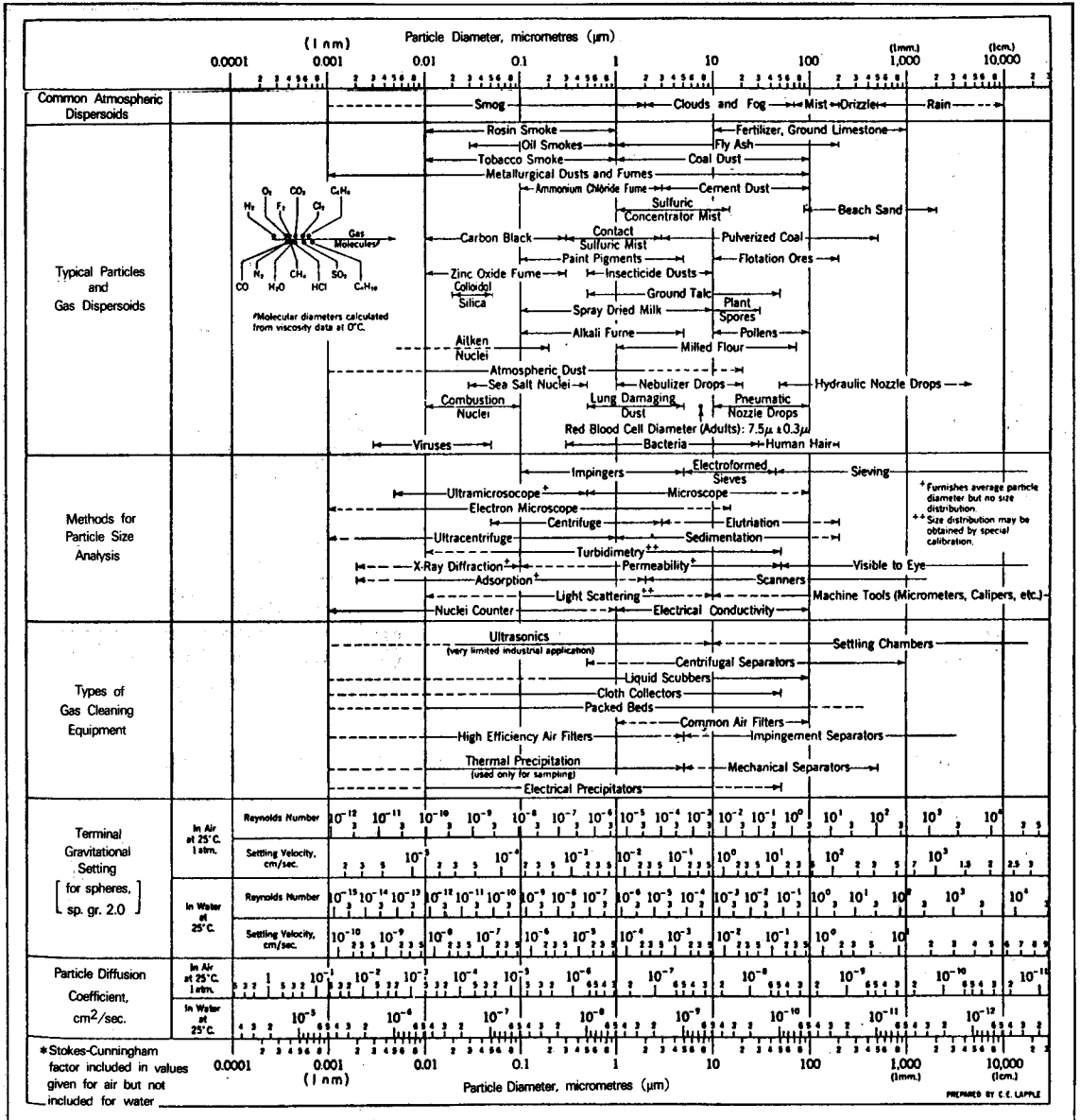


그림 1) 대기중에 분포된 입자들의 크기 및 특성

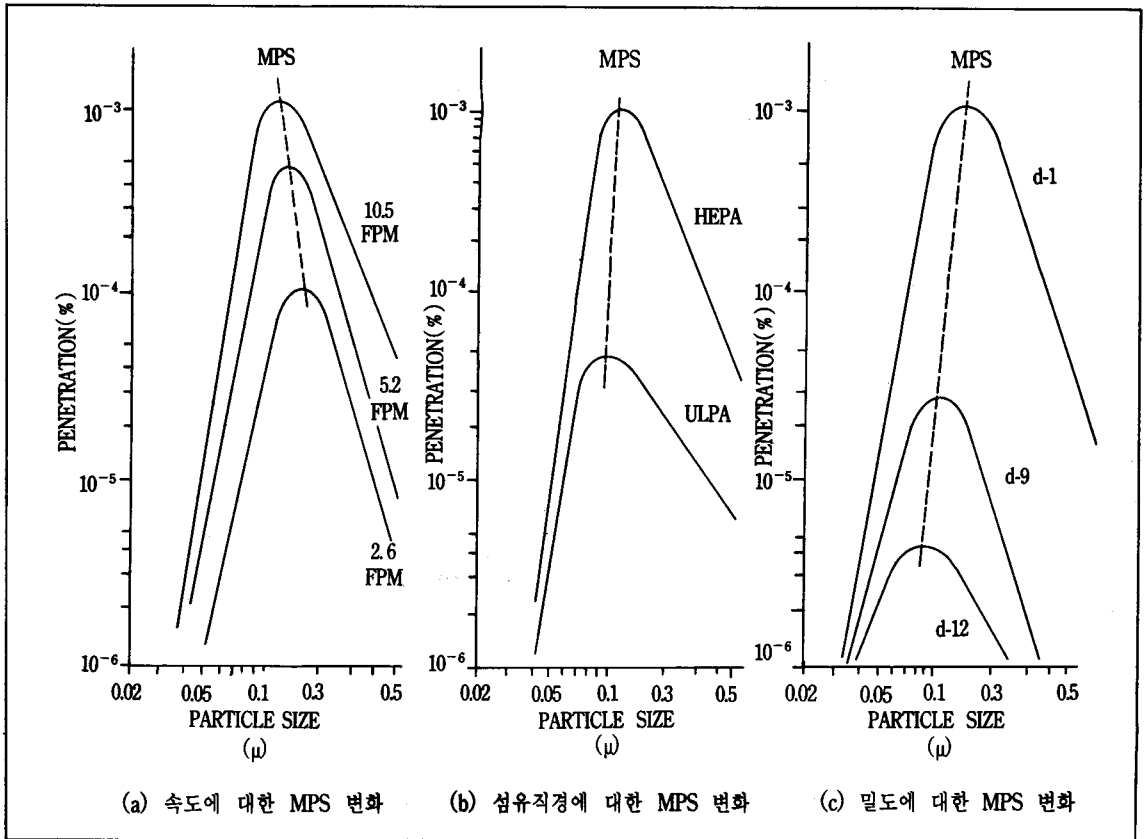
있다.

따라서 본 고에서는 여러종류의 필터 가운데에서 기체와 고체입자를 분리하는 에어필터(air filter)를 중심으로 기술의 현황 및 전망에 대하여 기술하기로 한다.

2. 에어로졸과 분리메카니즘

일반적으로 아주 큰 입자를 제거하는 전처리

및 중성능 필터에서 매우 미세한 입자를 제거하는 고효율 필터에 이르기까지 입자의 크기와 농도의 정도에 따라 가장 경제적인 필터가 선정된다. 그림 1은 대기중에 분포되어 있는 에어로졸들을 크기와 특성을 나타내 주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 에어로졸은 그 크기에 따라 주된특성들이 결정되며, 주로 다음의 4가지 물리적 메카니즘에 의하여 분리되어진다[2,3]. 그림 2는 에어필터에서



고효율 공기
필터의 특성

그림 3) 입자크기에 따른 고성능필터의 투과율 특성

$$\frac{C_i - C_o}{C_i}$$

으로 표현되며, 투과율은

$$\frac{C_o}{C_i}$$

에 의해서 표시된다. 여기서 투과율은 포집효율이 조금만 변화하여도 크게 변하므로 고효율의 에어 필터의 성능을 평가하는데 주로 사용되어진다. 그림3은 고효율의 포집성능을 가지는 HEPA 필터의 투과율을 나타내고 있다.

앞에서 언급된 바와 같이 입자가 작을수록 브라운 운동이 활발해져서 확산차단효과의 증가로 투과율은 낮게되고 입자가 큰 경우 관성 및 차단효과가 커져 역시 투과율은 낮게 되지만 이들의 중간 크기의 입자인 경우(0.05~0.5μm) 어느 때 카니즘도 지배적인 인자가 되지못해서 투과율이

높아지게 된다. 주어진 여재에 대하여 이러한 최대투과입경(MPS;Maximum Penetrating Particle Size)이 필터에서 가장 큰 문제중의 하나가 되고 있다. 그림에서 보는바와 같이 MPS는 유속과 여재의 절대크기 및 입자농도에 대하여 변하고 있으므로 필터의 성능평가에 고려되어야 할 매우 중요한 인자이다. 따라서 이러한 MPS에 대한 투과율을 낮추는 연구가 진행되고 있다.

그리고 필터의 압력손실 문제는 에너지의 절감 및 설치 구조물의 관점에서 매우 중요하다. 일반적인 섬유필터는 주어진 성능과 처리용량에 대하여 매우 큰 압력손실이 수반된다. 게다가 처리시간이 경과할수록 입자의 부착량의 증가로 인한 압손의 증가 및 입자 및 섬유자체의 온도 습도 및 진동영향 등에 의한 재비산등은 필터의 효율과 수명을 크게 저하 시키는 요인이되고 있다. 따라서

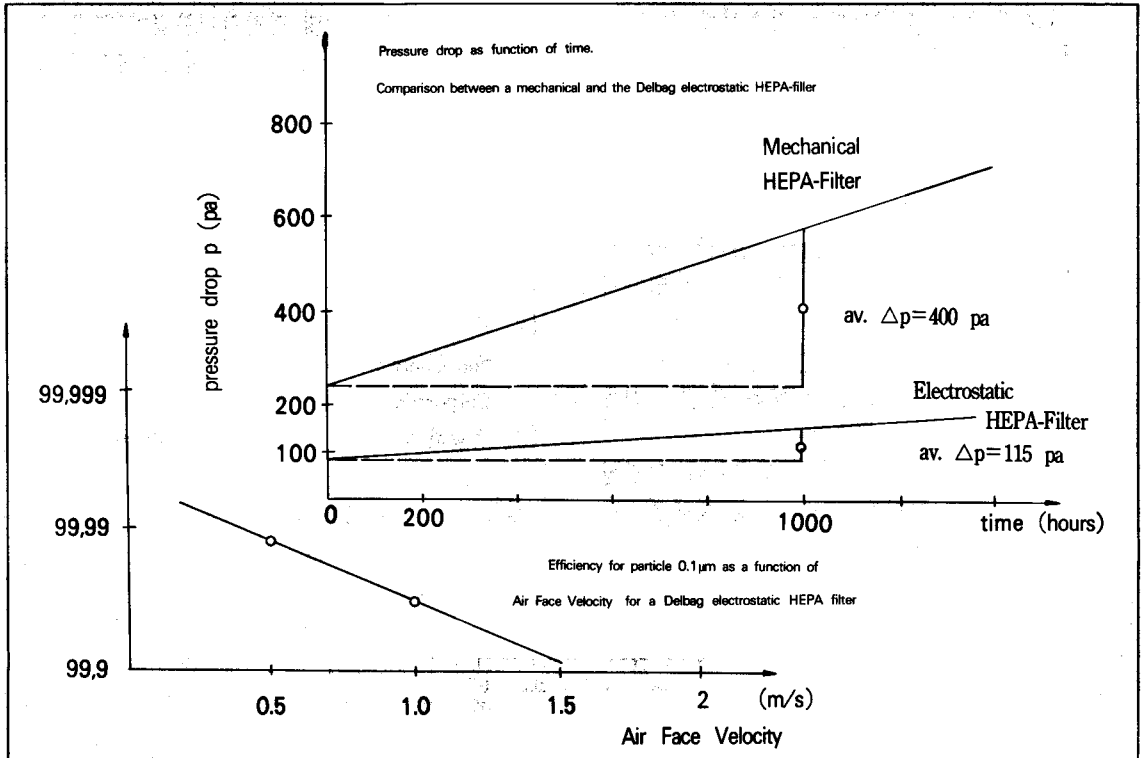


그림 4) 정전 HEPA필터의 효율 및 차압특성

기존의 HEPA필터의 성능을 증가하면서 섬유재의 재비산등을 막기 위하여 멤브레인(membrane)형 기체필터가 최근에 개발되고 있다. 이러한 멤브레인 필터인 경우, 기존의 섬유필터에 적용된 외부유동 이론들은 더이상 사용할 수 없으며, 내부유동 부착모델들이 개발중에 있다. 최근 여기에 전기장, 초음파 또는 자기장을 작용시켜 필터의 효율을 높이도록 한 소위 "assisted filtration" 기술에 관한 연구가 행하여지고 있다.

그리고 여재산업에서, 여재의 공기저항을 줄이고 현재의 HEPA필터와 같은 효율을 유지할 수 있는 고질의 여재가 미국에서 개발중이며, 가격의 증가를 막기 위하여 여재 제조 공정(mill procedure, fibre treatment) 및 접착기술, 그리고 바인딩(binding) 기술의 향상 등이 도모되고 있다. 그리고 여재자체에 균일한 변형을 주어서 제작하여 기존의 분리판(separator)을 대신하도록 하는 방법이 강구되고 있다[4].

그리고 필터유닛(filter unit) 산업은 압력손실을

줄이는 방향으로 연구가 집중되고 있으며 이를 위하여 주어진 환기 덕트(duct) 체적에 대하여 필터여재면적을 최대화시키는 연구가 수행되어지고 있다. 따라서 기존의 플릿(pleat)-분리판형의 방법에서 분리판이 없이 테이프나 플라스틱 비이드(bead) 등을 여재에 직접 접착시켜 분리시키는 미니플릿(mini-pleat)형 또는 simple-pleat 개념을 도입하고 있다. 뿐만아니라 특히 반도체등의 클린룸 산업용에서는 쇼크(shock)와 진동 등을 감소시키기 위하여 유체타입의 seal을 사용하고 있다.

그리고 HEPA 필터의 전후에 낮은 유체저항을 가지는 필터를 사용하여 상류측에서 비교적 큰 입자를 제거하고 하류측에서 재비산(re-entrained)된 입자를 제거시킴으로써 전체의 비용을 절감하고 교체가 용이하도록 하고 있다. 최근에는 여재에서의 정전기를 이용하는 정전필터를 개발하고 있다. 이는 종래의 중성능 필터의 포집효율 0.3μm 입자의 50% 정도를 99.97% 이상의 포집성능으로 향상시킴과 아울러 종래 HEPA필터의 공칭압손인

25mm H₂O를 6mm H₂O이하로 감소시킬 수 있다.

그림 4는 정전HEPA필터의 포집효율과 차압특성을 나타내주고 있다[5]. 그림에서 보는바와 같이 정전 HEPA필터는 고성능을 가지면서 기존의 HEPA필터와 비교해 현저하게 압력손실이 줄어들고 있다. 따라서 이러한 초저압손형의 필터의 개발로인하여 클린룸 및 환경산업 등에서 막대한 에너지 절감효과가 기대되고 있다. 그러나 입자의 전하(charge)는 종종 불안정하고 필터의 접촉하는 ①유체의 PH ②radiation ③시간 ④습도 등에 크게 영향을 받기때문에 이에 관한 많은 연구가 계속적으로 요구되어 진다.

이상에서 필터의 발전방향은 고효율의 포집성을 가지는 것과 동시에 압력손실을 최대한으로 줄이는 방향으로 나갈 것으로 사료된다. 이를 위하여 한국기계연구소의 공기조화 연구실에서의 정부 및 산업체와의 연구과제 등으로 지난 5-6년 동안 독창적으로 전문화된 연구가 수행되어 왔다. 특히 필터의 설계 및 성능을 시험하는데 필요한

응축핵계수기(CNC) 및 정전입자분급기(DMPS) 시스템들을 보유하고 있는 상태이다. 정부의 집중적인 투자와 이를 바탕으로 여러가지 수요에 대한 최적의 필터 설계기술이 완성될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 공기청정기술, 제3권 제1호, 1990
- [2] Fitch, E. C., "An Encyclopedia of Fluid Contamination Control", 2nd edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1980
- [3] 空氣清淨ハンドブック, 日本空氣清淨協會, オーム社, 1985
- [4] Anderson, W. L., "Making Sence of HEPA Filtration", Filtration and Separation, November/December, pp.439-442, 1989
- [5] CuCu, D. D., Stiel, H. H., and Lippold, H. J., "Ultra High Efficiency Electrostatic HEPA-Filter", Filtration and Separation, March/April, pp.96-99, 1984