

여과포집진장치의 기술 개발 동향

박 영 옥

한국에너지기술연구소

에너지환경연구부/선임연구원

1. 머리말

먼지는 일반적으로 입자크기가 $10\mu\text{m}$ 이상의 강하먼지와 $10\mu\text{m}$ 이하의 부유먼지로 구분하며, 이들의 먼지는 대기중에서 인간이나 동·식물에 주로 영향을 준다. 입자크기 범위가 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 사이의 부유먼지는 주로 산업공정에서 연료의 연소 또는 고체상 물질의 분쇄 및 수송공정 등에서 주로 발생되며, 입자크기가 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 것들은 대기중에서 황산화성 미세먼지와 질산화성 미세먼지로 전환되어 가시도(Visibility)에도 큰 영향을 미친다. 대기중에 부유된 먼지중에서 $8\mu\text{m}$ 이하의 호흡시 호흡기로 유입되는 입자크기로써, 입자크기가 $6.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 약 10% 정도가 인간의 폐내로 유입되고, $4.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 30%, $2.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 약 80%, $1.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 약 99%가 폐(Lung)에 유입되어 폐에 침착된다고 보고하였다(1). 앞으로 산업발전이 계속됨에 따라서 먼지의 배출량이 계속 증가할 것이며, 이로 인해 먼지에 의한 대기오염이 심각해 질 뿐만 아니라 인간에 미치는 피해도 심각해

질 것으로 예측된다. 따라서 정부에서는 피해를 사전에 방지하기 위해 먼지배출허용농도를 단계적으로 강화하고 있다(2).

현재 국내 산업공정 및 먼지발생공정에서는 발생된 먼지를 포집 제거하기 위해 먼지발생원의 특성에 따라 각종 집진기술을 적용하고 있는데, 여과포집진장치의 경우 연간 고체연료 사용량이 1,000톤 이상인 사업장을 대상으로 조사한 자료에 의하면 1985년에는 1,374기였고, 1989년에는 2,100기, 1991년에는 5,710기로 계속적으로 증가하는 추세를 나타냈다. 이와 같은 증가 추세는 여과포집진기술이 다른 집진기술에 비해 여러가지 장점을 갖고 있기 때문이라고 볼 수 있다(2).

그림 1에 먼지의 입자크기와 농도범위에 따른 먼지제거기술의 적용범위를 나타냈다(3). 그림에서 보면 집진기술별로 포집이 가능한 입자크기와 먼지의 농도가 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 대체적으로 미세한 먼지입자까지 포집이 가능한 집진기술로는 세정액을 이용한 세정식집진기술, 여과포를 이용한 여과포집진기술, 전기적인 에너지를 이용한 전기집진기술 등이 있다. 이들 집진기

슬중에서 여과포집진기술이 포집가능한 먼지의 입자크기범위와 농도 범위가 가장 넓은 먼지포집기술이다. 집진장치에 유입되는 오염기체에 함유된 먼지의 농도가 10 g/m³ 이상이 되면 여과포집진기술의 경우는 여과포에 포집·퇴적된 먼지층을 털어내는 효과가

떨어지고, 전기집진기술의 경우는 먼지입자에 전기적인 하전이 곤란하여 집진극에서의 먼지포집효율이 저하되며, 세정식집진기술에서는 세정액의 액적과 먼지입자와의 충돌 및 접촉효과가 저하되어 먼지포집효율이 저하되는 특성이 있다.

Dust Collectors	Particle Diameter, μm					Dust Concentration, g/m^3						
	0.01	0.1	1	10	100	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3
Settling Chambers												
Cyclones												
Fabric Filters												
Electrostatic Precipitators												
Wet Scrubbers												
Air Filters												
Moving Bed Filters												

그림 1 집진기술별 적용 가능한 먼지농도 및 입자크기 범위

그림 2에 먼지입자크기에 따른 제거기술별 부분먼지포집효율 경향을 비교하여 나타냈다 (4). 그림에서 보면 먼지입자크기 10.0 μm 이상에서는 Venturi Scrubber, 전기집진장치 및 여과포집진장치에서의 부분포집효율은 100% 이나, 1.0 μm 이하의 입자크기에 대해서는 Venturi Scrubber가 90%, 전기집진장치가 99%, 여과포집진장치가 99.9%의 부분포집효율을 나타내었다. 즉, 미세한 먼지입자 포집에서는 여과포집진장치가 전기집진장치에 비해 포집효율이 10배 정도 우수하다고 볼 수 있다. 원심력집진기술인 Cyclone, 관성집진장치 및 중력침강실의 경우 미세한 먼지입자의 포집은 거의 불가능하다는 것을 알 수 있다.

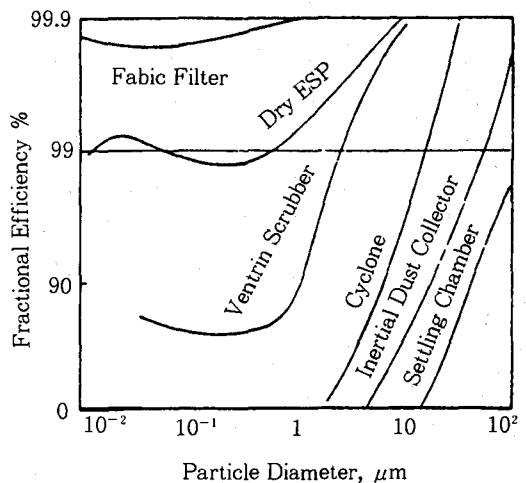


그림 2 집진장치의 종류별 부분집진효율 특성

앞으로 산업체에서는 먼지배출 허용농도의 강화 대응 뿐만 아니라 대기오염 방지 측면과 인간의 호흡기에 유입되어 폐에 침착되는 미세한 입자까지 포집·제거하기 위해서는 먼지제거설비에는 고효율 집진기술을 적용하여야 한다(5). 따라서 본 글에서는 선진국에서 고효율 집진기술로 판명되고 있는 여과포집진기술에 대해 먼지포집 특성과 장치의 구성을 먼저 살펴보고 최근에 여과포집진기술의 고효율화를 위한 연구동향과 유해기체, 발암물질, 중금속 물질 및 먼지를 여과포 집진기술 동시 제거를 위한 연구동향에 대해서 고찰하여 미래에 한국형 총합배가스 처리용 여과포집진기술을 개발하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 여과포집진기술의 특징

2.1 먼지포집원리

산업체의 여과포집진기술에 주로 사용되고 있는 여과포는 직조방식에 따라 크게 직포와 부직포로 분류된다. 여과포에 의한 먼지포집 조작에서 여과포의 세공보다 작은 먼지입자들은 대개 여과포 세공을 구성하는 단일섬유들 사이에 형성된 먼지입자의 가교와 여과포 표면에 퇴적된 먼지층에 의해 포집된다. 여과포의 물리적재질은 여과포표면에 먼지층이 형성되기 전까지는 중요한 먼지포집기구가 될 수 없다. Dennis는 여과포의 세공을 구성하는 단일섬유에 의한 먼지입자의 포집기구를 5가지 즉, 중력침강, 관성충돌, 직접차단, 확산, 정전기력으로 분류하였으며, 이와 같은 포집기구에 의해서 단일섬유의 먼지입자의

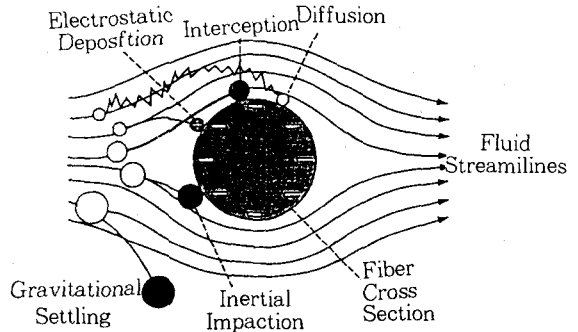


그림 3 단일섬유에 의한 먼지입자 포집기구

포집효율이 결정된다고 보고한 바 있다(6). 그림 3에 여과포 세공을 구성하는 단일섬유에 의한 먼지입자의 포집기구를 나타냈다.

(1) 중력침강(Gravitational Settling)

처리기체내에 함유된 먼지입자의 크기와 밀도가 큰 입자는 기체의 흐름을 따라가지 못하고 먼지입자의 자체 무게에 의해 침강·포집되는 작용을 중력침강이라고 한다. 먼지입자의 크기에 따라 침강속도가 다르므로 포집하고자 하는 먼지의 입자크기분포 및 여과속도를 알면 침강에 의한 먼지포집효율을 추정할 수 있다.

(2) 직접차단(Interception)

먼지입자의 크기가 작고 가벼우면 관성력도 상대적으로 작아져 먼지입자는 기체의 흐름을 따라가면서 단일섬유 주위에 접근하게 된다. 이 때 먼지입자 직경의 중심과 섬유표면과의 거리가 먼지입자의 반지름보다 작으면 먼지입자는 섬유표면에 접촉하여 부착된다. 단일섬유에 의한 먼지입자의 포집은 먼지입자크기가 $1.0\mu\text{m}$ 이상일 경우 99.9% 정도가 관성충돌과 직접차단에 의해 이루어진다(7)

(3) 관성충돌(Inertial Impacton)

단일섬유 주위를 통과하는 먼지입자의 크기가 상대적으로 커 충분한 관성력을 지니고 있어 섬유주위를 통과하는 기체의 흐름을 따라 진행하지 못하고 섬유표면에 충돌 부착되는 현상을 말한다. 관성충돌에 의한 단일섬유의 먼지포집효율은 충돌매개변수의 함수로 나타낸다. 일반적으로 여과속도 0.61m/min의 조건에서 먼지입자크기가 10 μ m인 것의 충돌매개변수는 1.0이다(8). 관성충돌에 의한 먼지입자포집은 1.0 μ m 이상의 입자에서 지배적으로 일어난다.

(4) 확산(Diffusion)

먼지입자 크기가 미세한 먼지입자들은 기체의 흐름을 따라 운동하지 않고 자체적인 무작위운동으로 확산에 의한 운동을 하게 되며 이 운동을 브라운 운동(Brownian Motion)이라고 한다. 따라서 먼지입자는 처리기체의 흐름을 따라 이동하지 않고 브라운운동을 하게 되며, 이들 미세한 먼지입자들은 처

리기체의 이동속도와 다른 자체의 속도로 이동하다가 결국은 여과포의 세공을 구성하는 단일섬유에 접촉 포집된다.

(5) 정전기력(Electrostatic Attraction)

먼지입자중 하전된 먼지입자는 반대 전하를 갖는 여과포로 이동하여 포집된다. 그러나, 먼지입자에 여과포와 같은 극성으로 하전되어 있을 경우에는 서로 반발하는 특성이 있어 먼지포집에 나쁜 영향을 준다.

표 1에 단일섬유에 의한 먼지입자 포집에서 먼지포집 기구에 따라 포집되는 먼지입자 크기 범위를 요약하여 나타냈다(8).

위와 같은 먼지포집기구에 의해 여과포의 단일섬유표면에 부착된 먼지입자는 나뭇가지 모양(Dendrite)을 형성하게 되며, 단일섬유표면에 포집된 먼지입자들이 나뭇가지 모양으로 자란 현상을 그림 4에 광학현미경으로 80배 확대 관찰한 사진을 나타냈다.

표 1. 단일섬유에 의한 먼지입자 포집기구별 포집되는 먼지입자크기

Collection Mechanisms	Particle Diameter, μ m
Gravitational Settling (For Large Size Particles)	> 1.0
Physical or Direct Interception (For Intermediate Size Particles)	> 1.0
Inertial Impaction (For Smaller or Fine Particles)	> 1.0
Diffusion or Brownian Motion (For Very Fine Particles)	< 0.01 ~ 0.2
Electrostatic Attraction	> 0.01



그림 4 단일섬유 주위에 포집된 나뭇가지모양의 먼지입자
(여과속도=0.86m/min, 먼지부하=1.0 g/m³ : 80XMMagnification)

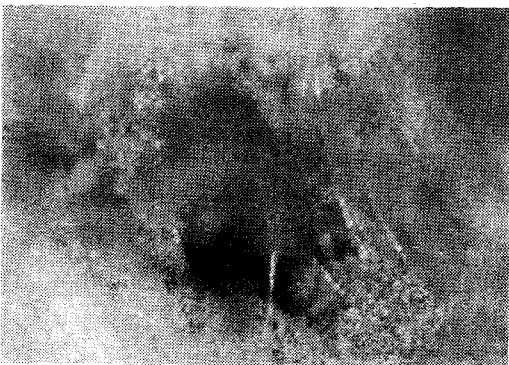


그림 5 먼지입자의 나뭇가지 모양의 성장과 가교형성
(여과속도=0.86m/min, 먼지부하=2.6 g/m³ : 40XMMagnification)

그림 5는 여과포의 세공내에서 단일섬유 주위를 먼지입자들에 의해 거의 메워져 가는 현상을 40배 확대하여 나타낸 사진으로서 단일섬유 주위에 나뭇가지 모양으로 자란 먼지 응집군들이 섬유와 섬유사이에서 가교가 형성되어 있는 것을 볼 수 있다(9). 이 현상을

가교형성(Bridge Formation)이라고 하며 실제 여과포집진장치의 정상 운전조건에서는 가교형성은 입구먼지농도와 탈진조건에 따라 다르지만 대체적으로 수분정도의 짧은 시간 내에 이루어진다.

2.2 성능 특성

(1) 압력손실

여과포집진기술을 이용한 장치설계에서 중요한 변수의 하나는 압력손실이다. 여과포집진기술에서 압력손실은 연소기체 및 먼지를 함유한 기체가 여과포와 먼지층을 통과할 때 발생하는 저항을 말한다. 압력손실의 크기는 처리기체의 점도, 여과속도, 여과포의 물리적 특성, 먼지의 입자크기분포, 먼지층의 두께 및 특성에 따라 좌우된다. 압력손실은 장치를 운전하기 위한 연소기체 및 먼지를 함유한 기체의 유입 또는 처리된 청정기체를 배출시키는 데 필요한 송풍기의 용량을 결정하는데 중요한 요소이다. 송풍기의 흡인압력을 결정하기 위한 총 압력손실은 장치 자체의 압력손실인 여과포의 압력손실과 먼지층에 대한 압력손실 및 배관에서의 마찰에 의한 압력손실의 총합이다.

① 여과포 자체의 압력손실

청정여과포의 압력손실은 먼지층에 의한 압력손실에 비해서 상당히 낮아 문제가 되지 않지만, 압력손실이 비교적 높은 여과포는 여과포조각이 조밀하여 먼지입자들이 여과포 세공내에서 막히는 현상이 발생하기 쉽다. 이로 인해 동일한 먼지부하 조건에서는 여과포조각이 조밀할수록 더 높은 압력손실이 발생된다. 일반적으로 여과포와 먼지층을 통과하

는 기체는 느린 속도로 여과포의 세공과 먼지층을 형성하고 있는 입자들 사이를 통과하게 되므로 층류이다. 이 때 발생하는 압력손실은 여과포와 먼지층을 통과하는 기체의 속도 또는 유량에 비례한다(11).

② 먼지층의 압력손실

먼지층의 압력손실은 여과포 표면에 퇴적된 먼지층 자체에 의한 기체의 통과저항을 말하며, 이 압력손실은 먼지층의 두께, 먼지 입자크기 및 밀도, 기체의 점도, 여과속도의

함수이다. 일반적으로 먼지층의 압력손실은 비저항계수와 여과속도에 비례하여 증가한다. 비저항계수는 실험에 의해 결정되며, 이 값은 여과포집진장치를 설계하기 위한 중요한 자료로 여과속도와 먼지부하에 관련된 탈진조건의 결정 및 압력손실의 예측에 필요한 인자이다(12).

③ 여과속도의 영향

여과포집진기술에서 압력손실은 여과속도와 밀접한 관계가 있다. 압력손실은 여과속도가 증가하면 급격히 증가하는 경향이 있으며 장치의 운전에서 유량의 변화는 압력손실에 큰 영향을 미친다. 그림 6에 두 종류의 유리섬유 여과포에 의한 석탄회 포집에서 각 먼지부하 조건에서 여과속도 증가에 따른 압력손실의 변화 경향을 나타냈다(9). 압력손실은 여과속도가 빨라짐에 따라 선형으로 증가하는 것을 알 수 있고 증가 기울기는 먼지부하가 높을수록 커짐을 알 수 있다.

④ 먼지부하의 영향

그림 7에 두 종류의 유리섬유 여과포에 의한 석탄회 포집에서 여과속도가 일정할 때 먼지부하의 변화에 따른 압력손실 변화 경향을 나타냈다. 그림에서 보면 먼지부하와 압력손실과의 증가기울기는 여과속도가 느린 조건에서는 완만하나 여과속도가 빠른 조건에서는 급격해지는 경향이 있다. 따라서 여과포에 의한 먼지포집 조작에서 먼지층형성 초기 단계에서는 먼지포집이 계속되면서 여과포 세공내에 먼지입자의 응집에 의한 가교가 형성되어 압력손실이 급격히 증가하다가 어느 정도 여과시간이 경과하여 먼지층이 안정되면 먼지부하의 증가에 따라 압력손실은 일정하게 증가한다는 것을 알 수 있다.

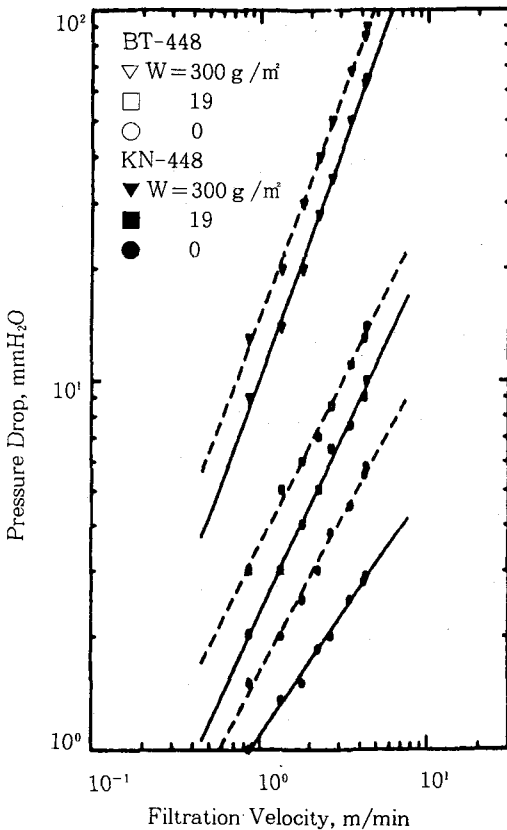


그림 6 유리섬유여과포에 의한 석탄회 포집에서 압력손실에 대한 여과속도의 영향

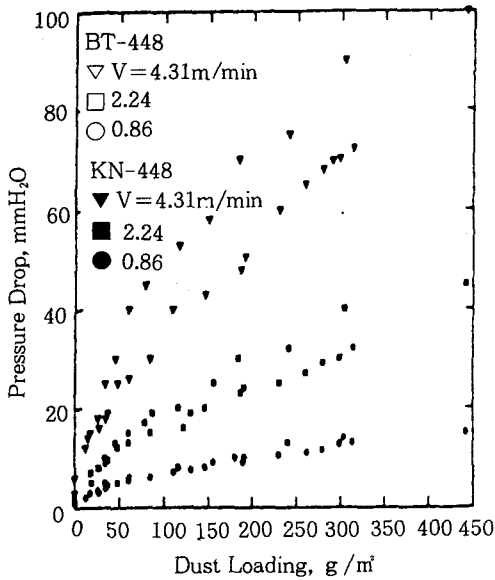


그림 7 유리섬유여과포에 의한 석탄회 포집에서 압력손실에 대한 먼지부하의 영향

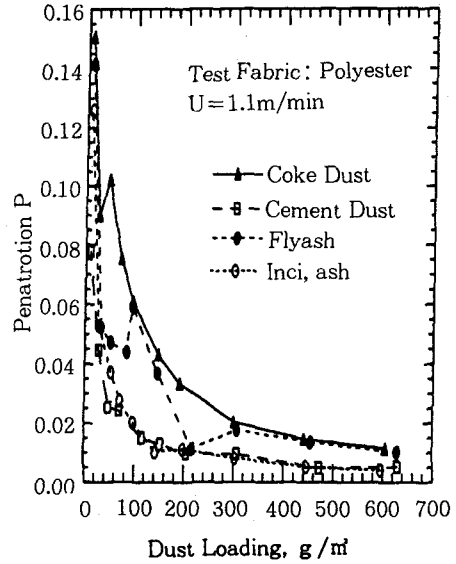


그림 8 여과포에 의한 먼지입자종류별 포집에서 먼지통과율에 대한 먼지부하의 영향

(2) 먼지포집효율

① 여과속도의 영향

앞에서 언급한 바와 같이 먼지포집효율은 먼지부하가 증가함에 따라 급격히 증가한다. 또한 먼지포집효율은 여과속도가 빠른 조건에서는 먼지부하가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향이 있으나, 여과속도가 느린 조건에서는 급격히 증가하는 경향이 있다. 따라서 여과포 표면에 퇴적된 먼지층이 어느정도 형성되어 두꺼워지면 먼지포집효율에 미치는 먼지부하의 영향은 그다지 크지 않으나 여과속도의 영향은 크다는 것을 알 수 있다(13).

② 먼지부하의 영향

그림 8에 부직포 여과포에 의한 각종 먼지입자 포집에서 먼지부하의 변화에 따른 먼지통과율(=100-먼지포집효율)의 변화 경향

을 나타냈다. 그림에서 보면 먼지포집 초기단계인 먼지부하가 낮은 조건에서는 먼지포집효율이 낮으나 먼지부하가 증가하면서 급격히 감소하다가 어느 정도의 먼지부하 이상에서 부터는 일정해지는 경향이 있음을 알 수 있다. 실험에서 확인 한 바와 같이 여과포집진기술에서 연소기체나 오염기체에 함유된 먼지입자는 먼지포집 초기단계에서는 여과포에 의해서 일부분만 포집되고 대부분 여과포 표면에 퇴적된 먼지층에 의해서 포집되는 것으로 나타났다(14). 따라서 여과포 자체만으로는 높은 먼지 포집효율을 기대할 수 없다. 탈진 직후에도 포집효율은 저하되며, 어느정도 여과시간이 경과하여 먼지층이 형성되면서 부터 포집효율이 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타난다.

2.3 여과포의 종류

초기에는 여과포집진장치에 면 또는 양모 등의 천연섬유를 소재로 한 여과포가 주로 사용되어 왔는데, 각종 합성섬유가 개발됨에 따라 합성섬유들이 갖고 있는 우수한 특성이 여과포에 적용되므로 급속하게 천연섬유에서 합성섬유로 전환되었다. 그러나 특수한 분야에서는 탈진효율, 먼지포집효율, 제전성 및 천연섬유만이 갖고 있는 특성을 살려서 제조된 새로운 합성섬유가 사용되고 있다. 연소장치 및 폐기물소각로, 먼지발생공정에 설치하여 운용되고 있는 여과포집진장치에 대표적

으로 사용되는 여과포의 종류와 특징을 요약하여 표 2에 나타냈다(15). 여과포 제조 및 직조기술이 개발 또는 개선되어 여과포의 품질개선과 생산가격 인하에 큰 공헌을 하고 있다. 최근 내열, 내산성 및 내알칼성이 우수한 여과포가 개발되고 있다. 유해기체가 높은 농도로 발생하는 폐기물 소각로 및 먼지 포집 조건이 열악한 공정에 적용이 가능한 여과포 재질로는 Polytetra Teflon, Expanded PTEE Rastex, Polyimid P84, Glass 등이 있다. 폐기물소각로외에 연료의 연소공정 및 열공급 시설에는 Nomex나 Connex, Glass, Ryton 등을 주로 사용되고 있으나 가격이 고가인 Tefare도 사용되고 있다.

표 2. 여과포집진장치용 여과포 종류별 물리적 화학적 특성

Fabric	Temperature Limitations ℃	Specific Gravity	Weight g/m ²	Acid Resistance	Alkali Resistance	Face Velocity m/min	Bag Life Year	Cost Factor ^a
Nomex ^a	204	1.38	480	Fair	Good	1.0-1.2	1-2	3.4
Connex ^b	204	1.38	480	Fair	Good	1.0-1.2	1-2	3.4
Teflon ^c	260	2.30	770	Exellent	Exellent	1.0-1.5	3-4	20.0
Rastex ^d	260	1.60	610	Exellent	Exellent	1.0-1.5	2-3	3.0
Glass ^e	270	2.54	800	Very Good	Fair	0.5-0.9	1-2	1.0
P84 ^f	260	1.41	545	Very Good	Exellent	1.0-1.5	2-3	7.0
Tefaire ^g	260	2.21	170	Exellent	Exellent	1.0-1.5	2-3	16.0
Ryton ^h	180	1.38	550	Fair	Good	1.0-1.2	1-2	1.5

Note : ^aCalcurted Using The Data From The Domestic Textile Company.

^bAromatic Aramid Fibers.

^cFluorocarbon Fibers.

^dPolytetrafluorethylene Fibers.

^eGlass Fibers.

^fPolyimid Fibers.

^gBlend of 85% Fluorocarbon Fibers and 15% Glass Fibers.

^hPolyphenylene Sulfide

2.4 탈진방식

여과포집진기술에서 장치의 종류는 탈진방식에 따라 구분할 수 있으며, 탈진방식은 크게 나누어 진동탈진방식, 역기류탈진방식, 충격기류탈진방식으로 나눌 수 있다. 탈진은 연소기체나 배출기체에 함유된 먼지를 여과포로 포집할 때 여과포표면에 형성된 먼지층을 주기적으로 털어내는 작업을 말한다. 여과조작이 진행되면서 먼지층은 점차 두꺼워져 먼지층을 통과하는 기체의 저항이 증가하게 되며, 이로 인해 압력손실이 높아져 결국 정상적인 운전이 불가능하게 된다. 따라서 압력손실을 일정하게 유지하여 정상적인 운전을 하기 위해서는 여과포표면에 어느 정도의 먼지층이 퇴적되면 이 먼지층을 물리적인 운동이나 에너지를 가하여 털어내야 한다. 여과포집진기술은 탈진방식에 따라 구조나 특징이 현저하게 차이가 난다(16, 17).

(1) 진동탈진방식

진동탈진방식은 여과포의 상단을 수평방향이나 수직방향으로 매분 수십회 또는 수백회 정도의 주파수로 요동시켜 여과포의 내부에 부착된 먼지층을 털어내는 것으로, 진동형식과 탈진의 회수는 여과포에 포집되는 먼지의 특성에 따라 좌우된다. 이 방식에서는 기체의 유입이 차단된 상태에서 탈진조작이 수행되어야 하므로 연속집진조작을 수행하려면 장치 전체를 여러개 단위실로 구획화시켜야 한다. 각 단위 집진실의 입구와 출구에 Damper를 설치하여 탈진조작 기간동안 입구와 출구측을 밀폐시켜야 효율적인 탈진조작이 가능하다. 이 방식에는 여과포로 직포인 유리섬

유가 대부분 사용되고 있다.

진동탈진방식은 부착성이 강한 먼지의 탈진성능이 극히 불량하고 기계적인 조작으로 인해 여과포의 손상이 쉽게 발생하는 단점이 있다. 특히 여과포의 손상은 여과포의 상단의 Clamp로 고정된 부분에서 빈번히 발생한다. 또한 여러개의 단위집진실 구조로 설치해야 연속집진조작이 가능하므로 집진장치의 설치면적이 많이 소요되는 단점이 있다.

(2) 역기류탈진방식

역기류탈진방식에서는 처리기체의 유입방향과 반대로 저압의 공기를 불어넣어 여과포 내부에 부착된 먼지층을 여과포에서 분리시켜 하부의 저장조로 하강시킨다. 이 탈진방식의 운전도 진동탈진방식과 마찬가지로 처리기체의 유입이 차단된 상태에서 탈진조작이 수행되어야 하므로 연속 운전을 위해서는 장치 전체를 여러개의 단위집진실로 구획화하여야 한다. 각 단위집진실은 집진조작과 탈진조작이 번갈아 별도로 수행되어야 연속운전이 가능하다. 이 방식에서 사용되는 여과포는 대부분 직포인 유리섬유이며 부직포도 사용되는 경우가 있다. 여기에 사용되는 부직포는 비교적 공극율이 크고 유연성이 있으며 여과포의 무게가 $300 \sim 450 \text{ g/m}^2$ 인 것이 선정되고 있다.

역기류탈진방식은 탈진조작시 탈진에 소요되는 에너지가 적고 여과포에 물리적으로 가해지는 강도가 극히 낮아 여과포의 수명이 길다는 장점이 있다. 단점으로는 탈진조작과 집진조작이 별도로 수행되어야 하므로 장치 설치에 소요되는 면적이 넓다는 점을 들 수 있다.

되는 경우가 있다. 여기에 사용되는 부직포는 비교적 공극율이 크고 유연성이 있으며 여과포의 무게가 300~450 g/m²인 것이 선정되고 있다.

역기류탈진방식은 탈진조작시 탈진에 소요되는 에너지가 적고 여과포에 물리적으로 가

해지는 강도가 극히 낮아 여과포의 수명이 길다는 장점이 있다. 단점으로는 탈진조작과 집진조작이 별도로 수행되어야 하므로 장치 설치에 소요되는 면적이 넓다는 점을 들 수 있다.

표 3. 탈진방식별 여과포집진기술의 분류와 특성

탈진 방식	적용 여과포			여과 방식	여과속도 m/min	기 체 온 도 (°C)	특징 또는 주요용도
	종류	형상	재료				
진 동 탈 진	직 포	원통형	합성섬유	내면 여과	0.6~1.6	~200 (내열 Nylon)	<ul style="list-style-type: none"> 소용량에서 대용량까지, 또는 일반환경집진에서 고온집진까지 적용 Fume(전기로 배가스) 집진에 적용
		봉투형			1.0~1.5	~100	<ul style="list-style-type: none"> 소용량(수+M³/min) 등의 소형간이집진장치에 적용
충 격 기 류 탈 진	부직포	원통형 (봉투형도 적용)	합성섬유	외면 여과	0.9~1.5	~200 (내열 Nylon)	<ul style="list-style-type: none"> 탈진 및 집진조작 동시가능 공기수송 장치용 고체-기체 분리용 등, 고농도 마모 배관에 적용
	직 포	원통형	Glass 섬유		0.5~1.5	~250 (Glass섬유)	<ul style="list-style-type: none"> 미분탄연소보일러 등 고온기체 여과에 적용
	부직포	캐트리지형	합성섬유 또는 종이포		0.3~1.0	~140	<ul style="list-style-type: none"> 빠른 여과속도에 적용 작업장 공기 정화용(공기 청정, 건전지공장, 납먼지포집)에 적용
	소 결 노 재	원통형	금속섬유 또는 Ceramic		외면 여과	0.5~1.5	~450 ~1,200
역 기 류 탈 진	직포 또는 부직포	원통형	Nylon 등 부직포	내면 여과	0.6~1.2	~200 (내열 Nylon)	<ul style="list-style-type: none"> 시멘트 제조, 철강업에 적용
			Glass 섬유		0.3~1.0	~250	<ul style="list-style-type: none"> Carbon Brack, 비철정련 고온Fume에 적용
	부직포	봉투형	합성섬유	외면 여과	1.0~2.0	~140	<ul style="list-style-type: none"> 철물사처리 등 탈진조작이 용이하고, 대용량에 적용

충격기류탈진방식은 부직포 여과포의 사용으로 단위 처리기체 용량당 설치면적이 다른 탈진방식에 비해 적게 소요되는 장점을 지니고 있어 국내 산업체에 설치되어 운용되고 있는 여과포 집진장치의 탈진방식은 대부분이 이 방식을 적용하고 있다. 또한 부직포 여과포 적용으로 인해 전면여과가 가능하여 여과속도를 직포 여과포에 비해 2~3배 정도 빠르게 채택할 수 있는 장점이 있다. 반면 탈진조작시 탈진강도가 강하여 여과포에 가해지는 에너지가 다른 탈진방식에 비해 훨씬 강하여 여과포 수명이 짧은 단점이 있다.

표 3에 탈진방식별 여과포집진기술의 분류와 특성을 요약하여 정리하였다(18).

3. 기술개발동향

3.1 고효율 여과포 개발

배가스 처리용 여과포는 먼지 특성에 관계없이 탈진능력이 우수하고, 내열성, 내산성, 내알칼리성 등이 우수해야 하며, 비흡습성이며, 기계적강도가 강하고, 비정전성 여과포로 고효율 여과포를 판단할 수 있으며, 또한 압력손실이 낮아야 하며, 집진효율이 높아야 한다. 선진국에서 이와 같은 여과포를 개발하기 위해 많은 연구를 수행하고 있다.

(1) 저압력손실용 단일섬유 형상개발

여과포는 여과포집진장치에서 심장부이어서 선진국에서는 고효율 여과포를 개발하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 즉 여과포 재질 특성 강화, 압력손실이 낮은 여과포의 구조, 고온재료 개발 및 신섬유 개발 등의 분

야이다. 여과포에서는 섬유특성이 여과성능에 미치는 영향에 대한 연구중에서 여과포를 구성하는 단일섬유의 형상에 대한 연구가 대체적으로 많이 수행되고 있다. 여과포를 구성하는 단일섬유의 형상에 대해서 연구한 결과, 원형 단일섬유로 제조한 여과포의 압력손실 및 먼지포집효율이 타원형의 단일섬유로 제조한 여과포 보다 우수했다. 그러나 Y형 모양의 단일섬유로 제조한 여과포에 비해서는 우수하지 않은 것으로 확인되었다. 또한 압력손실을 가능한 낮게 유지하기 위해 단일섬유가 가능한 미세하고 가늘며 찌그러진 형상을 제조하는 연구가 계속 진행되고 있다. 현재 Y형 모양의 단일섬유로 개발된 재질은 내열 Polyimide계 섬유이며, 이 섬유는 특성상 원료를 용융하며 단일섬유로 방사할 때 냉각되면서 섬유의 형상이 Y형으로 변형된 것으로 밝혀졌다(19, 20).

(2) 고효율 국산 여과포 개발

최근에 와서 한국에너지기술연구소가 (주)우다는 환경공학기술개발사업(G-7)의 일환으로 공동 연구를 수행한 결과를 토대로 산업체 업종별 배출되는 기체 및 먼지 특성에 따라 포집 및 탈진에 적합한 여과포를 개발하였다. 개발된 여과포의 종류는 3종으로 제전사여과포, 고강력저진도여과포, 고온사여과포이다(20). 제전사여과포는 포집먼지의 포집효과 향상, 먼지 폭발에 의한 위험성 제거, 여과포의 눈막힘 방지 등의 먼지 포집조작시 안전성 및 장해 요소제거와 성능 향상을 목적으로 개발되었다. 적용 산업공정은 시멘트 제조업의 원료분쇄공정과 소성용 석탄 분쇄

공정, 제철 제강업의 코크스 제조 공정, 미분탄 화력발전소의 미분탄 분쇄 공정 등이다. 제전사여과포는 각 공정에서 발생된 먼지가 입자와 입자와의 충돌 마찰 및 배관과의 마찰로 인해 정전기 발생 우려가 큰 특성이 있는 공정에 대전 방지 효과와 먼지 포집 성능을 향상시킬 목적으로 적용한다.

고강력저신도여과포는 탈진공기 분사에 의한 여과포 직조 구조 변형을 최소화 시켜 변형된 여과포의 세공을 통해 먼지입자의 통과를 방지하고자하는 목적으로 개발한 여과포로서 먼지 포집효율의 상승과 탈진효율 증대 및 열악한 조건에도 적용이 가능한 특징이 있다. 개발된 고강력저신도여과포와 이와 특성이 동일한 독일산 여과포와의 물리적 특성을 비교한 결과에 의하면, 인장강도는 길이방향에서는 거의 비슷하나 폭방향에서 독일산보다 우수했다. 인장신도는 폭방향에서는 거의 비슷하나 길이방향에서는 더 우수하였다. 먼지포집조작 및 먼지층이 형성되는 여과포 외부는 다른 섬유에 비해 단일섬유의 표면적이 넓은 여과포로 직조하여 표면여과와 먼지층의 유리효과가 상승되도록 한 여과포이다.

고온사여과포는 포집먼지의 특성상 먼지층이 여과포에서 유리가 잘 되지 않는 먼지를 다량 배출하는 산업공정에 적용할 목적으로 개발되었다. 고온사 여과포는 섬유의 재질이 Aromatic Polyimide를 특수한 직조 방식을 적용하여 제조된 여과포로서 폐기물 소각 공정, 화학섬유 제조 공정, 유리 용해 공정 등 고온여과공정에 적용할 목적으로 개발되었다.

현재로서는 개발된 여과포 종류별 적용 대상 산업공정별 실험을 통해 여과포의 물리적, 화학적 변화 특성 및 먼지입자 통과 특성을

규명하여 여과포 직조에 반영, 개발 여과포의 성능을 향상시키는 연구가 계속 수행되고 있다.

(3) 탈진여과포의 개발

미국의 North Dakota 대학의 에너지-환경 연구소(EERC)에서는 여과포에서 먼지와 NO_x를 동시에 제거하기 위한 목적으로 여과포를 구성하는 단일섬유 및 표면에 특수한 표면처리(Coating)용 촉매를 개발하기 위한 연구가 진행중에 있다(21).

(4) 금속섬유 개발

종래의 금속섬유는 섬유를 구성하는 단일섬유의 직경이 30 μ m 이상이어서 고효율 여과포로 볼 수 없었다. 그러나 최근에 와서는 금속 단일섬유의 직경을 가능한 미세하고 가늘게 방사할 수 있는 기술을 개발하여 금속섬유를 제조하고자 하는데 중점적으로 연구가 수행되고 있다. 섬유의 재질이 Stainless Steel인 경우에는 내열특성상 1,450°C가 용점이기 때문에 섬유가 미세하고 가늘수록 고온 조건에서 강도가 저하되는 특성이 있어, 배가스 처리용으로는 400°C까지 적용이 가능한 것으로 나타났다(19).

3.2 연소기체 조건 조절 기술 개발

여과포집진장치의 성능을 향상시키기 위해 장치의 입구에서 연소기체 조건 조절제인 SO₃와 NH₃를 분사하여 먼지포집효율을 상승시키기 위한 연구가 진행중에 있다. 연소기체 내로 분사하는 SO₃와 NH₃의 농도 변화에 따라서 미국에서 생산되는 탄종별 먼지통과율

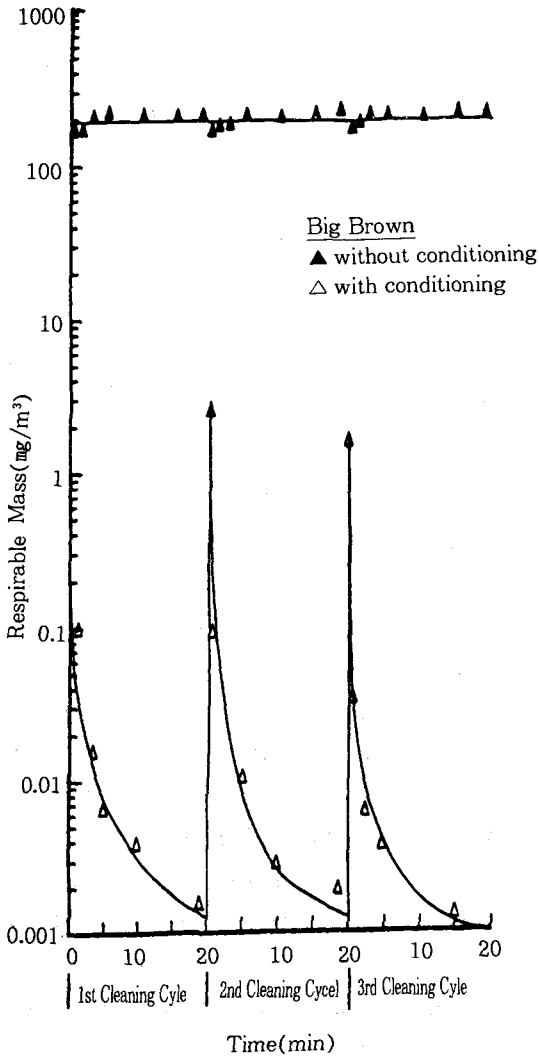


그림 9 연소기체를 조절하지 않은 조건과 조절한 조건에서의 탈진주기에 따른 압력손실 변화 특성

의 변화와 탈진특성 변화에 대한 실험결과를 토대로 연소기체 조절제의 조건을 결정하는 연구가 현재 수행중에 있다. 실험의 일부인 Big Brown 석탄에 실험결과를 보면, 연소기체내로 SO₃ 12ppm, NH₃ 45ppm을 분사하여

조절한 조건과 연소기체를 조절하지 않은 조건에 대해서 탈진주기 변화에 따른 호흡기로 유입되는 입자크기의 먼지농도(Respirable Mass)의 변화를 그림 9에 나타냈다. 여기서 호흡기로 유입되는 입자크기 농도는 ACCGIH(American Council of Governmental and Industrial Hygienists)에서 규정하고 있으며, 정의에 대해서 표 4에 나타냈다(22).

실험결과에 나타난 바와 같이 연소기체를 조절하지 않는 조건에서는 호흡가능한 입자의 농도가 약 200mg/m³으로 계속 유지되었으나, 연소기체를 조절제로 조절한 조건에서는 평균 0.1mg/m³ 정도로 연소기체를 조절하는 조건이 조절하지 않는 조건에 비해 먼지농도는 극히 낮은 농도로 유지되는 것을 확인되었다(22).

표 4. ACCGH Respirable Mass Definition

Aerodynamic Diameter μm	Respirable Mass Fraction %
2.0	90
2.5	75
3.5	50
5.0	25
10.0	0

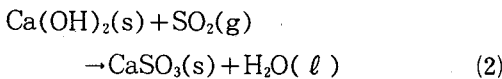
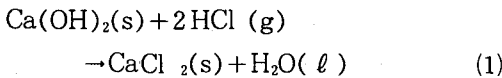
3.3. 먼지층에 유해기체/중금속 물질/먼지 동시 제거용 여과포집진기술 개발

(1) 유해기체/먼지 동시 제거

유황성분을 다량 함유한 연료를 연소시키거나 폐기물을 소각시키면 먼지 뿐만 아니라 유해기체인 HCl과 SO₂도 다량 배출된다.

기존의 방식에서는 습식 스크러버를 이용하여 유해기체를 제거했으나 습식 유해기체 제거장치는 폐수처리 및 장치부식 문제가 심각할 뿐만 아니라 건식에 비해 운전유지비가 고가로 소요되는 단점이 있어 최근에 와서는 건식인 여과포집진기술을 이용한 HCl, SO₂ 및 먼지를 동시제거하는 기술을 개발하여 산업체 현장에 적용하고 있다.

이 기술은 여과포집진장치 전단에서 SO₂를 흡수 제거하기 위한 흡수제를 미리 분산시켜 여과포 표면에 흡수제층으로 형성시킨 후 연소기체를 통과시키면 흡수제층은 HCl 을 식(1), SO₂은 식(2)와 같이 흡수 제거된다. 또한 먼지입자도 흡수제 층에 의해 포집 제거된다.



흡수제층에 의한 유해기체 흡수 제거성능은 다음과 같은 영향인자에 의해 좌우된다고 보고하고 있다.

- 장치입구에서의 화학량론비(미반응 흡수제의 mole/HCl 또는 SO₂의 mole)
- 흡수제의 반응도
- 연소기체의 수분함유량 및 온도
- 연소기체중에 함유된 먼지의 물리적, 화학적 특성
- 장치에 유입되는 HCl 과 SO₂의 농도
- 장치의 설계 및 운전 변수

흡수분사장치가 설치된 여과포집진장치를 폐기물 소각공정에 설치하여 당량비의 변화에

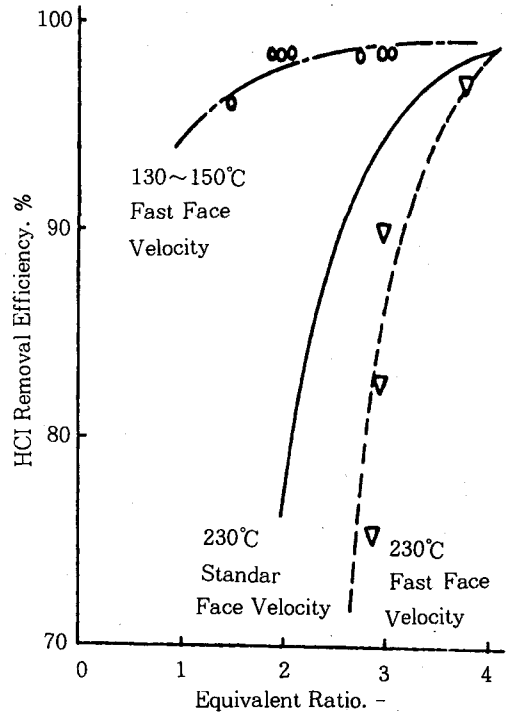


그림 10 여과포집진장치에서 당량비 변화에 따른 HCl 제거 특성

따른 HCl 의 제거율을 여과속도와 연소기체의 온도의 변화에 따라 측정된 결과의 한예를 그림 10에 나타냈다(23). 그림에서 보면 연소기체의 온도가 낮고 당량비가 증가하면 HCl 의 흡수 제거효율이 높은 것으로 나타났다. 또한 장치에 유입되는 연소기체의 온도를 230°C에서 130~150°C 정도의 범위로 저하시키면 여과속도에 관계없이 HCl 의 제거효율은 대단히 높게 유지되는 것으로 나타났다.

그림 11은 여과포에 흡수제층이 형성되는 시간의 변화에 따라 SO₂ 제거율에 대한 실험한 결과를 나타냈다. 여기서 당량비는 2.5로 유지했고 실험장치는 Lab-Scale 실험장치에

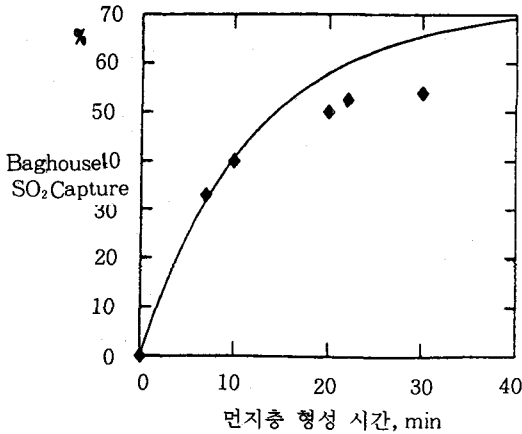


그림 11 여과포에 퇴적되는 흡수제 먼지층의 형성시간 변화에 따른 SO₂ 제거 특성

서 실험한 결과이다(24). 그림에서 보면 먼지층이 형성되는 시간이 경과함에 따라 SO₂의 제거율이 계속 증가하다가 먼지층 형성시간이 30분 이상에서 부터는 변화율이 적은 것으로 나타났으며, 먼지층에 의한 SO₂ 제거율은 약 50~60% 정도로 나타났다. 따라서 장치의 전단에서 흡수제 주입에 의해 흡수제 제거되지 않는 SO₂는 여과포에 퇴적된 먼지층의 미반응 흡수제에 의해 다시 제거되므로 SO₂의 제거는 고효율로 유지가 가능하다는 것을 알 수 있다.

(2) 중금속물질/먼지 동시 제거

폐기물 소각이나 연료의 연소시 연소기체중에 함유된 대표적인 중금속 물질은 납(Pb), 카드뮴(Cd), 수은(Hg) 등이다. 특히 연소기체중에 함유된 수은은 약 90%가 염화제1수은(HgCl₂)으로 존재하는 것으로 생각하고 있지만, 연소기체 온도가 200~300°C

범위에서는 대부분이 기체상태로 존재한다. 또한 집진기술을 여과포집진기술로 적용할 경우 장치에 유입시키는 연소기체 온도를 저하시키면 여과포 표면에 형성된 먼지층에 의해 흡수 또는 흡착에 의해 제거된다고 보고하고 있다. 유동층소각로에서 발생된 유해기체 및 중금속 물질, 먼지를 동시 제거하기 위해 여과포집진장치 전단에는 첨가제공급장치, 후단에는 탈질촉매장치가 설치된 배가스 처리시스템에서 여과포의 먼지층에 의한 중금속 물질 제거에 대한 측정결과를 그림 12에 나타냈다(25). 그림에서 보면 납과 카드뮴은 연소기체의 온도가 190°C 이하에서는 먼지층에 거의 99% 이상 포집되었고, 이 때 장치의 출구에서 납의 농도 0.1mg/Nm³, 카드뮴의 농도는 0.01mg/Nm³ 이하로 측정되었는 것으로 보고 했다. 이와 같은 결과는 여과포의 표면에 형성된 먼지층에서 흡착작용 등에 의해 효과적으로 제거된 것으로 추정하고 있다. 저비점 성분인 수은은 연소기체가 190°C 정도에서는 기체상태로 존재하므로, 먼지층에 의한 수은의 포집은 어렵다. 그러나 연소기체의 온도를 170°C 이하로 유지하므로써 수은을

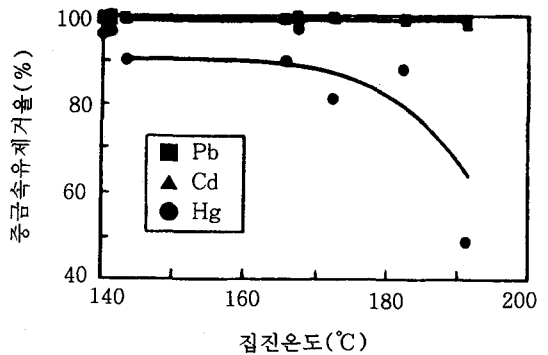


그림 12 여과포집진장치에서 운전온도 변화에 따른 중금속 물질 제거 특성

약 90% 이상 포집 제거가 가능한 것으로 확인되었으며, 이 때 여과포집진장치의 출구에서 수은의 농도는 0.02mg/Nm³ 이하로 측정되었다. 따라서 중금속 물질도 장치에 유입되는 연소기체의 온도를 적정하게 유지하면 여과포에 형성된 먼지층에 효과적으로 포집할 수 있다는 것이 확인되어 선진국에서는 중금속 물질이 다량 함유된 배가스를 처리하기 위해 여과포집진기술 적용이 활발히 진행되고 있다.

3.4 전기/여과포집진장치 개발(Electrostatically Stimulated Fabric Filtration)²⁸

여과포집진기술에 정전효과를 병용하는 방식은 새로운 기술이 아니다. Air Filter의 섬유 충전층에 의한 하전입자의 포집효과에 관한 연구는 오래전 부터 수행해 왔다. 그러나 석탄 등 연료 연소시 발생하는 연소기체 처리용 여과포집진기술에 전기집진기술을 병용하는 방식은 새로운 기술을 개발한다는 의미에서 연구가 진행 중에 있다.

(1) 예비하전여과포집진기술(Precharger/Fabric Filter)

예비하전여과포집진기술은 장치의 입구 배관내에 먼지입자 Precharger를 설치하여 연소기체 중에 함유된 먼지입자를 코로나 방전에 의해 전기적인 전하를 부여한 후 여과포로 포집하는 기술이다. 이 기술에 관한 연구는 두개의 집진실로 구성된 탈진방식이 진동 탈진방식인 여과포집진장치의 입구 각 배관에 Tube-Wire Precharger를 설치하여 실험을 수행하였다. 코로나 방전극에서 전압의 인

가는 직류 음극로나 방식을 이용하였다. 이 기술을 이용한 실험 결과를 그림 13에 나타냈다(26). 그림에서 보면 기존의 방식에서 압력손실은 운전시간이 경과함에 따라 계속 증가하는 경향을 나타내고 있으나, Precharger가 설치된 조건에서 압력손실은 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 연소기체에 함유된 먼지층에 전기적인 전하를 부여하므로써 미세한 입자들은 큰 입자에 접촉 응집하므로 인해 여과포

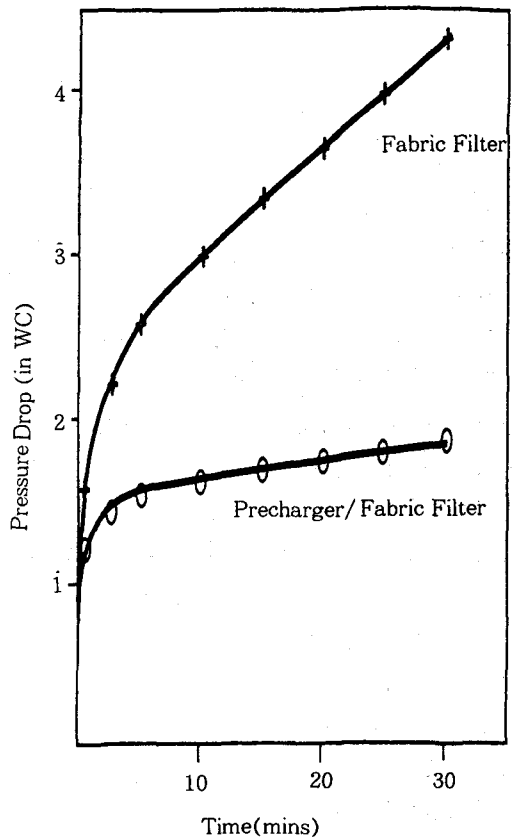


그림 13 기존여과포집진장치와 예비하전여과포집진장치에서의 운전시간 변화에 따른 압력손실 변화 특성

표면에 형성된 먼지층의 세공율이 커졌기 때문이다. 이로 인해 처리기체의 통과저항이 기존의 방식보다 적어 압력손실이 낮다. 예비하전여과포집진기술을 적용하므로서 압력손실이 기존의 기술보다 약 60% 정도 저하되므로 인해 동력비를 0.56W/ft³ 정도 절감 효과가 있다고 보고했다. 현재 여과포에 형성된 먼지층의 세공율을 더욱더 크게 하여 압력손실을 낮추므로서 빠른 여과속도를 적용하여 장치의 설치비 절감과 동력비 절감효과를 최대화시키고자하는 연구가 계속 진행중에있다.

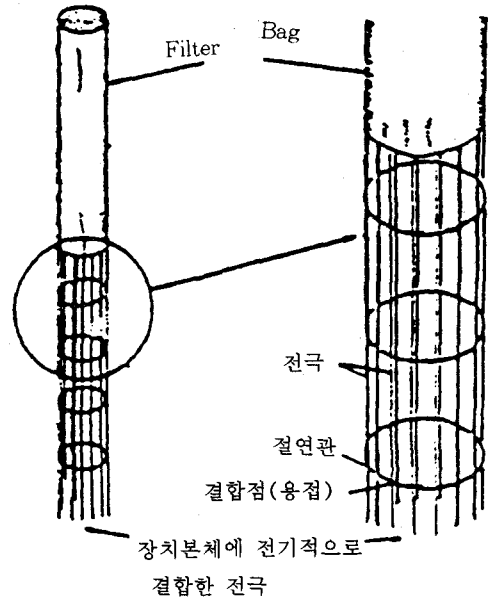


그림 14 충격기류 탈진방식의 정전여과포집진장치의 전극 구조

(2) 정전여과포집진기술(Electrically Stimulated Fabric Filter)

충격기류 탈진방식의 여과포집진장치에는 필수적으로 여과포지지를(Bag Cage)이 필요하다. 정전여과포집진기술은 여과포지지를 전극으로 사용하여 전압을 인가하므로서 외부의 여과포에 전계를 형성하는 방식이다. 여과포에 번갈아 전압을 인가할 수 있는 전극을 배치하여 전기력선이 여과포 표면에서 평행하게 형성시킬 수 있다. 충격기류 탈진방식에서는 여과포 내부에 전극을 설치하는 방식으로 그림 14에 나타냈다. 그림 15에 기존의 기술과 정전여과포집진기술에 대한 압력손실 변화경향을 운전시간의 변화에 따라 나타냈다(26).

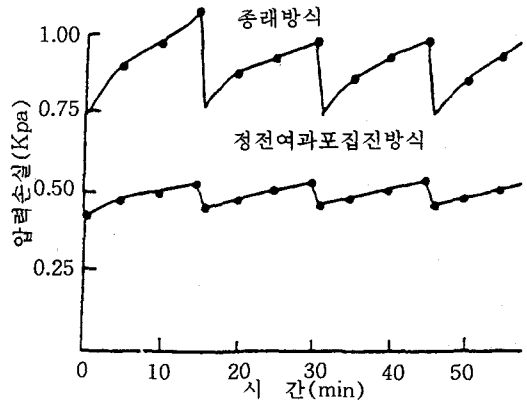


그림 15 여과포집진기술의 기존방식과 정전여과방식에서의 운전시간 변화에 따른 압력손실 변화 특성

실험결과에 의하면 정전여과포집진기술을 적용하므로서 여과속도를 기존의 기술에 비해 1.5배 정도 빠르게 적용할 수 있고, 연간 운전 유지비도 약 30% 이상 절감효과를 얻었다고 보고 했다.

산업용으로 사용되고 있는 전기집진기술은 일반적으로 하전부와 집진부를 동일한 전계 내에 설치하여 운전하고 있는 방식이다. 따라서 여기서는 일반 전기집진장치와 같은 원리

(3) 일반식 정전여과포집진기술

를 여과포집진기술에 적용하였기 때문에 일반식이라고 명명하였다. 역기류 탈진방식인 여과포집진기술은 내면여과 방식으로 먼지를 함유한 기체가 여과포 내면으로 유입되어 외부로 통과하는 방식으로서 여과포 장치의 상부에 걸어놓은 방식이다. 일반식 정전여과포 집진기술은 여과포 중심부분에 전극선을 설치하고, 여과포는 스텐레스섬유를 혼합하여 직조한 여과포를 사용하며, 이 기술의 구조를 그림 16에 나타냈다. 이 기술을 응용하여 석탄연소 보일러에서 배출되는 연소기체 처리용으로 적용하여 실험한 결과에 의하면 압력 손실은 기존의 기술보다 현저하게 낮아졌다고 보고했다.

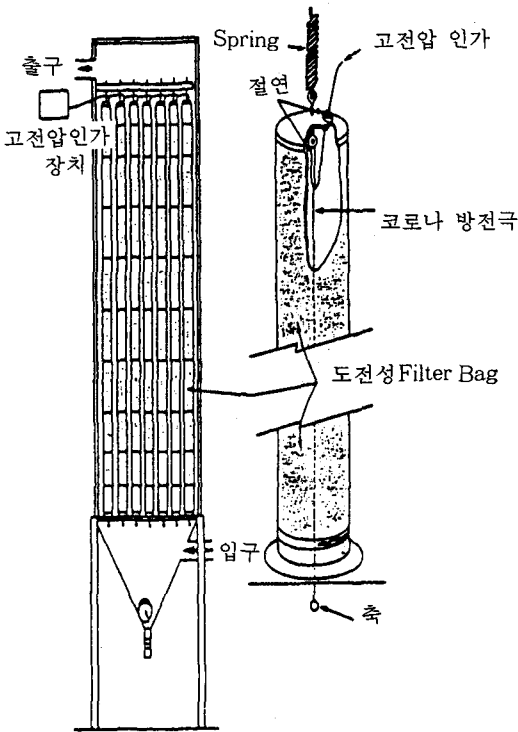


그림 16 일반식 정전여과포집진장치의 구조

3.5 고온 여과재 개발

고온 산업공정에서 배출되는 기체는 대부분이 고온으로서 열을 회수하여 다시 재 사용하여 에너지 절약 효과를 상승시키고 있다. 처리기체의 열을 순수하게 전량을 회수하기 위해서는 처리기체를 청정화하여 직접 사용하는 방법이 가장 열효율 측면에서 우수하다. 그러나 열회수 및 전환 목적으로 사용하기 위해서는 고온 처리기체(Particle Free Hot Gas)에는 먼지입자가 전혀 함유되어 있지 않아야 한다.

고온 처리기체 먼지입자가 함유되어 있으면 장치의 마모 및 입자의 침착으로 인해 장치의 수명 단축 및 열효율 저하가 심각하게 발생된다. 고온 청정 처리기체를 이용하기 위해서 고온 여과재가 설치된 집진장치를 사용한다. 그러나 고온 여과재는 고온에서 강도 저하와 탈진조작시 열충격으로 인한 여과재의 파손이 빈번히 발생되고 있는 실정이다. 따라서 선진국 및 국내 연구소에서는 견고하게 열충격에 강한 고온 여과재 개발에 많은 연구비를 투자하고 있다(27).

4. 맺음말

산업공정 및 먼지배출 공정에서 발생하는 먼지를 포집 제거하여 대기중으로 먼지의 배출을 최대화 억제하기 위한 대기오염 제어 설비로서는 세정식집진기술, 전기식집진기술 및 여과포집진기술이 주종이다. 최근에 와서 산업의 발달로 인해 발생하는 먼지의 양이 계속 증가하고 있어 먼지에 의한 대기오염이 심각해 질 것으로 예측되고 또한 현재에도

부유먼지로 인해 도심지역의 가시거리가 해가 갈수록 짧아지고 있는 실정이다. 먼지에 의한 피해는 대기오염 뿐만 아니라 인체의 호흡기로 유입되어 폐종양 및 진폐증 등의 호흡기 질환 발병의 원인이 되고 있을 뿐만 아니라 유독성 물질을 함유한 먼지입자는 피부에 접촉되어 피부질환의 발생 원인이 되고 있는 실정이다. 따라서 정부에서는 먼지에 의한 대기오염 및 인체의 피해를 최대한 줄이기 위해 먼지배출허용 기준을 단계적으로 강화하고 있다.

먼지에 의한 대기오염 방지와 인체의 피해를 최소화 시키기 위해서는 각 산업공정에 고효율집진기술이 적용되어야 한다. 최근에 와서는 고효율 집진기술로서는 여과포집진기술로 판단되어 여과포집진기술을 고성능화하기 위한 연구가 계속되고 있다. 이 기술을 고성능화하기 위한 기술개발 분야로서는 고효율 여과포 개발, 연소기체 조건 조절 기술 개발, 유해기체 및 중금속 물질, 먼지 등의 동시 제거기술 개발, 전기/여과포집진기술 개발, 고온 여과재 개발 등이다.

현재 국내의 연구소에서는 대상 산업체의 업종에 적합한 고효율여과포 개발에 성공하여 양산체제에 들어 갔으며, 고온 여과재는 현재 기초 연구용 시제품을 개발하여 시험단계에 있다.

앞으로 산업체에서 발생하는 먼지에 의한 대기오염 방지와 인체피해를 최대한으로 줄이기 위해서는 집진기술의 고효율화를 위한 다각적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

— 참 고 문 헌 —

1. W.C. Hinds, 1982, "Aerosol Technology, Properties, Behavior and Measurement of Aerborne Particles", John Wiley & Sons, New York, pp. 2~10.
2. 손재익, 박영옥, 구철오, 임정환, 1992, "대기오염 방지를 위한 분진제어기술 (I)", 과학기술처, pp. 23~39.
3. 尹伊谷剛一, 1980, "集塵工學", 日刊工業新聞社, pp. 175~192.
4. 永松定祐, 1991. 7, "廢棄物燒却爐の總合排ガス處理", 化學裝置, pp. 32~36.
5. W.C. Hinds, 1982, "Aerosol Technology, Properties, Behavior and Measurement of Aerborne Particles", John Wiley & Sons, New York pp. 211!232.
6. R. Dennis, 1977, "Collection efficiency as a function of particle size, shape and density", JAPCA, Vol 24, No. 12, pp. 1156~1163.
7. Leith, D and First M., June 1975, "Particle Collection by a Pulse-Jet Fabric Filter", 68th Annual Meeting of APCA, pp. 1~14.
8. Robert M and Bethea P.E., 1978, "Air Pollution Control Technology", Van Nostrand Reinhold Co., pp. 145~204.
9. 박영옥, 김영성, 손재익, 정태수, 1991, "유리섬유 여과포에 의한 석탄회 포집, I. 분진층의 형성과 압력손실 특성", 화학공학, Vol. 29, No. 4, pp. 463~469.
10. 박영옥, 구철오, 임정환, 손재익, 1989, "Pulse-Jet식 여과포집진장치의 여과포 성능 시험 연구 (I)", 과학기술처, p. 259.
11. 박영옥, 1989, "석탄회 포집에 있어서 유

- 리섬유여과포의 여과성능에 관한 연구”, 학위논문, p. 238.
12. Billings, C.E. and Wilder, J.E., 1978, “Handbook of Fabric Technology”, Vol. 1, GCA/Technology Division, Bedford, Mass., EPA-APTD 0690 (NTIS No. B-200-648), pp. 145~204.
 13. Leith D. First M., June 1975, “Particle Collection by a Pulse-Jet Fabric Filter”, 68th Annual Meeting of APCA, pp. 1~14.
 14. 박영욱, 구철오, 임정환, 손재익, 1990, “Pulse-Jet식 여과포집진장치의 여과포 성능 시험연구(II)”, 과학기술처, p. 201.
 15. 박영욱, 손재익, 1994, “폐기물 소각 배가스 제어기술(I), -분진제어-”, 한국폐기물학회, Vol. 11, No. 2, pp. 302~317.
 16. A.C. Atern, “Air Pollution Third Edition”, Academic Press, New York, Vol. IV, pp. 97~131, 1977.
 17. Billings, C.E. and Wilder, J.E., Handbook of filter Technology, Vol. 1, GCA/Technology Division, Bedford, Mass., EPA-APTD 0690 (NTID No. PB-200-648), pp. 145~204, 1978.
 18. 米田 乞, 池野 榮宣, 1991, “Bag Filter”, 化學工學, Vol. 55, No. 5, pp. 146~151.
 19. C. Dickenson, 1992, “Filters and Filtration Handbook”, Elsevier Advanced Technology, Oxford, pp. 63~117.
 20. 손재익, 박영욱, 구철오, 임정환, 김홍룡, 1994, “산업용 고효율 여과포집진기술 개발”, 제2차년도·연차보고서, 환경부, p. 147.
 21. Wever, F.F., Ness, S.R., Laudal, D.L., and Dunham, G. Sept, 1992. “Catalytic Fabric Filtration for Simultaneous NOx and Particulate Control”, Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota, Quarterly Technical Report, Report No. DOE/PC/90361-T8.
 22. S.J. Miller and D.L. Laudal, 1991, “Enhanced Flue Gas Conditioning Study”, Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota, Final Report, p. 193.
 23. 박영욱, 손재익, 1994, “폐기물 소각 배가스 제어 기술(II), -유해물질 제거-”, 한국폐기물학회, Vol. 11, No. 3, pp. 475~487.
 24. J.R. Ahlbeck and S. Ronnblad, 1994, “Removal of sulfur dioxide in a fabric filter”, Air & Waste, Vol. 44, pp. 413~417.
 25. Y. Shiraishi, S. Chihibu and H. Kawabata, 1994, “Technology of exhaust gas treatment system of municipal solid waste incineration plant”, 粉體工學會, 第29會 技術討論會 Text, pp. 1991~124.
 26. I. Tamori, 1988, “Recent trend of fabric filtration technique”, 公害 對策, Vol. 24, No. 2, pp. 103~110.
 27. L. Bermann, 1994, “Market potential for hot-gas media filtration worldwide”, Filter Media Consulting, Inc., p. 164.