

SB-3

여과포에 의한 분진포집기술

박영옥

한국에너지기술연구소, 폐자원연구팀

- Fabric Filtration for Particulate Matter Collection -
Park, Young-Ok
Korea Institute of Energy Research
Waste Resources Utilization Research Team

1. 서론

여과포에 의한 분진 포집기술은 다른 분진포집기술에 비해 가장 우수한 집진성능을 나타낼수 있는 집진기술로서 최근에 와서는 분진발생공정, 연소설비 및 폐기물 소각설비의 중금속 물질, 유해기체 및 분진의 동시포집 적용 등 광범위한 산업분야에 적용되어 운전되고 있다. 배출기체의懸條件과 습도가 다양 함유된 조건에서는 여과포 집진장치의 적용이 어렵다고 생각되고 있지만, 처리기체의 조건 및 포집분진의 특성에 적합한 여과포의 개발과 탈진방식(cleaning method)의 개선으로 인해 해결이 가능하게 되었다. 또한 여과포에 의한 분진포집기술은 장치를 통과하는 배출기체의 속도가 다른 집진기술에 비해 느려 여과포 면적이 상대적으로 넓어져서 장치의 설치면적이 많이 소요된다는 단점이 있으나, 여과포를 圓筒으로 봉재하여 서로 접근시켜 많은 갯수를 多端으로 배치함과 동시에 연속탈진시스템(on-line cleaning)을 채택함으로써 장치에 소요되는 면적을 최소한으로 줄이려는 연구가 계속되고 있다. 대체적으로 여과포에 의한 분진포집기술의 산업체 적용에서 장치의 압력손실은 약 100 - 200 mmH₂O 정도의 범위가 대부분이고 분진 포집효율은 거의 99.9% 에서 99.99% 정도 달성이 가능하다[1, 2, 3].

여기에서는 여과포에 의한 분진포집기술의 일반적인 개념과 최근의 연구동향에 대해서 언급하고자 한다.

2. 국내 방지시설 설치현황

환경처의 1988년도 대기오염물질 방지시설 실태조사표를 토대로 3종 이상(년간 고체연료 사용량 1,000톤 이상인 배출시설)의 국내 배출업소에 설치되어 운전되고 방지시설 설치현황을 처리기체 용량별로 정리하여 <Table 1>에 나타냈다[4]. 전국의 대기오염배출시설에 설치된 방지시설의 수는 총 24,763기로서 그 중 기타시설이 총 방지시설의 45%로 가장 많은데 이들 시설은 열공급시설에 사용되고 있는 전처리 시설이며 融化式과 乳化式 및 完全燃焼補助裝置 등이다. 기타시설을 제외한 방지시설로서는 원심력집진시설이 26% 로써 대부분이 소용량 규모에 설치되어 있으며, 여과포집진시설은 13%, 전기집진시설은 1%로써 총 설치기수가 366기이며 소용량의 규모와 대용량 규모에 설치되어 있다. 세정식집진시설은 형식 및 종류가 다양하며 대부분이 기체상 오염물질을 동시에 제거 목적으로 사용되고 있으며, 분사식세정식 집진시설이 다른종류에 비해 많이 설치하여 운전되고 있는 것으로 나타났다. 처리용량별로 보면 배출기체 처리용량이 100 m³/min 이하가 18,473기로서 총 설치기수의 75%이며, 집진시설 종류중에서 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 대용량 규모인 2,000 m³/min에 설치된 방지시설은 총 272기로 총 설치기수의 1% 정도를 차지하고 있다.

3. 여과포에 의한 분진포집의 일반적인 개념

가. 분진포집기구(particle collection mechanism)

산업체의 여과포에 의한 분진포집기술에서 주로 사용되는 여과포 종류는 직조방식에 따라 크게 나누어 직포(woven fabric)와 부직포(felt fabric)가 있다. 여과포에 의한 분진포집조작에서 여과포의 pore보다 작은 분진입자들은 대개 여과포의 pore를 구성하는 단일섬유와 여과포표면 및 분진층에 의해서 포집된다. 물리적체질(physical screening)은 여과포표면에 분진층이 형성되기 前까지 중요한 분진포집기구가 될 수 없다. Dennis는 여과포의 pore를 구성하는 단일섬유에 의한 분진입자 포집기구는 다음과 같이 5가지로 분류하였으며, 이와 같은 포집기구에 의해서 단일섬유류의 분진입자 포집효율이 결정된다고 보고한 바 있다[5].

- (1) 중력침강(Gravityational settling)
- (2) 관성충돌(Inertial impaction)
- (3) 직접차단(Direct interception)
- (4) 확산(Diffusion)
- (5) 정전기력(Electrical force)

<Table 1> 처리기체 용량별 방지시설 설치현황

(단위 : 基)

방지시설 종 류	처리기체 용량(m ³ /min)					총 계	구성비율 %
	100 이하	100 - 500	500 - 1,000	1,000 - 2,000	2,000 이 상		
重力集塵	340	73	13	8	5	439	1.77
慣性力集塵	73	33	11	1	3	121	0.49
遠心力集塵	4,289	1,801	267	97	54	6,508	26.28
音波集塵	6	1	0	0	0	28	0.11
電氣集塵	165	16	52	56	77	366	1.48
濾過布集塵	1,590	1,062	268	116	69	3,105	12.54
遠心力洗淨式	185	68	21	4	0	278	1.12
噴射式洗淨式	700	213	57	22	4	996	4.02
Venturi洗淨式	78	89	29	15	0	211	0.85
噴霧塔	311	249	67	35	19	681	2.75
吸收塔	195	122	51	8	4	380	1.53
미스트除去機	46	15	6	10	4	78	0.31
吸着塔	182	66	10	2	1	261	1.05
排出口燃燒設備	28	5	2	3	0	38	0.15
再燃燒機	40	10	3	2	4	59	0.24
凝縮設備	10	2	0	0	1	13	0.05
脫黃設備	24	0	0	0	1	25	0.11
黃酸設備	6	0	2	2	1	9	0.04
其他設備	10,158	794	112	112	54	11,167	45.09
합 계	18,473	4,643	942	399	272	24,763	100.00

나. 분진입자 통과기구(penetration mechanism)

여과포에 의한 분진포집 초기단계를 제외하고는 분진입자 포집은 대부분이 분진층에 의한 포집으로 볼 수 있다. 그러나 분진포집 조적이 수행되면서 일부분의 분진입자는 여과포와 분진층을 통과하여 빠져나간다. Lieth와 First는 여과포와 분진층을 통과하는데 기여하는 인자는 3가지로 정의하여 설명 하였다[6]. 분진입자 통과기구에 기여하는 3가지의 인자는 직통(straight through), 압출(seepage)과 불어나감(pinhole plugs)이라고 제시했다.

(1). 직 통

여과포표면에 부착된 분진층을 털어낸후 다시 분진포집 조적이 계속되면서 여과포표면에는 다시 새로운 분진층이 형성된다. 이러한 과정에서 분진입자가 여과포와 분진층에 포집되지 않고 바로 통과하는 현상을 직통이라고 말한다.

(2). 압 출

배출기체내에 함유된 분진입자들이 초기에 여과포와 분진층에 포집되고 난 후 부터 여과시간이 경과하면서 퇴적 분진층의 두께가 두꺼워짐에 따라 압력손실도 증가하게 된다. 이로 인해 여과포의 pore 크기가 커지게 되며, 커진 여과포 pore를 통해 초기에 포집되었던 분진입자들이 통과하게 되며 이러한 현상을 압출이라고 말한다. 압출에 의한 분진입자의 통과현상은 여과포에 포집된 분진이 여과포표면에 완전하게 부착되지 않고 불안정하게 부착 되었을때 대부분이 발생한다.

(3). 불어나감

퇴적분진층과 여과포에 포집된 분진입자가 잠시후에 여과포와 분진층을 통과하는 현상을 말하며, 이러한 현상은 탈진조작후 여과포의 격렬한 움직임과 변형에 의해서 대부분이 발생한다.

다. 압력손실

여과포에 의한 분진포집기술을 이용한 장치설계에서 매우 중요한 변수의 하나는 압력손실이 다. 여과포에 의한 분진포집기술에서 압력손실은 여과포와 분진층을 통과할때 발생하는 저항을

말한다. 압력손실의 크기는 배출기체의 점도, 여과속도, 여과포의 두께, 공극율(void fraction), pore size, 분진층의 두께 및 특성에 따라 좌우된다. 압력손실은 장치를 운전하기 위한 배출기체의 유입 또는 처리된 기체를 배출시키는데 필요한 송풍기의 용량을 결정하는데 중요한 요소이다[7]. 송풍기의 흡인압력을 결정하기 위한 총 압력손실은 장치의 자체의 압력손실인 여과포의 압력손실과 분진층에 대한 압력손실 및 배관에서 마찰에 의한 압력손실의 총합이며 압력손실에 영향을 미치는 영향인자는 다음과 같다.

- (1). 여과포의 종류
- (2). 여과속도(face velocity)
- (3). 분진부하(dust loading)
- (4). 탈진조건

라. 분진포집효율

여과포에 의한 분진포집기술에서 배출기체내에 함유된 분진입자의 포집은 초기단계에서만 여과포에 의해 포집이 약간되며, 대부분이 여과포표면에 퇴적된 분진층에 의해서 포집되고 있다. 즉 배출기체내에 함유된 분진입자는 분진층을 통과할 때 분진층을 이루는 분진입자에 의해서 포집된다고 볼 수 있다. 따라서 청정여과포(clean fabric)에 의한 분진포집은 높은 포집효율을 기대할 수 없으며, 탈진 직후에도 포집효율이 저하 하다가 어느정도 여과시간이 경과하여 분진층이 형성되어야 분진포집효율이 증가한다. 여과포에 의한 분진포집기술에서 분진포집효율에 미치는 영향인자는 대체적으로 다음과 같다.

- (1). 여과포의 종류
- (2). 여과속도
- (3). 분진부하
- (4). 탈진조건

마. 여과포의 종류

여과포에 의한 분진포집기술의 개발초기에는 면(cotton) 및 양모(wool) 등의 천연섬유를 소재로한 여과포가 주로 사용되어 왔는데, 각종 새로운 특성을 갖는 합성섬유가 개발됨에 따라서 합성섬유들이 갖고 있는 뛰어난 특성이 여과포에서도 적용되므로 인하여 급속하게 천연섬유에서 합성섬유로 전환되었다. 그러나 특수한 분야에서는 탈진효율, 집진효율 및 제전성 등이 천연섬유만이 갖고 있는 특성을 살려서 사용되고 있는 경우도 있다. 여과포의 제조 및 직조기술이 개발, 개선되어 여과포의 품질개선 및 생산가격의 인하여 큰 역할을 하고 있다. 구체적인 사례를 보면 seamless여과포의 제조 및 다듬질기술의 향상과 유리섬유의 가공기술개발, 압축felt여과포의 felting가공법 개량, needle punching방식에 의한 솜織needle felt의 개발 등이고, 관리기술 측면에서 통계적인 품질관리기법의 도입등을 말할 수 있다. 또한 여과포에 의한 분진포집기술의 탈진방식과 여과포의 재질선택은 불가분한 관계가 있고, 탈진방식도 세분화되어 있어 각 탈진방식별 특성도 다르다. 따라서 여과포집진장치의 성능을 최대로 발휘하기 위해서 탈진방식과 처리기체의 특성, 포집분진의 특성에 적합하도록 여과포의 재질도 세분화되어 있다.

바. 여과포의 수명

여과포의 수명은 여과포에 분진포집기술에서 운전 유지비 뿐만 아니라 장치의 성능을 좌우하는 가장 중요한 인자이다. 따라서 여과포 수명이 길게 유지하기 위해서는 여과포의 파손에 영향을 미치는 인자를 파악하여 이에 대응하는 조치를 취해야한다. 여과포의 파손은 배출기체의 성분에 의한 부식손상과 탈진 및 운전조건에 의한 마모 손상으로 크게 구별할 수 있다.

- (1). 부식에 의한 여과포 파손

배출기체중에 산성 화합물(SO_x, NO_x, HCl 등)이 다량 함유되어 있고 운전온도가 낮으면 산성 화합물을 함유한 기체는 응축하여 여과포에 접촉 체류하므로써 여과포의 강도를 약화 시킨다. 특히 방향족 polyamide계 섬유는 이산화황기체(SO_2) 분위기에서 장시간 노출하게되면 섬유의 강성력(fiber tenacity)가 저하하고 질소산화물이 존재하는 분위기에서 장시간 노출하게되어도 섬유의 강성력이 급격히 저하한다고 보고되고 있다[8]. 따라서 산성분위기에서 약화된 부분은 탈진조작에 의해 파손된다.

- (2). 마모에 의한 파손

강도가 약한 여과포를 사용한 조건에서 탈진에너지가 큰 조건에서 탈진조작을 수행하게 되면 여과포의 빈번한 탈진조작에 의해 굴절부위나 bag cage와 접촉 부위는 급격히 강도가 저하되어 파손이 발생하는 현상이다

- (3). 여과속도와 여과포의 파손

탈진방식이 진동탈진 방식이나 역기류 탈진방식에서는 여과속도를 빠른 조건에서 운전하게

되면 압력손실이 높게 유지되어 탈진주기가 짧아 빈번한 탈진조작이 수행된다. 이와같은 조건이 장시간 유지되면 앞에서 언급한 바와 같이 여과포 강도가 저하되어 수명이 저하된다.

사. 탈진방식

탈진(cleaning)은 합진기체중에 함유된 분진을 여과포에 의해 포집을 하게 되면 여과포 표면에 분진층이 형성하게 된다. 여과시간이 경과하면서 분진층은 두꺼워져 기체가 분진층의 通過抵抗 증가로 압력손실이 점차적으로 높게 유지되어 정상적인 운전이 불가능하다. 따라서 압력손실을 일정하게 유지하여 정상적인 운전을 하기 위해서는 여과포 표면에 어느정도 분진층이 형성하면 퇴적된 분진층을 물리적인 운동이나 에너지를 加하여 적절한 간격으로 여과포 표면에 퇴적된 분진층을 털어내야 한다. 이와 같은 조작을 脫塵(cleaning)이라고 하며 여과포집진기술은 탈진방식에 따라 구조나 특징이 현저하게 차이가 난다.

(1). 진동탈진 방식(mechanical shaking)

진동탈진방식의 원리는 여과포의 상단을 수평방향이나 수직방향으로 每分 수십회 또는 수백회 정도의 주파수로서 搖動시켜 여과포의 내부에 부착된층을 털어내며, Figure 3-28에 나타냈다. 진동형식과 탈진의 횟수는 여과포에 포집되는 분진의 특성에 따라 좌우된다. 이 방식의 운전은 배출기체의 유입이 遮斷상태에서 탈진조작이 수행되어야 하므로 연속집진조작을 수행하고자 하는 조건에서는 장치의 전체를 여러개의 單位室 區劃化(multicompartment) 시켜야 한다. 각 단위집진실의 입구와 출구에는 damper를 설치하여 탈진조작 기간동안은 입구와 출구측을 밀폐 시켜야 탈진조작이 수행이 가능하다.

진동탈진방식의 단점으로는 부착성이 강한 분진의 탈진성능은 극히 불량하고, 기계적인 조작으로 인해 여과포의 손상이 쉽게 일어난다. 특히 여과포의 상단, clamp로 고정된 부분에서 빈번히 발생한다. 또한 여러개의 단위집진실 구조로 설치해야 연속집진조작이 가능하므로 집진장치 설치 면적이 크게 소요 된다 것 등이다.

(2). 역기류 탈진방식(reverse air flow)

역기류 탈진방식의 원리는 배출기체의 유입방향과 반대로 低壓空氣를 불어넣어 주면 여과포 내부에 부착된 분진층이 여과포에서 분리되어 하부의 분진 저장조로 하강된다. 이 탈진방식의 운전은 배출기체의 유입이 차단상태에서 탈진조작이 수행되어야 하므로 연속적으로 운전하기 위해서는 장치의 전체를 여러실로 區劃化 시켜야 한다. 각 단위집진실의 입구와 출구에는 damper를 설치하여 탈진조작 기간동안은 입구와 출구측을 밀폐 시켜야 탈진조작이 원활히 수행된다. 장치는 여러개의 단위집진실로 區劃되도록 설계 되어야 하며, 집진조작과 탈진조작이 별도의 공정으로 수행되어야 연속운전이 가능하다.

역기류 탈진방식의 장점으로는 탈진조작시 탈진에너지가 적게 소요되어 여과포에 가해지는 강도가 극히 낮아 여과포의 수명이 길다. 단점으로는 탈진조작과 집진조작이 별도로 수행되어야 하므로 장치의 소요면적이 많이 소요된다는 것이다.

(3). 충격기류 탈진(pulse-jet cleaning)

충격기류 탈진방식의 원리는 여과포의 외부표면에 부착된 분진층을 여과포의 상부에서 순간적으로 고압의 공기를 불어넣어 그 충격력과 역기류에 의해서 탈진하는 방식이다. 이 탈진방식의 운전은 탈진조작시 집진조작은 순간적으로 정지되어 거의 연속으로 조작이 가능하여 여러개의 단위집진실이 필요 없다. 또한 이 방식은 탈진강도가 강해 부직포 여과포에 유효하므로 이 탈진방식의 개발과 더불어 부직포 여과포가 보급되기 시작하였다.

충격기류 탈진방식의 장점으로는 부직포 여과포 사용으로 인해 다른 탈진방식에 비해 단위처리기체 용량당 설치면적이 적게 소요된다. 부직포 여과포의 적용으로 인해 全面濾過가 가능하여 여과속도를 다른 직포 여과포에 비해 2 - 3배 정도 빠르게 할 수 있는 특징이 있다. 단점으로는 탈진강도가 강하여 여과포의 강도가 저하되어 수명이 다른 탈진방식에 비해 짧다. <Table 2>에 여과포에 의한 분진포집기술의 탈진방식에 따라 적용되는 여과포의 종류를 요약하여 나타냈다.

4. 여과포에 의한 분진포집기술의 최근 연구동향

가. 코로나 하전 여과포집진장치 개발

최근에 미국에서는 여과포에 의한 분진포집기술의 성능을 향상 시키기위해 전기집진이론을 적용한 여과포집진장치의 개발에 대한 연구가 중점적으로 수행되고 있다. 원리는 여과포 내부에 코로나 방전극을 설치하여 집진조작시 분진입자에 전기적인 하전을 부여하여 하전된 분진입자를 여과포로 포집하는 것이다. 분진입자에 전기적인 하전을 부여하게 되면 분진입자는 서로 응집하게 되며, 응집된 분진은 여과포 표면에서 분진층을 형성하게 된다. 여과포 표면에 부착된 응집분진은 분진층의 공극율이 커서 기체의 통과저항이 적어 압력손실이 작게 걸리고, 미세한 분진입자는 서로 응집되어 여과포에 의해 포집이 용이하여 분진포집효율을 상승시키게 된다. 코로나 하전

여과포집진장치 개발은 탈진방식이 역기류 탈진방식과 충격기류 탈진방식에 적용하여 연구가 진행되고 있다[9].

<Table 2> 탈진방식에 따른 특성비교

탈진방식	사용 여과포	여과속도 m/min	여과포형상	특 징
진동탈진	織 布 Cotton, Wool Polyester Glassfiber	0.5 - 2.0	원통형	탈진성능 우 수
역기류탈진	織布, Felt Cotton, Wool Polyester Woven glassfiber Glassfelt	0.5 - 2.0	원통형	저에너지 탈 진
충격기류 탈 진	Felt Nomex [®] , Teflon Tefaire [®] , Ryton [®]	1.0 - 3.0	원통형	장치소형화 가. 능 Bag cage설치

나. 여과포 집진기술의 발전용량에 적용

미국, 캐나다 및 호주 등에서는 분진 배출허용 농도의 규제치 강화와 탈황설비비 및 운전 유지비가 고가로 소요되어 저유황탄 사용하는 지역에서는 집진장치를 전기집진장치 대신에 여과포 집진장치로 대체하여 운전하고 있다. 저유황탄은 연소시 발생하는 비산회는 전기저항치가 높아 전기집진장치에 의한 분진포집효율이 급격히 저하 되고 있어 여과포집진장치의 채택이 불가피한 실정에 있다. 특히 탄종의 변화 및 연료의 성상의 변화가 심한 호주의 경우는 석탄화력발전소에 여과포집진장치의 적용이 증가 추세에 있다. 여과포집진장치와 전기집진장치의 설치비용을 분진배출농도 변화에 따라 비교해 보면 출구에 분진배출농도를 낮게 유지하기 위해서는 전기집진장치에서는 설치비가 많이 소요되나 여과포집진장치의 경우는 출구의 분진배출농도에 관계없이 일정한 특성이 있다[10].

다. 유해기체 및 분진의 동시포집에 적용

산업폐기물 혹은 도시 폐기물의 소각로에서는 폐기물 소각시 분진 뿐만 아니라 유해기체도 발생된다. 따라서 대부분의 산업체에서는 유해기체와 분진을 포집하기 위해 습식집진설비를 설치하여 운전하고 있다. 그러나 습식에 의한 유해기체 및 분진의 포집은 장치의 부식으로 인한 장치의 수명저하와 폐수처리비가 추가되어 건식에 비해 운전 유지비가 과다하게 소요되는 실정이다. 따라서 선진국에서는 소각로에서 배출되는 분진 및 유해기체를 동시에 처리하기 위해 건식을 채택하고 있다. 이 방식은 여과포집진장치의 입구에서 미리 흡수제를 유입하여 여과포 표면에 precoating을 시키고 난후 소각로에서 배출된 연소기체를 유입시키면 흡수제에 의해 유해기체가 접촉 흡수됨과 동시에 분진도 포집된다. 유해기체의 흡수율 향상과 유해기체에 의한 여과포의 파손을 방지하기 위해서 다음과 같은 사항의 연구가 수행되고 있다[11].

- (1). 흡수제의 최적 당량비
- (2). 여과포에서의 최적 흡수제의 부하
- (3). 최적 여과포의 선정
- (4). 처리기체의 최적조건

참고문헌

1. 박영옥 외, "Pulse-Jet식 여과포집진장치의 여과포 성능시험 연구(1)", 과학기술처, 259p. (1989).
2. 井伊谷鋼一 外, "BAG FILTER HANDBOOK", 日本粉體工業協會編, 511P. (1977).
3. R. P. Donovan, "Fabric Filtration for Combustion Sources", Marcel

- Dekker, Inc., pp. 628p. (1985).
4. 환경처, "대기오염물질 방지시설 실태조사표" (1988).
 5. R. Dennies, "Handbook on Aerosols", GCA/Technology Division, GCA Corporation, Bedford, MA, 142p. (1976).
 6. Leith, D. and First, M., "Particle Collection by a Pulse-Jet Fabric Filter", 68th Annual Meeting of APCA., Boston, pp. 1-14 (June, 1975).
 7. C. E. Billings and J. E. Wilder : Handbook of Fabric Filter Technology, Vol. 1, GCA/Technology Division, Bedford, Mass., EPA-APTD 0690(NTIS PB-200-648), pp. 1.1-2.219 (1970).
 8. Lenzing AG, "Lenzing AG Test Data", High Temperature Filtration, Lenzing AG, Dept. HPP-P84, A-4860 Lenzing, Austria, pp.7 (1992).
 9. D. W. VanOsdell and M/ B. Ranade, "Electrostatic augmentation of Fabric Filtration", Research Triangle Institute, EPA Contract No. 68-02-3186, RTI Project No. 47U-1915, 85pp. (1989).
 10. A. H. Dean and K. M. Cushing, "Pulse-Jet Fabric Filters for Coal-Fired Utility and Industrial Boilers", Electric Research Institute, CS-5386, E-57 pp. (1987).
 11. S. Tujii, "Bag Filters for Refuse Incineration Plants", 5th Korea-Japan Powder Technology Joint Seminar, 韓國化學工學會 粉體工學/에너지. 環境部門委員會, 日本粉體工學會, 日本粉體工業技術協會, pp62-66, (1993).