

고온집진 기술의 국내외 기술개발 현황 및 타분야 적용 가능성

최주홍

경상대학교 응용화학공학부; jhchoi@nongae.gsnu.ac.kr

1. 기술 개요

각종 산업공정, 발전시설, 그리고 소각설비 등의 가스 흐름 또는 배기가스에는 발생환경에 따라서 미연탄소, 회, 금속 및 중금속 입자 등의 고상 및 액상 입자들이 포함되어 있다. 배기가스 중에 포함된 분진은 일차적으로 대기오염 규제 차원에서 제거되어야 하고 그 규제치가 점차 엄격해지고 있기 때문에 고효율 집진이 필요하다. 또한 산업공정과 화력 신발전 공정에서의 집진은 이와 관련되어 있는 하부공정을 분진에서 유발되는 문제점으로부터 해결하기 위하여 보다 더 큰 목적이 있다 예로써 석탄가스화 복합발전(IGCC)와 가압유동층연소 복합발전(PFBC)의 경우 석탄으로부터 제조된 가스를 정제한 후에 가스터빈을 가동하는 데 이 경우 가스터빈의 보호를 위하여 고온고압에서 엄격한 정밀 집진이 요구된다, 한편 대부분의 고온 산업공정에서 배출되는 배기가스는 많은 열을 회수하기 위하여 열교환기를 사용하는 데 이 경우 열교환기의 효율을 향상시키기 위하여 고효율 집진이 요구된다. 그리고 지구온난화 가스의 발생저감을 위하여 유용한 가스를 회수 또는 전환하기 위한 촉매 전환공정 또는 분리공정의 효율적인 가동을 위해서는 우선적으로 정밀집진이 요구된다. 이들 신공정에서 요구되는 정밀 집진의 집진효율은 99.9% 이상 또는 배출 분진의 농도가 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 이하이다[1].

고효율 집진에 활용될 수 있는 제진 방법으로는 크게 건식과 습식으로 나뉜다. 습식 집진기는 세정기로 불리며 주로 물이나 스팀을 분사하여 물방울에 미소 입자를 포집하는 것으로서 분무 세정기, 방해판 탐, 충전탐, 사이클론 스크라버, 그리고 벤츄리 스키라버 등이 있으며 $5\mu\text{m}$ 이상의 입자들을 100% 포집할 수 있는 것으로 알려졌다. 건식 집진기는 건조가스 상태에서 입자와 가스를 분리하는 기술로써 여과포 집진기, 금속 필터 또는 세라믹 소재의 필터 집진기, 전기 집진기, 충전 정전 집진기 등이 있으며 이들 집진기는 고온고압에서 활용이 가능한 잇점을 갖고 있다. 여기서는 고온에서 고효율 집진이 가능한 후자의 집진기에 대한 기술의 현황을 분석하였다.

여과포, 세라믹 또는 금속 소재의 필터 집진기는 필터에 형성된 기공을 통하여 가스가 빠져나갈 때 입자들이 충돌, 걸림, 그리고 확산 등의 원리로 필터 표면에 걸려져서 분진층을 형성하며, 이를 주기적인 역세로 세정하면서 연속적인 집진을 수행한다.

유체 흐름속에 포함된 입자를 제거하는 작용기구로는 중력, 원심력, 관성충돌, 직접차단, 확산, 정전기 효과 등이 있는데 세라믹 필터는 주로 관성충돌과 직접 차단, 확산의 3가지 작용구구에 의해 분진이 분리된다. $1\mu\text{m}$ 이상의 입자는 충돌과 차단 그리고 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 입자에는 확산 기구가 지배적으로 작용한다. 또한 입자간의 정전기력이나 Van der waals력이 분진 케이크를 형성하는데 큰 영향을 미치며, 이러한 힘이 클수록 생성되는 분진의 밀도는 증가한다. 분진을 함유한 가스가 필터의 단면에 수직인 방향으로 운동하면서 주로 관성충돌과 직접차단의 반응구구에 의해 분진층이 생성된다. 일단 분진층이 형성되면 필터에 의한 분리가 아닌 분진 자체의 체분리현상에 의해 분진과 가스의 분리가 진행된다. 이러한 분리가 진행되면서 분진층의 두께가 증가하고 분진층과 필터 자체의 저항으로 인하여 필터 외벽과 내벽의 압력차이가 발생하게 된다. 전체 압력차이가 설정값 이상이 되어 역세 가스를 필터 내부로 분사시키면 순간적으로 역류가 발생하여 분진 케이크가 필터와 분리되어 분진 케이크가 중력에 의해 아랫쪽으로 떨어진다. 분리되지 않고 잔류하는 분진층을 잔류분진층이라 하는데 이 층도 일종의 집진역할을 수행한다. 만약 과도한 역세로써 잔류층을 너무 많이 제거시키면 장기적으로 미세

입자가 필터 내부로 침투하여 필터 내부에 분진이 침적되면 투과도를 낮추어 압력차를 크게 한다. 반대로 역세가 불충분할 때는 지속적인 잔류층의 증가로 필터를 통한 압력손실이 증가되어 연속운전이 곤란하게 된다. 따라서 적절한 잔류층을 유지하면서 운전하는 것이 연속운전의 결정요인이다.

역세정시에 필터 내부에 강한 압력을 형성하는 역세정 가스는 펄스노즐로부터 확산기(Diffuser)를 통과한다. 이 때 역세가스의 흐름을 반지를 방향으로 퍼지게 함으로써 분진케이크를 쉽게 탈리시키는 역할을 한다. 그룹 필터 운전은 위와 같은 특성을 갖는 캔들 필터를 여러 개의 그룹으로 묶어 운전하는 것으로써 처리가스량은 단순히 필터 갯수의 곱으로 쉽게 나타낼 수 있지만, 역세정은 그룹별로 수행시키기 때문에 필터 하나에 대한 것뿐만 아니라 그룹의 현상도 이해해야 한다. Fig. 2는 집진과 역세정 시에 유체 이동 모델을 제시한 것이다. 필터 표면에 부착된 분진 케이크를 탈리시키기 위해서, 여과 모멘트(Filtration monent)를 극복하기 위하여 역세정 모멘트(Cleaning monent)가 요구되기 때문에, 고압의 역세정 가스를 순간적으로 도입한다.

전기집진은 분진 입자들이 코로나 방전에 의하여 하전된 후에 집진판으로 이동하여 포집되는 원리를 이용한다. 코로나 방전은 고전압이 걸려있는 전극 주변의 기체 분자가 전기적으로 파괴되는 현상에서 일어난다. 방전극 주위의 강한 전기장이 자유전자를 가속시키며, 가속된 자유전자가 빠른 속도로 집진판으로 이동하면서 분진에 충돌하여 연쇄적으로 자유전자와 양성자를 방출한다. 이때 생성된 양성자는 방전극으로 이동하면서 방전극을 포위하고 있는 기체 분자와 음극에 충돌하여 새로운 전자를 연쇄적으로 발생시킨다. 전기 집진기의 성능은 분진의 하전 특성과 입도 분포, 전극간의 전기장도(electric field strength), 그리고 가스특성 등에 따라서 복합적으로 영향을 받는다.

집진기의 성능은 집진효율, 압력손실, 가스처리량 등으로 비교 평가된다. 고온집진 적용에 잠재력이 있는 집진기의 성능을 Table 1에 비교하였다.

Table 1 The performances of particulate collectors at high temperature

집진기	처리량 ^{a)} (m ³ N/h m ³)	압력손실 (mmH ₂ O)	집진효율 (%)	100% 통과 입경(μm)	5μm포집 효율(%)	배출농도 (ppm)	비 고
사이클론	2340	20 ~ 70	99.0	15	70	376	2 단
캔들필터	440	60 ~230	99.9+	3	100	5이하	
cross flow 필터	1800	20 ~ 80	99.9+	3	100	5이하	
순환층 여과기	340	60	99.4	10	95	20이하	2 단
전기집진기	220	12.5	99.5	10	95	20이하	3 단

^{a)}Based on the apparent volume

이중층으로 구성되어 있는 캔들 필터의 집진은 주로 멤브레인층에서 이루어지며 이 층의 기공크기 조절에 의하여 집진효율이 조절된다. 현재 상용으로 제조되고 있는 SiC 캔들의 기공은 10 μm 정도이며 PFBC 운전조건에서 집진효율이 99.9% 이상, 5 μm 이상의 입자가 100% 포집되며, 그리고 배출농도가 5 ppm 이하이다. 캔들 필터의 압력손실은 다른 집진기에 비하여 높은 편이고 가스처리량도 낮은 편이지만 절대적인 집진효율을 추구할 수 있는데 큰 잇점이 있다. Cross flow 필터는 얇은 여과판의 적층으로 이루어져 있으며 체적당 여과면적을 높일 수 있는 것이 큰 장점이다. 집진효율은 캔들 필터와 동일하다. 그러나 실제 운전상에 있어서 좁은 통로의 막힘으로 인하여 역세가 비효율적이고 고온에서 적층판의 파손에 대한 우려가 캔들보다 높다.

순환층 여과기의 집진효율은 작은 층입자를 사용하여 여과속도를 줄이면 증가한다. 그러나 집진효율에 한계를 보이는 이유는 층입자에 포집된 분진의 세척이 완벽하게 이루지 못할 경우 재비산이 일어나기 때문이다. 따라서 Table 1에서 배출농도를 20 ppm 까지로 잡았다. 기체식 순환시스템으로 층입자를 세척할 경우 운전상 불안정한 유체조작으로 인하여 안정적인 집진효율을 얻기가 매우 어렵다.

전기 집진기의 집진효율은 이론적으로는 1 μm 이하의 미세한 입자의 포집도 가능하며 아주 높을 것으로 예상된다. 그러나 실 시스템의 집진효율은 99.5% 수준이며 배출농도가 20 ppm 이하까지 가

능하다. 현재 미분탄 화력 발전소에서 가동되고 있는 배연가스 집진기의 효율은 평균 98% 수준이며 배출농도가 100 ppm 이하로 운전되고 있다.

2. 국내의 기술개발 현황

2-1. 세라믹 필터 집진기

세라믹 필터 중에서 SiC 캔들 필터의 개발은 실험실급에서 부터 Pilot 급까지 다양하게 연구되어 왔으며 Table 2에서 보는 바와 같이 석탄가스화복합발전(IGCC)과 가압유동층연소(PFBC)의 집진을 위한 고온고압에 많이 사용되고 있다. 이 외에도 bio gasification, petroleum residue gasification, 열분해, 석유정제, 고온 촉매회수, 소각로 등에 다양하게 적용되고 있다. 세라믹 캔들 필터는 운전중 파손에 대한 우려가 매우 크지만 전세계적으로 본 시스템에 대한 연구가 제일 활발하게 이루어지고 있는 이유는 안정적으로 높은 집진효율을 얻을 수 있고, 시스템 설계 및 운전이 제일 무난하고, 처리용량에 관계없이 경제적으로 설치할 수 있기 때문이다. 캔들 필터의 수많은 운전 경험에도 불구하고 세라믹 필터 집진기는 600°C 이하의 운전조건에서는 큰 문제가 발생하지 않지만 800°C 이상의 고온에서 운전이 요구되는 PFBC의 경우 아직도 잠정적으로 많은 문제점이 지적되고 있다. 최근에 상업적으로 필요한 자료를 많이 획득한 시험이 Grimethorpe UK PFBC[2], Ahlstrom Karhula PFBC[3], 그리고 AEP Tidd PFBC[4,5]이며 이들 공정에서 캔들필터를 실험한 유량은 각각 7MWe, 10MWe, 그리고 10MWe 이다. 가장 최근까지 시험가동한 곳은 Tidd PFBC로써 PFBC 집진에서 발생하는 문제점들이 다음과 같이 비교적 명료하게 밝혀졌다.

기계적인 신빙성 확보 문제

- 여과체 품질관리의 신빙성 확보
- 역세정 가스량의 적정성 확보
- 필터와 금속간의 열팽창 차이에서 오는 열충격
- 역세와 집진의 반복에 따른 기계적 진동 및 충격
- 필터의 효율적인 설계
- 필터 시스템의 정확한 감시

부식문제

- 여과체 자체의 화학반응에 의한 열화
- 알칼리 금속의 응축에 의한 이물질 투입

분진의 후연소에 의한 필터 파손

- 케이크 연소
- 분진폭발

회가고 문제

- 탈황 흡수제의 첨가로 분진의 용점이 낮아져서 회가고 형성

Grimethorpe PFBC의 초기 운전에서는 설계상의 많은 문제점들로 여과체가 많이 파손되었다. 즉 노즐 용접부의 파손과 노즐 끝부분의 파열등 재료문제가 지적되었다. 그리고 필터를 고정하는 weight가 집진과 역세정의 반복적인 운전에 의하여 상하 요동에 의하여 금속과 필터 사이에 밀봉을 위해 사용한 가스켓이 소실되어 여과체의 파손이 진행되었다. 필터 설치에 있어서 이와 같은 기계적 문제점들은 그동안 많은 개량을 거쳐서 이미 해결되었다. 그러나 다량의 무거운 필터를 얼마나 효과적으로 설치하며, 이들의 배열이 유체흐름에 얼마나 안정적인가 등의 연구과제를 남기고 있다. 그리고 필터의 파손시에 이를 감지할 수 있는 기술과, 파손시에 대처할 수 있는 방법이 개발되어야 세라

믹 캔들 필터 사용시 절대적인 신빙성을 확보할 수 있다.

Table 2 Ceramic barrier filter test/demonstration facilities[6]

Facility	Location	Plant type	Filter unit design	T °C	Opr. hours	Status	Normal capacity
Berrenrath ¹	Ger	Gasification	LLB	270-350	8500	Operational	700 tpd
Buggenum	NL	Gasification	Schumacher	260	2500	Operational	250 MWe
HRL,Morwell	Aaust.	Gasification	Schumacher	250-300	~200	Operational	22 MWt
KoBra ²	Ger	Gasification	LLB	320	-	Consider.	312 MWe
Nakoso	JN	Gasification	MHI(1/10 flow)	400-420	~1600	Closed	200 tpd
Pinon Pine ²	USA	Gasification	Westinghouse	540	1	Startup(96)	100 MWe
Polk County ²	USA	Gasification	Pall(1/10 flow)	480-540	-	Consider.	250 MWe
Puertollano	Spain	Gasification	LLB	<300	-	Consider.	300 MWe
Stoke Orchard	UK	Gasification		400-600	4000	Closed	12 tpd
Tampere	Finl.	Gasification		650	1000	Operational	15 MWt
Wabash River ²	USA	Gasification	Schumacher	<370	1000	Operational	262 MWe
Livingston	USA	Hybrid	Westinghouse	590-820	>700	Operational	-
Wilsonsville ³	USA	Hybrid	IF&P	540-980	-	Startup(96)	15 MWt
			Westinghouse	540-870		operation	

1 Syngas production plant for methanol synthesis

2 Planned lignite IGCC power plant on hold until 1998

3 Southern Company Services Power System Development Facility

세라믹 필터 및 결합체는 PFBC 집진조건에서 알칼리금속 또는 SOx, NOx, HF 등의 반응성 가스와 반응하여 기질과 다른 상을 형성한다[7]. 이와 같이 생성된 이질상은 기질과 서로 열팽창계수가 다르기 때문에 반복되는 열 사이클에 의하여 균열이 일어난다. 알루미늄/몰라이트의 비경질상은 고온에서 알칼리 금속가스와 반응하여 anothite 구조로 결정화되기 때문에 일시적으로 강도가 증가된다. 이와 같은 변화는 계속 일어나서 최종적으로 tridymite가 생성되므로 필터에 다결정구조의 상이 존재된다¹¹⁾. 코디어라이트에 포함된 유리질은 PFBC 가스와 반응하여 tridymite로 전환된다. SiC 소재는 고온의 산소나 스팀에 산화되어 SiO 내지 SiO₂로 변화되며, 결합재로 사용되는 무기산화물은 PFBC 조건에서 Na₂O, Na₂SO₄, 그리고 CaSO₄ 등과 같은 알칼리 산화물과 쉽게 반응하여 여과체의 열화가 가속된다. 반응에 따른 필터의 열화 외에도 알칼리 금속이나 미세한 분진이 기공내에 응축 내지 축적되면 서로의 열팽창 차이에 의하여 여과체 균열이 발생될 수 있다.

분진의 후연소 내지 폭발 현상은 Wakamatsu PFBC의 운전에서 많이 지적된 사실이다[5]. 분진중의 미연탄소가 필터 내부에 침적되어 있다가 PFBC 가스에 잔류하는 산소와 반응하여 필터의 국부적인 부분에 초고온을 형성하여 필터의 파손을 유도하는 가능성이 충분히 있다. 이와 같은 문제들은 분진 케이크를 적절하게 제거함으로써 운전기술적으로 해결할 수 있는 문제다.

회가교(ash bridge)에 의한 필터의 파손은 Tidd PFBC에서 지적된 사실이다[5]. 알칼리 금속 화합물을 포함한 미세한 분진은 용융점이 낮아서 PFBC 집진조건에서 거의 응결되는 특성을 갖는다. 따라서 역세정시에 제거되지 않고 필터들 틈새에 축적되어서 회가교를 형성하며 이것이 기계적인 충격

의 원인이 된다는 분석이다. 이와 같은 회가고 문제는 입경이 큰 분진을 필터에 노출시킴으로써 많은 개선을 보였다. 운전중에 일어나는 필터의 파손 문제는 위에서 보인 요소들의 복합적인 원인이므로 발생될 것이며 이를 보완하기 위한 기술의 개발이 시급히 요청된다.

SiC 캔들 외에도 fiber candle, cordierite 튜브, 그리고 세라믹 여과포등 다양한 소재와 형태로 여과체가 개발되고 있으며, 이들이 갖는 결점을 보완하기 위하여 많은 연구가 시도되고 있다. 특히 cordierite 튜브는 일본의 Wakamatsu PFBC에서 최근에 성공적인 연속운전 성과가 보도되었다.

Cross flow 필터는 비표면적이 높은 특성이 있지만 실제적으로는 여과체의 파손에 대한 우려가 높고, 좁은 통로로 통한 역세의 불충분으로 인하여 통로 막힘현상이 심각한 문제로 지적된다. 따라서 이의 개발상태는 아직 작은 pilot 급에 머물고 그 운전경험이 짧다.

2-2. 순환층 여과기

Combustion Power Company(CPC)에서 선도적으로 개발하였으며, 현재 일본의 Kawasaki Heavy Industrials(KHI)에 의하여 상용화 개발에 접근하고 있는 순환층 여과기는 일본의 Nakoso IGCC와 같이 NYU의 pilot급 운전에서도 지적되었듯이 PFBC 조건에서는 층입자의 재순환 및 세척, 배관의 마모, 그리고 안정성 등에서 많은 문제점들이 지적되고 있다.

2-3. 기타

전기 집진기는 이론적으로 높은 집진 효율이 예상되지만 실제로는 아주 저조한 결과를 보인다. 그 이유는 고온에서 전기장의 강하와 시스템 밀봉의 파손으로 인한 것으로 분석된다[8]. PFBC와 같은 고온고압에서 내구성이 있는 전극설치에 큰 난점이 있다. 전기 집진기의 집진효율 향상을 위하여 역전리(back corona) 현상을 감소시키기 위한 고전압 펄스공급 하전장치 적용연구와 SO₃ 투입 등에 의한 분진특성 조절 연구등이 일본의 미쓰비시, 이탈리아의 ENEL, 그리고 덴마크의 FLS 사 등에서 이루어졌다. 분진의 재비산 방지를 위한 습식 전기집진기술 및 이동전극형 전기집진기술이 일본의 히타치사 등에서 개발되었다. 최근에는 미국의 DOE/EPRI와 일본등의 선진국에서 극한전기저항의 분진가스 성분제어에 의한 고효율화 기술 및 1 μ m 이하의 초미세 분진 및 중금속 분진의 제진, 5mg/nm³ 이하의 초고효율 집진을 위한 연구, 그리고 전기와 여과, 습식과 건식의 복합, 전기집진과 탈황/탈질등을 복합시키는 하이브리드 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기타 개념적으로 소개되고 있는 음파 및 자기파 집진기의 개발은 아직 초기 단계에 있다.

3. 향후 국내의 기술개발동향 및 전망

3-1. 필터 집진기

(1) 필터 개발

필터 개발의 주안점은 첫째 성능면에서 고온 고압 운전 가능, 집진효율 확보, 높은 여과속도에서 낮은 압력손실 유지, 그리고 효율적인 역세정 효과 유지이며, 둘째 신빙성 확보면에서 열 및 기계적 충격 내구성 확보, 화학적 안정성 확보가, 세째로는 경제적인 면에서 가벼울 것, 높은 여과 면적, 그리고 가격이 저렴한 것 등이 요구된다. 최근에 필터 외벽에 기공이 작은 얇은 여과막을 입혀서 표면 여과를 시킴으로써 여과체의 여과 특성이 많이 개량되었다. 이중층 구조의 캔들에서는 표면여과가 일어나서 작은 입자가 캔들 내부에 침투되는 것이 방지되기 때문이다. 캔들 필터의 집진효율은 여과층의 기공을 조절함으로써 원하는 효율을 달성할 수 있지만 기공이 너무 작은 경우에는 압력손실이 증가된다. 파이버로 제조된 필터의 경우 기공의 크기가 불규칙하고 크기 때문에 분진의 내부침투가 일어나서 압력손실이 쉽게 발생된다.

필터의 소재는 가볍고 가격이 싸면서 고온고압에서 물리 화학적으로 내구성이 있는 특성을 갖추어야 한다. PFBC 가스는 750 $^{\circ}$ C 이상에서 여러 가지 반응성 가스가 존재됨으로 소재 및 결합체의 화

학적 내구성이 중요하다. 그리고 저온의 가스로 역세할 때 형성되는 열충격과 기계적인 충격에 견딜 수 있는 캔들의 제조는 소재와 결합재의 특성 및 제법에 크게 좌우된다. 세라믹 필터 소재로써 몰라이트, 탄화규소(SiC), 그리고 코디어라이트는 다소 부족한 점을 갖고 있지만 단독 소재로써 비교적 좋은 특성을 보인다. 상용 캔들 필터의 소재로는 SiC가 가장 많이 사용되고 있지만 코디어라이트, 알루미늄실리케이트 섬유, 그리고 알루미나/몰라이트 등의 산소계 소재도 이용되고 있다. Table 3에 현재 국내외에서 개발되고 있는 상용급 여과체의 종류와 특성을 열거하였다.

SiC 필터를 구성하는 입자는 점토나 알루미나실리케이트 결합재 또는 유리질 결정체에 의하여 결합되며, 결합재의 특성이 소결 조건과 함께 필터의 강도를 크게 좌우한다. 코디어라이트(Mg₂Al₄Si₅O₈) 필터는 적당한 소결 조건에서 몰라이트, spinels, 그리고 colundum이 형성되어 결합된다. 알루미나/몰라이트는 corundum (Al₂O₃)과 anorthite(CaAl₂Si₂O₈)를 포함하는 비경질상에 쌓인 몰라이트 봉이나 침으로 구성된다. 매트리스 내에 존재하는 비경질상의 농도는 제조 조건에 따라서 많은 차이를 보이고, 재료의 강도에 큰 영향을 미친다. 알루미늄실리케이트는 foam이나 섬유 형태로 제조되며 유리질과 몰라이트로 구성된다. SiC 캔들과 같이 입자의 소결로 제조된 여과체는 유연성이 부족하기 때문에 파손시에 결정적인 문제점을 유발시킨다. 따라서 세라믹 fiber나 세라믹천을 보강하여 여과포 형태나 세라믹 fiber를 결합재로 성형소결한 캔들이 최근에 개발되고 있다.

Table 3 Rigid barrier filter element

Element type	Vendor/ developer	Material	Limit. T(°C)	Trade name	Dimension (cm)	Characteristics	
Candle	Schumacher	SiC granular	1200	Dia-schumalith	6/150L/1T	A(0.26m ²)	ρ(2.5)
	Refractron	· ·	1200	Vitropore	· ·	· ·	· ·
	Techniveave	Composite	900	N610	6D/150L	-	-
	Coors	Mullite	-	-	-	-	-
	Foseco	Alumina Silicate (Fabic)	650	Cerafile 2000i	6D/100L	-	-
	DuPont	Corundum	1000	PRD-66	6D/150L	-	-
	IF&P	Alumina Silicate (Vacuum formed)	900	Fiberosic ^{im}	6D/100L		ρ(0.3)
	BWF						
	Didier						
	KIER	SiC granular	1100	개발중	6D/100L		
	KIST	SiC Composite	1100	개발중	6D/50L		
	Aju U	Composite	600	개발중	6D/100L		
Tube	KTL	Cordierite	600	개발중	6D/100L		
	Asahi Glass	Cordierite	1000	-	17D/290L/1.5T		
	Pall	Hastelloy	900				
Cross-flow		Mn					
	Coors	Mullite	1000		30×30×10	A(0.75)	
Channel	GTE	Corderite, SiN					
	Allied-signal	Sintered SiN					
Monolith	CeraMem	Cordierite	650		15×15×50	A(3.4)	
Fabric Bag	3M	Polycrystalline Metal Oxide	820	Nextel ^{im}			

3M사가 개발한 NextelTM은 다결정 금속산화물 섬유(Al₂O₃ 62% , SiO₂ 24% , B₂O₃ 14%)다. 이것을 SiC 매트리스로 보강하면 1300°C까지 내구성이 있는 여과포를 제조할 수 있는 것으로 보고되었다. BWF의 fiber

캔들은 2~3 μ m의 천연 실리케이트 fiber를 무기 결합재로 성형한 것으로써 산화 상태의 내구성이 우수한 것으로 보고되었다. 그리고 PLANSEE에서 크롬 재료로 개발한 금속 캔들은 850 $^{\circ}$ C 까지 내구성이 있는 것으로 알려졌다. 이러한 신형 캔들은 Table 4에서 보는 바와 같이 운전경험이 아직 부족한 상태지만 캔들필터가 갖는 문제점들을 개량할 수 있는 가능성을 보인다.

Table 4 Status of hot gas filter materials qualification

Matrix	Laboratory Testing/Characterization	PFBC Testing	PCFB Testing	IGCC Testing
Clay Bonded SiC				
F 40	×	×	×	×
442T	×	×	×	
FT20	×	×		
Alumina/Mullite (P - 100A)	×	×	×	×
3M SiC-CVI Composite	×	×		
PRD 66 DuPont	×	×		
Aluminosilicate Foam	×	×		
SiC/SiC-CVI DuPont	×			
Solgel Oxides	×			
Nitride Bonded SiC	×			
BWF fiber filter	×			
PLANSEE Cr candle	×			

(2) 캔들 설치 및 세라믹 필터 설계

세라믹 필터의 핵심기술은 여과체의 설치다. 세라믹 여과체를 금속 집진기에 고정시킬때 역세에 의하여 발생하는 열 및 기계적 스트레스를 흡수하면서 밀봉시켜야 한다. 세라믹 캔들은 자체에 턱이 있어서 튜브시트에 고정시키도록 되어 있다. 비교적 낮은 온도에서는 스프링이나 weight를 사용하여 수월하게 설치할 수 있지만 PFBC와 같은 고온에서는 세라믹 가스켓의 소실과 금속의 뒤틀림 등으로 장기 내구성에 관한 기술의 확보가 요구된다.

세라믹 필터 설계의 주안점은 장기운전시의 내구성, 주어진 집진기 사이즈로 최대의 여과면적을 확보하는 캔들의 배열, 가스흐름을 분진 낙하 흐름과 같이 형성하여 재비산을 줄이는 일, 집진기 내부의 가스유동 분포를 균일하게 하는 것, 그리고 역세가스를 최소화하는 것 등이다. 장기운전 내구성을 높이기 위해서는 금속 부분의 열팽창 및 고온 부식, 역세 노출 부분의 금속재질 선정 및 최적설계 등이 중요하다. 최근에 비교적 실제에 가깝게 운전된 것은 Tidd와 Grimethorpe의 PFBC이다. Grimethorpe PFBC의 집진기는 1.5m 캔들 130개를 단일 튜브시트에 설치한 것으로써, 850 $^{\circ}$ C 10bar에서 790 시간 동안 연속운전을 수행했다[9]. 수행과정에서 총 17개의 캔들이 파손되었으며, 사용된 금속의 내구성에 많은 문제점을 보였다. 즉 캔들을 지지하는 튜브시트가 뒤틀리고 펄스 노출의 파손과 뒤틀림 등으로 비정상 역세가 진행되었다. 그리고 캔들 하부 사이클론 내벽에 쌓인 분진이 효율적으로 제거되지 못하고 쌓여 올라가 캔들의 밑부분을 덮어버리는 현상도 밝혀졌다. 이와 같은 회가교는 스트레스 전달의 원인을 제공하여 스트레스가 한곳으로 쏠리는 결과를 초래한다. Tidd PFBC에서는 384개의 캔들로 구성된 집진기가 운전되었다[10]. Tidd 집진기에서는 21개의 캔들이 파손되었다. Tidd 캔들 파손의 원인도 회가교에 의한 것으로 해석되었다. 사이클론을 거치지 않고 큰 입자를 동시에 여과하면 회가교에 의한 문제는 해결할 수 있는 것으로 알려지고 있다.

집진기 내부의 가스흐름을 균일하게 분포시켜서 가스흐름에서 발생하는 진동이나 불균등 스트레스를 해소하는 것이 대형 집진기의 설계에서 중요한 기술이다. 이를 위하여 도입구의 분산, 집진기 내부의 방해판 설치, 그리고 캔들의 적절한 배치 등에 대한 모사연구가 진행되고 있으나 아직까지 개

발단계에 있다.

(3) 세라믹 필터의 신빙성 확보

SiC 캔들 필터는 Ahlstrom에서 720시간, Tidd에서 1,500시간, Grimethorpe에서 790시간, 그리고 Aachen 공대에서 5,700시간의 연속운전 기록을 확보하고 있다. 이들 현장시험시 캔들필터는 필터 고정기술, 튜브시트 설계, 그리고 역세기술 등의 미숙으로 필터 일부가 파손된 것으로 보고되었다. Coors사에서 제조된 알루미늄/몰라이트 필터는 Westinghouse의 가스화 모사장치, PFBC 그리고 CFBC의 산화분위기, 그리고 가스화와 Carbonizer의 환원분위기 등에서 시험되었다. 700°C 이상에서 50~800 시간의 운전결과 필터의 강도가 현저히 감소되었다. 1993년 중반에 3M사에서 개발한 세라믹 복합 캔들 필터 Westinghouse STC에서 1993년 11월에 모사 PFBC가스에서 172시간동안 성공적으로 운전되었다. 시험결과 집진효율이 99.8%이상이고 50회의 역세후에 투과율이 안정화되고 필터 파손이 관찰되지 않았다. 상용급 백필터인 Foseco Cerafil 2000i는 Helsinki 대학의 PFBC에서 10bar와 680°C에서 340 시간 동안 성공적으로 운전되었다.

이와같이 세라믹 집진기의 상용화 적용을 위한 현장적용시험이 외국의 여러 연구기관에서 수행하여 일부 짧은 기간에 성공적인 시험이 수행되고 있으나 필터의 파손과 시스템의 설계 미숙에 대한 문제점들이 지속적으로 지적되고 있는 것이 사실이다. 운전중에 캔들이 파손되어 큰 입자의 분진과 필터조각이 가스터빈에 바로 유입될 경우 결정적인 손실을 입게된다. 따라서 이런 경우에 대한 대책이 없이는 캔들 필터의 신빙성이 확보될 수 없다. 미국의 PALL사에서는 캔들 상단에 기공이 큰 afuse를 추가로 설치하여 캔들의 파손시에도 큰 분진의 유입을 막을 수 있는 방법을 제시하고 있다. 그러나 afuse는 역세의 효과를 줄이기 때문에 운전시에 에너지 손실이 많다. 독일의 Schumacher사에서는 유동밸브를 사용하여 캔들이 파손되어 유속이 이외로 증가되면 자동적으로 닫길 수 있는 방법을 소개했다. 이런 시스템은 저온에서는 용이하게 작동될 수 있을 지 모르지만 PFBC와 같은 고온에서는 무리다. 캔들필터의 신빙성을 확보하기 위하여 상당한 노력이 있지만 이 부분의 문제가 가장 심각하게 지적되고 있다.

(4) 고온 필터 집진기술의 개발 과제

고온 필터 집진기술의 신빙성 확보를 위하여 잠정적인 문제점과 그 관련 기술을 Table 5에 요약하였다. 전술한 바와 마찬가지로 필터 집진기의 적용에 있어서 최대의 과제는 필터의 파손에 대한 우려를 극복할 수 있는 기술의 개발이다. 그리고 분진의 반응 내지 응결에 의한 급격한 압력손실 발생을 방지하기 위하여 분진특성에 따른 운전의 최적화에 대한 연구가 필요하다.

5. 고온필터 집진기술의 타분야 활용방안

분진의 배출시설은 크게 수송, 난방, 발전, 그리고 산업 시설로 나뉜다. 1997년도 국내의 총 분진 배출량은 사용한 연료를 기준으로 환산하면 439천톤에 이른다. 이 중에서 고정원 분진 배출이 77%를 차지한다. 특히 분진이 대량으로 배출되는 발전과 산업시설의 비율은 각각 39와 36%이다. 발전과 산업용의 분진 배출원은 보일러, 금속용융, 제련, 열처리 시설, 발전시설, 시멘트 및 석회 제조 시설, 기타 금속 제조 및 가공 시설, 각종 화학공업, 비료공업, 제지, 섬유 산업 등이다. 현재로는 이들 배출원에서 배출되는 분진은 대개 150°C 미만의 저온 집진으로 수행하고 있다. 저온 정밀 집진으로 채택하고 있는 것은, 여과포 집진기, 전기 집진기, 그리고 습식 세정 집진기 등이 주류를 이룬다. 전기 집진기는 발전소, 시멘트 등의 대형 처리시설로 주로 활용되고 있으며, 여과포 집진기는 제진 용량에 관계없이 두루 활용되고 있는 것이 특색이다.

앞으로의 배기가스 정화 정책은 환경과 경제성을 충족시킬 수 있는 복합 처리기술의 활용이 권장된다. 이는 집진, 탈황, 탈질, 탈 VOC, 탈중금속, 그리고 배기가스의 활용 등의 기술이 복합적이고 유기적으로 수행되어야 경제성을 맞출 수 있다는 지적이다. 이들 복합화 기술에서는 어떤 형태로든

지 고온 집진이 필수적이다. 따라서 고온 필터 집진은 고효율 집진기술로써 기존의 체진 또는 배기가스 처리기술의 개량 기술에 적용될 때 그 활용 범위가 대단히 크다고 할 수 있다.

Table 5 세라믹 필터 집진기술 기술개발 과제

잠정적 문제점	요인	관련	기술개발 과제 분류
필터 파손	1. 기계적 충격 · sealing · Ash bridging · 회배출 불량 · 역세정 불량 · 고농도 분진 낙하 · 불균일한 압력분산 · 상호충동	필터고정 기술 및 가스켓 탈황제 및 사용량, 운전조건 설계 및 운전조건 역세정 시스템 설계 및 운전 필터배열 및 운전 집진기 설계 및 천이운전 필터배열	설계기술 분진 반응 및 고착특성 설계/ 운전기술 설계/운전기술 설계/운전기술 유체유동해석 설계기술
	2. 열적 충격 · 불균일한 온도 구배 · 필터의 열적신장 · 필터의 열적급힘	역세정 냉각, 천이 운전, 설계 Binder 팽창 Binder 연화	설계/운전기술 필터개발(binder) 필터개발(binder)
	3. 화학적 충격 · 화학반응 · 유리질 형성 · 상전이 · 증발 · Pore plugging	산화, 스팀, SO ₂ 알칼리, 분진반응 amorphon phase binder 손실 분진반응 및 알칼리 응축	필터 재료 및 성형기술 재료 및 Binder 개발 Binder 재료 Binder 재료 Binder
급격한 압력 손실	1. 역세정 불량 2. 회용용 3. Pore Plugging	역세시스템 설계/ 운전 탈황제 함유, 분진입도 분진침투, 알칼리침투, 화학반응	설계 및 운전기술 개발 운전기술 분진고착특성, 필터개발
재료문제	1. 변형 2. 파손 및 부식	열팽창, 열피로 화학적/기계적 충격	재료선정 및 장기운전특성
신빙성/내구성	1. 필터/재료파손 2. 압력손실 3. 집진기 효율감소	필터 특성 및 설계 회용용 및 운전조건 미비 필터 및 가스켓 파손	Fail-safety기술개발 설계 및 운전기술 개발 재료선정
경제성	1. 유지비 및 복잡성	필터파손 부담, 필터 경량화	최적설계기술 개발 필터 소재 개발

6. 맺음말

현재 고온고압에서 응용이 가능한 집진 시스템으로는 사이클론, 세라믹 필터, 순환층 여과기, 그리고 전기 집진기 등이 있으며, 이들은 고온 집진기로서 각각 장단점을 갖고 있었다. 사이클론은 운전상 가장 신빙성이 있는 시스템이지만 집진효율이 따르지 못하여 정밀 집진기로서 단독 사용은 불가능하였다. 세라믹 필터는 운전시의 열 및 기계적 충격으로 파손되어 전체 시스템에 치명적인 트라벌을 유발할 수 있는 문제점을 갖고 있지만 정밀 집진기로서 안정적인 집진효율을 달성할 수 있었다. 순환층 여과기는 증입자의 안정적인 순환 및 세척이 PFBC 조건에서 사실상 어렵고 집진효율도 만족스럽지 못하였다. 전기 집진기는 PFBC의 고온고압에서 전극설계가 어렵고 고온에서의 전압 강하특

성으로 집진효율이 이론적인 것보다 현저히 감소되는 것으로 조사되었다. 따라서 현재 고온 정밀 집진은 세라믹 및 금속 소재의 필터 집진기에 많은 기대를 갖고 세계적으로 상용기술을 확보하기 위한 실증시험이 많이 이루어지고 있다.

필터의 잠정적인 문제는 고온고압에서 여과체가 가스와 분진과 반응하여 기질과 다른 이질상을 형성함으로써, 필터의 강도가 감소하고 또한 열충격 저항이 감소되는 것으로 밝혀지고 있다. 그러나 최근에 새로운 결합재의 개발과 신소재 및 산화물 복합소재의 사용으로 필터의 결합이 많이 보완되고 있다. PFBC 분진에는 알칼리 금속화합물이 다량으로 존재되기 때문에 용융점이 낮아져서 필터의 표면에 강하게 결합하여 회가교를 형성하는 문제가 제기되었으나 이는 큰 분진 입자와 동시에 집진함으로써 해결할 수 있다고 보고되었다. 필터의 개발에 있어서 여과체의 경량화, 반응가스에 대한 내구성 증가, 분진 특성에 따른 최적 운전조건의 확보, 다량의 여과체를 효율적으로 배열하는 문제, 그리고 필터의 파손시에 이를 감지하고 처리할 수 있는 보완 시스템의 확보가 큰 문제점으로 지적되었다.

환경오염 방지와 경제성을 동시에 달성하기 위하여 고온에서 필터 집진기술은 차 세대에 아주 유용한 기술로써 그 활용 범위의 개발 가능성이 아주 높은 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최주홍, 정진도: "고온고압 집진기술", 화학공업과 기술, 13(5), 475-484 (1995).
2. Grimethorpe PFBC Establishment: "Grimethorpe High-Temperature/High-Pressure Gas Filter Experimental Program, Vol. 1, TR-100499, Final Report, September (1992).
3. Renz, U.: "Assessment of PFBC Technology, Present and in Future. Internal Clean Coal Technology Symposium on PFBC, Kitakyusu International Conference center, Japan July 26-28, p. 28 (1994).
4. Schifter, H.P., Laux, S., and Rent, U.: "High-Temperature Gas Filtration, Vol. 2, GS-6489, Final Report, October (1992).
5. DOE/EPRI: "Overview of Hot Gas Filter EWxperience at Tidd", Materials & Components in Fossil Energy Applications, No. 120, February 1, (1996)
6. Mitchell S.C.: "Hot Gas Particulate Filtration", IEA Coal research, 1997.
7. Alvin, M. A.: "High Temperature Filter Materials", EPRI DE-AC 21-88MC 25034, pp. 137-345 (1992).
8. Zakkay, V. and Gbordzoe, E.A.M.: "Combustion En Lechos Fluidizados," Zaragoza, 1989.
9. Alvin, M.A., Lippert, T.E, Bachovchin, D.M., Tressler, R.E., and Holcombe, T.N.: "High temperature filter materials", Proc. of the 9th annual coal-fueled heat engines, advanced PFBC, and gas stream cleanup systems contractors review meeting, METC Morgantown, West virgina, October 27 - 29, 186(1992).
10. Alvin, M.A.: "Material characterization of the clay bonded silicon carbide candle filter and ash formations in the W-APF system -after 500 hours of hot gas filtration at AEP", AEPSC control No C8014, April 5, 1993.