

PFBC 집진기술개발 현황 및 과제

최 주 홍

경상대학교 화학공학과

The Development Status and Tasks of PFBC Particulate Collection

Joo Hong Choi

Department of Chemical Engineering, Gyeongsang National University

1. 서 론

에너지 절약과 환경오염 감소가 절실히 요청되는 것과 관련하여 최근에 석탄 신에너지 기술개발이 활발히 진행되고 있으며, 고압유동층연소 복합발전(PFBC)은 상용화에 근접하여 개발되고 있다. 석탄의 고압 유동층 연소는 기존의 PC 보일러보다는 저온 연소로써 NO_x의 발생이 억제되며 탈황제를 동시에 주입하여 SO_x 발생을 줄일 수 있는 것이 큰 잇점이다. PFBC에서 집진은 석탄회, 탈황제 및 미연탄소 등의 입자가 고온고압에서 고속으로 터빈에서 충돌될 때 일어나는 터빈의 마모, 침식, 및 부식 등을 방지하기 위하여 필수적이다. PFBC 연소기에서 연소된 가스가 정제후에 바로 가스터빈에 주입되기 때문에 PFBC의 집진은 10~20 atm, 800~900°C, 그리고 많은 분진부하와 가스량 등에서 매우 가혹한 조건이다. 뿐만 아니라 차세대에 더욱 높은 열효율 향상과 가스터빈의 수명 연장을 위하여 집진조건이 더욱 가혹해지고 엄격해질 전망이다.

현재 PFBC의 연소기술에 비하여 집진기술의 확보는 미달상태이며 PFBC의 성공여부가 집진기술의 개발에 크게 좌우하는 상황에 이르렀다. 본 고에서는 그동안 발표된 자료를 바탕으로 PFBC 집진의 개발 현황과 앞으로의 과제에 대하여 기술하였다.

2. PFBC 집진규격

2-1. 운전조건

PFBC 집진의 운전조건은 연소조건과 거의 비슷하다. 탄종, 유동화법, 설계에 따라서 다소 다르지만 PFBC 집진의 온도와 압력은 Table 1에서 보는 바와 같이 800~900°C와 10~13 bar 이다. 이는 기존 화력 발전의 배가스 처리온도 150°C와 IGCC의 400~550°C보다는 높으나

PPCC의 경우보다 낮다. 가스처리량은 열효율, 운전조건, 그리고 탄종에 따라 다르다. Table 1에서 보는 바와 같이 100 MWe를 기준으로 PFBC 집진기가 처리하여야 하는 가스량은 IGCC보다는 8~15배 많지만 PC보다는 2~3배 정도 작다. PFBC 압력이 PC보다 10배 이상 높음에도 불구하고 가스처리량이 현저히 줄어들지 않는 것은 집진온도가 높기 때문이다.

2-2. PFBC 가스 특성

PFBC 가스는 대부분이 석탄의 완전연소에서 생성되는 만큼 잉여 산소가 약간 존재하는 산화분위기로써 그 대표적인 성분과 함량은 Table 2와 같다¹⁾. 고온에서 금속 재료 및 여과체와 반응성이 강한 CO, SO_x, NO_x, HCl 등이 ppm 단위로 포함되어 있고, 이 외에도 탈황 흡수제로 사용하는 알칼리 금속가스, 중금속 가스, 및 석탄에 함유된 각종 화합물에서 발생된 가스와의 반응에 의하여 집진기의 열화가 가속될 수 있다.

2-3. PFBC Dust

PFBC 분진은 석탄회, 미분탄, 황흡수제 및 그 화합물 등의 고체 부유물로 구성된다. 분진은 고온에서 반응성을 가지기 때문에 장치의 부식을 유발할 뿐만 아니라 응결 그리고 응집 등에서 다양한 특성을 나타내므로 집진기의 설정 및 운전에도 많은 영향을 미친다.

분진의 화학적 성분은 기본적으로 석탄회에 따라 다르지만 황흡수제의 종류와 사용량에 따라서 그 특성이 변한다. Table 3에 보인 Grimethorpe PFBC 분진²⁾에서 보는 바와 같이 limestone[CaCO₃] 또는 dolomite[CaMg(CO₃)₂]를 사용하는 PFBC 분진에는 MgO와 CaO가 10 내지 20%정도 함유되어 있다. 이는 기존의 PC 보일러 분진에 3%미만으로 함유되는 것에 비하여 매우 많은 량이다. 이와 같이 알칼리 금속 화합물이 많이 포함되면

Table 1. Actual conditions of particles control in typical pilot Scaled-PFBC.

Company/Site	AEP/Tidd	Ahlstrom/Karhula	British coal/Grimethorpe
Filtration Capacity (MWe)	10	10	7
T (°C)	760~843	843~900	780~870
P (bar)	10	12	10
Gas flow rate (accm)	18.6	241	123
Particle Loading (ppmw)	18,000 (600~10,000) ^{a)}	4,000~18,000	400~3,500 (12,800~48,200) ^{b)}
Average particle size (μm)	27 (1~3) ^{a)}	12~22	3~7 (76) ^{b)}
Bed Type	Bubbling	Circulating	Circulating

^{a)}The results with cyclone, ^{b)}The results without cyclone.

회의 용융점이 낮아진다. 따라서 PFBC 분진은 부착력 및 응집력이 높아서 관석을 쉽게 유발시키고 반응성도 강하다. 분진에 함유된 미연탄소 함량은 분진의 응집력을 낮추고, 전기전도성을 높인다. PFBC 분진 중에서 탄소 함량은 미처리분과 3차 사이클론 배출물 보다 1차 사이클론 배출물에 많은 것으로 보아 분진의 평균 입경과 비슷한 사이즈로 존재되는 것을 짐작할 수 있다.

분진의 물리적 특성으로써 집진에 미치는 중요한 인자는 형상, 입도분포, 밀도, 그리고 충전특성(compaction) 등이 있다. PFBC 분진 입자는 침상이나 모가 나 있으며, 이는 회용용이 일어나는 PC 보일러 분진이 구형을 갖는 것과 대조적이다. PFBC 분진의 입자 사이즈는 전반적으로 PC 보일러 분진보다 크며 평균 입경이 20~70 μm 이다. PFBC 분진의 겉보기 밀도는 1~1.2 g/cm³이며 건조한 것은 약 1.6 g/cm³이다. PFBC 분진의 BET 표면적은 5~30 m²/g 이다³⁾.

2-4. PFBC 집진성능 요구조건

PFBC 집진의 주 목적은 가스터빈 및 하류공정의 보호다. 800°C 이상과 10 atm 이상에서 작동되는 가스터빈에 있어서 입경 5 μm 이상의 분진은 가스터빈 날개에 치명적인 침식요인이 된다. 입경이 작은 분진의 경우 터빈 날개에 용융부착하여 터빈의 냉각 기능을 방해하며, 미세한 알칼리 금속화합물은 고온 반응을 일으켜 부식의 원인이 된다. 따라서 각 가스터빈 제조회사에서는 제품에 맞게 분진의 허용농도를 규정한다. STAL-LABAL과 GE에서 정한 가스터빈 유입가스 중의 분진부하는 입경 20 μm 이하와 누적농도 10 ppm 이하이다. 차세대 PFBC 집진규격은 이보다 더욱 엄격해질 것이며 5 μm 이하의 입자를 10 ppmw 이하로 줄이는 것이 바람직하다.

대기오염과 관련하여 배출분진의 규제는 전체농도도 따지며, EPA에서 규정한 발전설비의 환경규제치는 20

Table 2. Exhaust gas composition of Grimethorpe PFBC.

Composition	Concentration (vol%)	Composition	Concentration (vol%)
O ₂	7.0	CO	25
CO ₂	13.0	SO _x	226
N ₂	Balance	NO _x	207
		HCl	50~100

Dry based, actual exhaust gas contains approximately 5~10 vol% of water depending on feed mode.

Table 3. The Specification of PFBC dust collection.

Gas tretion rate (am ³ /mim) ^{a)}	20.5
Particulate load (g/nm ³) ^{b)}	4~20
Mean average size (μm) ^{b)}	12~22
Temperature (°C)	750~900
Pressure (bar)	10~15
Effluent Particle concentration (ppmw)	< 10
Tolerent particle site (μm)	< 5

^{a)}The value per 1 MWe in circulation PFBC.

^{b)}The value refered to Ahlstrom/Karhula PFBC unit.

ppm 이하다. 현재 미국과 유럽국가의 환경규제치는 각각 28과 39 ppmw이며, 한국은 77 ppm이다.

2-5. PFBC 집진규격

이상에서 조사된 PFBC 집진의 환경을 종합하면 PFBC 집진규격은 Table 3과 같다.

3. PFBC 집진기술 개발 현황 및 과제

3-1. 고온고압 집진기술 개요

고온고압에서 응용이 가능한 집진의 개념은 여러 가지 소개되었으나 실제로 PFBC 집진에 잠재력이 큰 것은 다단 사이클론, 세라믹 필터, 순환층 여과기(granular bed

filter), 그리고 전기 집진기 등이다.

사이클론은 분진을 포함한 가스에 선회운동을 부여하여, 입자에 상대적으로 큰 원심력을 가할 때 입자가 가스와 분리되는 원리를 이용한다. 입자와 분리된 청정가스는 사이클론 중심부를 통하여 상부로 빠져나간다. 이때 반전류를 따라서 분진이 비산하기 때문에 사이클론의 집진효율에 한계가 따른다. 소형 사이클론에서는 분진의 재비산을 방지하기 위한 여러가지 방법이 제시되고 있으며, 획기적인 집진효율 개선이 발표되었다⁴⁵⁾. 따라서 소형 사이클론을 여러개 사용하는 다단 사이클이 제시되고 있지만 PFBC에서 요구하는 집진효율을 기대하기가 어렵다.

여과체에 형성된 기공을 통하여 가스가 빠져나갈 때 입자들은 충돌, 걸림, 그리고 확산 등의 원리로 여과체 표면에 걸려져서 분진층을 형성하며, 이는 주기적인 역세로 제거되면서 연속적인 집진이 이루어진다. 여과체는 형태에 따라 캔들, 교차형(cross flow), 튜브, 그리고 여과포로 나뉜다⁷⁾. 여과체의 소재로, SiC, mullite, cordierite, alumina/mullite, 그리고 산화 및 복합체 등 다양하게 개발되고 있다⁸⁾. 이 중에서 SiC 캔들, cordierite 튜브, alumina/mullite 교차형 필터 등의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

순환층 여과기는 비교적 작은 입자(1~3 μm)를 순환시키면서 여과층을 형성하여 집진을 수행한다. 층입자의 순환과 세척법에 따라서 여러가지 형태의 집진기가 개발되었다⁸⁾. 순환층 여과기의 집진효율은 층입자의 크기, 여과속도, 그리고 층입자의 세척정도에 따라서 많은 차이를 보인다.

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 방

전극을 포위하고 있는 기체 분자와 음극에 충돌하여 새로운 전자를 연쇄적으로 발생시킨다. 전기 집진기의 성능은 분진의 하전 특성과 입도 분포, 전극간의 전계강도 (electric field strength), 그리고 가스특성 등에 따라서 복합적으로 영향을 받는다.

3-2. 고온고압 집진기 성능

집진기의 성능은 집진효율, 압력손실, 가스처리량 등으로 비교 평가된다. PFBC 적용에 잠재력이 있는 집진기의 성능을 Table 4에 비교하였다.

사이클론은 설계가 간단하고 작동범위가 넓기 때문에 운전조건에 큰 제약이 없고 높은 분진 부하에도 사용이 가능하다. 그러나 집진효율이 PFBC 정밀 집진기로는 부족하다. ExxonTM이 수행한 실험에 의하면 3차 사이클론의 배출농도가 20~100 ppmw로써 대기오염 규제치에도 못미친다. 따라서 PFBC에서 사이클론은 미연탄의 회수 등 보조 수단으로 사용된다.

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%, 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 특징이다. 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. 따

Table 4. The performances of particulate collectros at high temperature.

집진기	처리량 ^{a)} (m ³ N/h m ³)	압력손실 (mbar)	집진효율 (%)	100% 통과 입경 (μm)	5 μm 포집효율 (%)	배출농도 (ppm)	비고
사이클론	2340	20~ 70	99.0	15	70	376	2단
캔들필터	440	60~230	99.9+	3	100	5 이하	
cross flow 필터	1800	20~ 80	99.9+	3	100	5 이하	
순환층 여과기	680	60	99.4	10	95	20 이하	2단
전기집진기	220	12.5	95	10	95	20 이하	

^{a)}Based on the apparent volume.

라서 Table 4에서 배출농도를 20 ppm까지로 잡았다. 기체식 순환시스템으로 증입자를 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 가능하다. 현재 미분탄 화력 발전소에서 가동되고 있는 배연가스 집진기의 효율은 평균 98% 수준이며 배출농도가 100 ppm 이하로 운전되고 있다. 이상을 종합하여 볼 때 세라믹 캔들이 PFBC 집진기로서 제일 무난한 것으로 판단된다.

3-3. 개발현황 및 잠재적 문제점

80년대 중반부터 본격적으로 개발되기 시작한 PFBC 집진의 Pilot 급 이상 시스템에 도입된 예를 Table 5에

요약했다. 캔들 필터의 사용이 가장 돋보이고 잠재력이 크다.

3-3-1. 세라믹 필터

세라믹 필터 중에서 SiC 캔들 필터의 개발은 실험실 급에서부터 Pilot 급까지 다양하게 연구되어 왔다. 캔들 필터는 운전중 파손에 대한 우려가 매우 크지만 전세계적으로 본 시스템에 대한 연구가 제일 활발하게 이루어지고 있다. 이는 안정적인 집진효율을 얻을 수 있고, 시스템 설계 및 운전이 제일 무난하기 때문이다. 최근에 상업적으로 필요한 자료를 많이 획득한 시험이 Grimethorpe UK PFBC [60 MWt, 1980], Ahlstrom Karhula PFBC [70 MWt, 1989], 그리고 AEP Tidd PFBC [71 MWt, 1990]이며 이들 공정에서 캔들필터를 실험한 유량은 각각 7 MWe, 10 MWe, 그리고 10 MWe 이다. 가장 최근까지 시험가동한 곳은 Tidd PFBC로서 PFBC 집진에서 발생하는 문제점들이 비교적 명료하게 밝혀졌

Table 5. Applications of particulate collections for PFBC.

시험장소	집진기 개발사	집진기	처리용량 (acmm)	여과체 수	운전시간	개발연도	비고
Aachen공대(40 MWe)	Aachen공대	SiC 캔들	2	6(1 m)	10,000	85~	
FWDC ^a -Phase2 Lidingstone, NJ	Westinghouse	Cross-flow Candle	12 50	10 22	1000		
Deutsche-Babcock	Deutsche-Babcock	Candle	60	24~60	2000		
Friedrichsfeld(15 MWt)		-					
NYU	Westinghouse	Cross-flow	34	15	50	88	
Long island, NY	CES CPC	전기집진기 순환여과층	35	-	50	87	
			40	-	164	88	
FWDC-Phase3 Livingstone, NJ	Westinghouse	Candle	30	48	-	96~	
IEA ^b /ABB carbon	ABB carbon	Candle	30	48	-	-	
Finnspong, Sweden	Asahi Glass	Tube	30	5	-	-	
SCS ^c	Westinghouse	Candle	192	80	-	건설중	
Wilsonville, AL	IF & P	Caramem channel	-	-	-	-	
Grimethorpe UK	-	SiC candle	99	120	7,000	87 91~92	7 MWe급
Ahlstrom Karhula, finland (10 MWe)	Westinghouse Asahi	SiC candle Tube	88	128	72,000	89~92	1/7용량
			-	15~42	-		
EPDC ^d Wakamatsu Japan (10 MWe)	Asahi	Tube	867	76 (3 m)	75,000	88~	총량1/7slip
AEP Tidd Brilliant, ohio (71 MWe)	Westinghouse	Candle	255	384	76,000	90~95	총량1/7slip

^aFoster Wheeler Development Corporation, ^bInternational Energy Agency, ^cSouthern Company Service, ^dElectric power Development Company.

다. 캔들 필터의 수많은 운전 경험에도 불구하고 다음과 같은 문제점들이 잠정적으로 남아있다.

(1) 기계적인 신빙성

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

(2) 부식문제

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

(3) 분진의 후연소

- 케이크 연소
- 분진폭발

(4) Ash bridge

Grimethorpe PFBC의 초기 운전에서는 설계상의 많은 문제점들로 여과체가 많이 파손되었다. 즉 노즐 용접부의 파손과 노즐 끝부분의 파열 등 재료문제가 지적되었다. 그리고 여과체를 고정하는 counter weight의 집진과 역세기 상하 요동에 의하여 금속과 여과체 사이에 밀봉을 위해 사용한 가스켓이 소실되어 여과체의 파손이 진행되었다. 여과체 설치에 있어서 이와 같은 기계적 문제점들은 그동안 많은 개량을 거쳐서 이미 해결되었다. 그러나 다량의 무거운 여과체를 얼마나 효과적으로 설치하며, 이들의 배열이 유체흐름에 얼마나 안정적인가 등의 연구과제를 남기고 있다. 그리고 여과체의 파손시에 이를 감지할 수 있는 기술과, 파손시에 대처할 수 있는 방법이 개발되어야 세라믹 캔들 필터 사용시 절대적인 신빙성을 확보할 수 있다.

세라믹 여과체 및 결합재는 PFBC 집진조건에서 알칼리 금속 또는 SO_x , NO_x , HF 등의 반응성 가스와 반응하여 기질과 다른 상을 형성한다. 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 여과체에 다결정구조의 상이 존재된다¹¹⁾. 코디어라이트에 포함된 유리질은 PFBC 가스와 반응하여 tridymite로 전환된다. SiC 소재는 고온의 산소나 스티에 산화되어 SiO 내지 SiO_2 로 변화되며, 결합재로 사용되는 무기산화물은 PFBC 조건에서 Na_2O , Na_2SO_4 , 그리고 $CaSO_4$ 등과 같은 알칼리 산화물과 쉽게 반응하여 여과체의 열화가 가속된다. 반응에 따른 여과체의 열화 외에도 알칼리 금속이나 미세한 분진이 기공 내에 응축 내지 축적되면 서로의 열팽창 차이에 의하여

여과체 균열이 발생될 수 있다.

분진의 후연소 내지 폭발 현상은 Wakamatsu PFBC의 운전에서 많이 지적된 사실이다. 분진중의 미연탄소가 여과체에 쌓여있다가 PFBC 가스에 잔류하는 산소와 반응할 수 있는 여지가 충분히 있다. 이와 같은 문제들은 분진 케이크를 적절하게 제거함으로써 운전기술적으로 해결할 수 있는 문제다.

회가고(ash bridge)에 의한 여과체의 파손은 Tidd PFBC에서 지적된 사실이다¹²⁾. 알칼리 금속 화합물을 포함한 미세한 분진은 용융점이 낮아서 PFBC 집진조건에서 거의 응결되는 특성을 갖는다. 따라서 역세시에 제거되지 않고 여과체를 틈새에 축적되어서 회가고를 형성하며 이것이 기계적인 충격의 원인이 된다는 분석이다.

운전중에 일어나는 여과체의 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 여과포 등 다양한 소재와 형태로 여과체가 개발되고 있으며, 이들이 갖는 결점을 보완하기 위하여 많은 연구가 시도되고 있다. 특히 cordierite 튜브는 일본의 Wakamatsu PFBC에서 상용 도입을 위한 검증이 이루어지고 있으며, 최근에 성공적인 연속운전 성과가 보도되고 있다.

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 운전경험도 짧다.

3-3-2. 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.

3-3-3. 기타

전기 집진기는 이론적으로 높은 집진 효율이 예상되지만 실제로는 아주 저조한 결과를 보인다. 그 이유는 고온에서 전기장의 강하와 시스템 밀봉의 파손으로 인한 것으로 분석된다¹³⁾. PFBC와 같은 고온고압에서 내구성이 있는 전극설치에 큰 난점이 있다. 따라서 PFBC의 운전경험은 NYU PFBC에서 45시간 가동한 것이 제일 길다.

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

3-4. 세라믹 캔들 필터의 개발과제

3-4-1. 여과체 개발

여과체 개발의 주안점은 원하는 집진효율을 달성하고 높은 여과속도에서 낮은 압력감소, 열 및 기계적 충격 내구성, 무게의 경량화, 그리고 화학적 및 장기 운전 내구성의 확보에 있다. 최근에 여과체 외벽에 기공이 작은 얇은 여과막을 입혀서 표면 여과를 시킴으로써 여과체의 여과 특성이 많이 개량되었다. Fig. 1은 독일 Schumacher사가 개발한 여과체의 압력손실 특성을 보인 것이다. 단일층으로 제조된 Schumalith 캔들이 운전 시간에 따라 급격한 압력손실의 증가를 보이는데 반하여 이중층 구조를 가진 Dia-schumalith는 16,000 사이클 이후에도 거의 일정한 압력손실을 보인다. 이는 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.

여과체의 소재는 가볍고 가격이 싸면서 고온고압에서 물리 화학적으로 내구성이 있는 특성을 갖추어야 한다. PFBC 가스는 750°C 이상에서 여러 가지 반응성 가스가 존재하므로 소재 및 결합재의 화학적 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 알루미늄/몰라이트 등의 산소계 소재도 이용되고 있다.

SiC 필터를 구성하는 입자는 점토나 알루미늄실리케이트 결합재 또는 유리질 결정체에 의하여 결합되며, 결합재의 특성이 소결 조건과 함께 필터의 강도를 크게 좌우한다. 코디어라이트(Mg, Al, Si, O_8) 필터는 적당한 소결 조건에서 몰라이트, spinels, 그리고 colundum이 형성되어 결합된다. 알루미늄/몰라이트는 corundum(Al_2O_3)과 anorthite($CaAl_2Si_2O_8$)를 포함하는 비경질상에 쌓인 몰라이트 붕이나 침으로 구성된다. 매트릭스 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 Table 6에 보인 바와 같이 세라믹 fib-

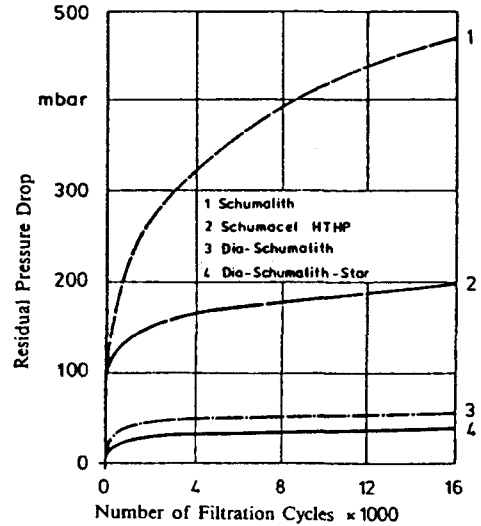


Fig. 1. The residual pressure drop versus the filtration cycles; Face velocity=200 m/h; Cycle duration=6 min; Temperature=850°C¹⁶⁾.

er나 세라믹천을 보강하여 여과포 형태나 세라믹 fiber를 결합재로 성형소결한 캔들이 최근에 개발되고 있다.

3M사가 개발한 Nextel™은 다결정 금속산화물 섬유(Al_2O_3 , 62%, SiO_2 , 24%, B_2O_3 , 14%)다. 이것을 SiC 매트릭스로 보강하면 1300°C까지 내구성이 있는 여과포를 제조할 수 있는 것으로 보고되었다. BWF의 fiber 캔들은 2~3 μm 의 천연 실리케이트 fiber를 무기 결합재로 성형한 것으로서 산화 상태의 내구성이 우수한 것으로 보고되었다. 그리고 PLANSEE에서 크롬 재료로 개발한 금속 캔들은 850°C까지 내구성이 있는 것으로 알려졌다. 이러한 신행 캔들은 Table 6에서 보는 바와 같이 운전경험이 아직 부족한 상태지만 캔들필터가 갖는 문제점들을 개량할 수 있는 가능성을 보인다.

3-4-2. 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. 캔들은 Fig. 2와 같이 자체의 턱이 있어서 튜브 시트에 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 장기간운전의 내구성, 주어진 집진기 사이즈로 최대의 여과면적을 확보하는 캔들의 배열, 가스흐름을 분진 낙하 흐름과 같이 형성하여 재비산을 줄이는 일, 집진기 내부의 가스유동 분포를

Table 6. Status of hot gas filter materials qualification.

Matrix	Laboratory Testing/ Characterization	PFBC Testing	PCFB Testing	IGCC Testing
Clay Bonded SiC F40	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	×			

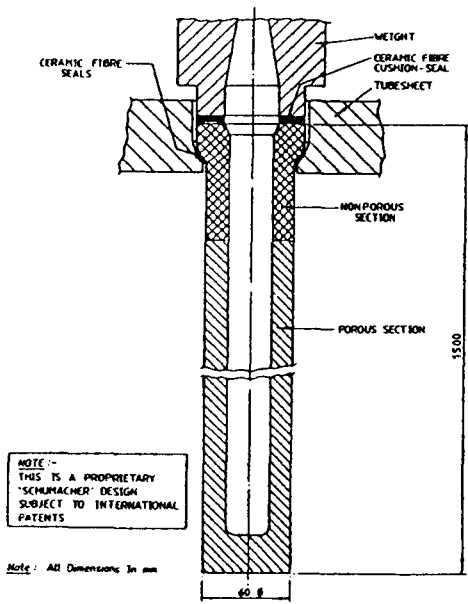


Fig. 2. The typical scheme showing the element mounting¹⁾.

균일하게 하는 것, 그리고 역세가스를 최소화하는 것 등이다. 장기운전 내구성을 높이기 위해서는 금속 부분의 열팽창 및 고온 부식, 역세 노즐 부분의 금속재질 선정 및 최적설계 등이 중요하다. Fig. 3은 Grimethorpe PFBC에 설치된 집진기 설계를 보인 것으로써, 튜브시트를 cone형으로 설계하여 열팽창 여유를 둔 것이 특색이다. 상용설비에서는 수천개의 캔들을 효율적으로 배

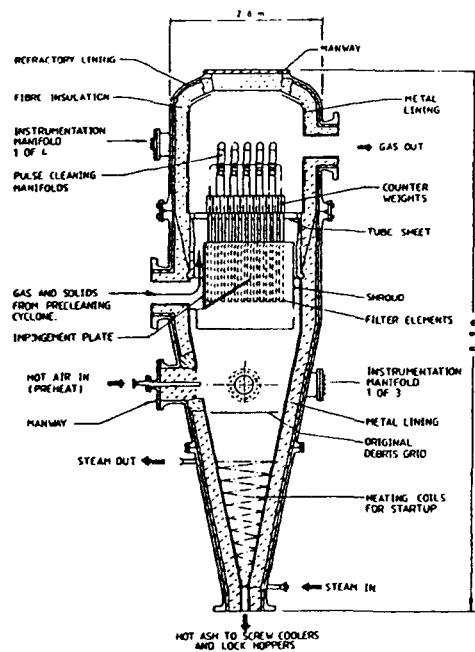


Fig. 3. The design of candle filter for Grimethorpe PFBC¹⁾.

열하는 것이 경제성과 직결된다. 이 경우에는 캔들의 세척을 그룹별로 하게 되며 튜브시트도 여러층으로 설계된다. Fig. 4에 weighhouse가 개념 설계한 Tier 필터를 보였다. 그리고 Fig. 5는 LLB(Lurgi Lentjes Babcock)이 설계한 개념도이다. 이들 Tier 형은 주어진 공간에 최대의 캔들을 설치하기 위하여 효과적으로 배열한 것이다.

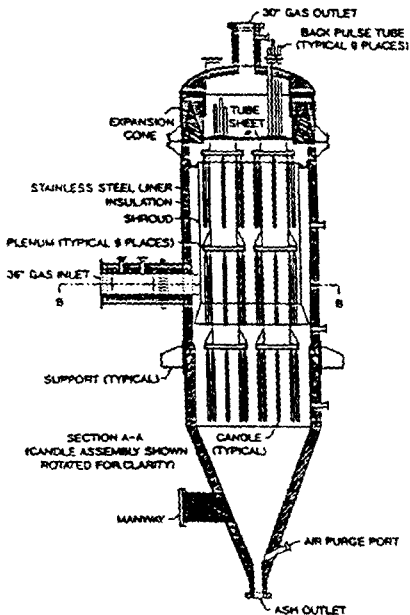


Fig. 4. Westinghouse candle filter system¹⁷⁾.

그러나 실제로 운전시에는 회의 배출 및 재비산 등에서 많은 문제점이 발생될 것으로 예상된다. 최근에 비교적 실제에 가깝게 운전된 것은 Tidd와 Grimethorpe의 PFBC이다. Grimethorpe PFBC의 집진기는 1.5 m 캔들 130개를 단일 튜브시트에 설치한 것으로써, 850°C 10 bar에서 790 시간 동안 연속운전을 수행했다¹⁴⁾. 수행과정에서 총 17개의 캔들이 파손되었으며, 사용된 금속의 내구성에 많은 문제점을 보였다. 즉 캔들을 지지하는 튜브시트가 뒤틀리고 펄스 노즐의 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 운전되었다¹⁵⁾. 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 가스 흐름에서 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 진행되

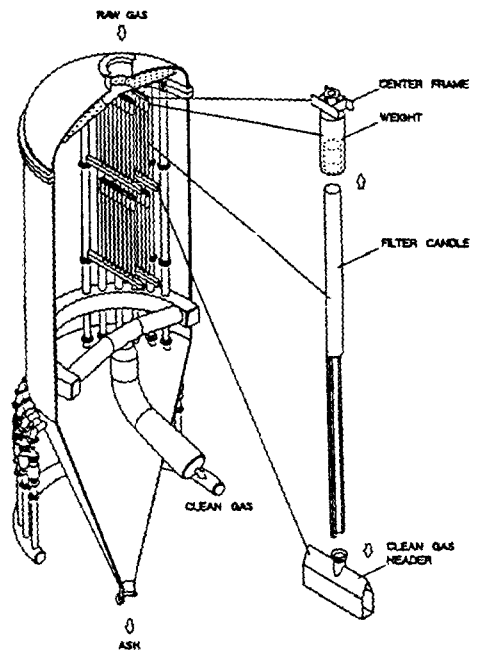


Fig. 5. The candle system designed by LLB¹⁷⁾.

고 있으나 아직까지 개발단계에 있다.

3-4-3. 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 알루미나/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 10 bar와 680°C에서 340 시간 동안 성공적으로 운전되었다.

이와같이 세라믹 집진기의 상용화 적용을 위한 현장 적용시험이 외국의 여러 연구기관에서 수행하여 일부 짧은 기간에 성공적인 시험이 수행되고 있으나 필터의 파손과 시스템의 설계 미숙에 대한 문제점들이 지속적

으로 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 PALL 사에서는 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 Schumacher 사에서는 유동밸브를 사용하여 캔들이 파손되어 유속이 이외로 증가되면 자동적으로 닫힐 수 있는 방법을 소개했다. 이런 시스템은 저온에서는 용이하게 작동될 수 있을지 모르지만 PFBC와 같은 고온에서는 무리다. 캔들필터의 신빙성을 확보하기 위하여 상당한 노력이 있지만 이 부분의 문제가 가장 심각하게 지적되고 있다.

4. 맺음말

PFBC 집진의 조건과 개발현황과 과제를 조사하였다. PFBC의 정밀집진은 현재까지 상용화된 기술로는 감당하기 어려운 정도로 가혹한 조건이기 때문에 PFBC 개발의 성공여부가 집진에 크게 좌우되는 것으로 판단되고 있다. 따라서 PFBC 집진기술의 개발을 위하여 우선적으로 최적 시스템의 선정은 경제성 보다는 기술적 가능성에 의하여 결정되어졌다. 본 고에서는 PFBC 집진의 조건, 개발현황, 성능, 그리고 개발의 잠정적인 문제점 등을 조사하였다.

현재 고온고압에서 응용이 가능한 집진 시스템으로는 사이클론, 세라믹 필터, 순환층 여과기, 그리고, 전기 집진기 등이 있으며, 이들은 각각 PFBC 집진기로서 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 층입자의 안정적인 순환 및 세척이 PFBC 조건에서 사실상 어렵고 집진효율도 만족스럽지 못하였다. 전기 집진기는 PFBC의 고온고압에서 전극설계가 어렵고 고온에서의 전압 강하특성으로 집진효율이 이론적인 것보다 현저히 감소되는 것으로 조사되었다. 따라서 현재 PFBC 집진은 세라믹 캔들 필터에 많은 기대를 갖고 세계적으로 상용기술을 확보하기 위한 실증시험이 많이 이루어지고 있다.

세라믹 캔들 필터의 잠정적인 문제는 고온고압에서 여과체가 가스화 분진과 반응하여 기질과 다른 이질상

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

참고문헌

1. Grimethorpe PFBC Establishment: "Grimethorpe High-Temperature/High-Pressure Gas Filter Experimental Program", Vol. 1, TR-100499, Final Report, September (1992).
2. 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).
3. Schifter, H.P., Laux, S., and Rent, U.: "High-Temperature Gas Filtration", 2, GS-6489, Final Report, October (1992).
4. Paul, D.D., Razagatics, R. and Jordan, H.: IChemE Symposium series No. 99, 1 (1986).
5. Syred, N., Biffin, M., and Sage, P.: 12th EPRI conference on gasification power plants, Hyatt Regency SF, October 17-29, (1993).
6. Yoshida, H. and Fujioka T.: 5th Korea-Japan powder technology joint seminar, Deagu, Korea, Aug. 24-25, p. 74, (1993).
7. 최주홍, 정진도: "고온고압 집진기술", 화학공업과 기술, 13(5), 475-484 (1995).
8. 정진도, 최주홍: "석탄가스화 및 연소가스 집진을 위한 세라믹 필터 집진기술 평가", 대한환경화학공학회지, 17(8), 1-12 (1995).
9. 최주홍 외: "가압유동성복합발전용 고온고압 분진 제거 기술개발(I)", 통상산업부 (1996).
10. Hoke, R.C. and Ernst, M.: Proc. 6th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion, Atlanta, GA, p. 264 (1980).
11. Alvin, M.A.: "High Temperature Filter Materials", EPRI DE-AC 21-88MC 25034, pp. 137-345 (1992).
12. DOE/EPRI: "Overview of Hot Gas Filter EWx-

- perience at Tidd", *Materials & Components in Fossil Energy Applications*, No. 120, February 1, (1996)
13. Zakkay, V. and Gbordzoe, E.A.M.: "Combustion En Lechos Fluidizados", Zaragoza, (1989).
 14. 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 clean-up systems contractors review meeting, METC Morgantown, West virgina, October 27-29, 186 (1992).
 15. 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 C 8014, April 5, (1993).
 16. Durst, M. Muller, M. and Vollmer, H.: Private company report, (1988).
 17. Seville, J.P.K., Ivatt, S., and Burnard, G.K.: "Recent Advances in Particulate Removal from Hot Process Gases", *High Temperature Gas Cleaning* ed. by E. Schmidt *et al.*, Institut fur Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, p. 3, (1996).