

## PFBC 집진용 세라믹 캔들필터의 기술개발 과제

최주홍  
경상대학교 화학공학과

### 요 약

석탄의 고압 유동층연소는 기존의 PC 보일러보다는 저온 연소로써 NOx의 발생이 억제되며 탈황제를 동시에 주입하여 SOx 발생을 줄일 수 있는 것이 큰 잇점으로서 석탄 신에너지 개발에 유력한 시스템이다. 본 시스템에서 집진은 연소가스 중의 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 매우 가혹한 조건이다. 뿐만 아니라 차세대에 더욱 높은 열효율 향상과 가스터빈의 수명 연장을 위하여 집진조건이 더욱 가혹해지고 엄격해질 전망이다. 그 동안 PFBC 집진의 연구가 다방면으로 진행되고 있으나 상용화를 위한 준비가 아직 갖추어지지 않았으며 모든 집진 시스템이 잠재적인 문제점을 갖고 있다. 그 중에서도 세라믹 캔들 필터는 성능이 우수하고 가장 많은 운전경험을 갖고 있기 때문에 가장 가까운 시기에 상용화에 성공할 수 있는 집진 시스템이다. 본 고에서는 세라믹 캔들필터 개발의 현황과 핵심 개발과제에 대하여 논의코자 했다.

### 1. PFBC 집진환경

PFBC 집진의 운전조건은 탄종, 유동화법, 설계에 따라서 다소 다르지만 온도와 압력이 800 ~ 900℃와 10 ~ 13 bar 이다. 이는 기존 화력 발전의 배가스 처리온도 150℃와 IGCC의 400 ~ 550℃보다 매우 높다. 가스처리량은 열효율, 운전조건, 그리고 탄종에 따라 다르다. PFBC 집진기가 처리하여야 하는 가스량은 IGCC보다는 8 ~ 15배 많고, PC보다는 2 ~ 3배 정도 작다. PFBC 압력이 PC보다 10배 이상 높음에도 불구하고 가스처리량이 현저히 줄어들지 않는 것은 집진온도가 높기 때문이다.

PFBC 가스는 대부분이 석탄의 완전연소에서 생성되는 만큼 잉여 산소가 약간 존재하는 산화분위기로써 반응성이 강한 CO, SOx, NOx, HCl 등이 ppm 단위로 포함되어 있고<sup>1)</sup>, 이 외에도 탈황 흡수제로 사용하는 알칼리 금속가스, 중금속가스, 및 석탄에 함유된 각종 화합물에서 발생된 가스와의 반응에 의하여 집진기의 열화가 가속될 수 있다.

PFBC 분진은 석탄회, 미분탄, 황흡수제 및 그 화합물 등의 고체 부유물로 구성된다. 분진의 물리적 특성으로써 집진에 미치는 중요한 인자는 형상, 입도분포, 밀도, 그리고 충전특성(compactness) 등이 있다. PFBC 분진 입자는 침상이나 모가 나 있으며, 이는 회용융이 일어나는 PC 보일러 분진이 구형을 갖는 것과 대조적이다. PFBC 분진의 입자 사이즈는 전반적으로 PC 보일러 분진보다 크며 평균 입경이 20 ~ 70 $\mu$ m 이다.

PFBC 집진의 주 목적은 가스터빈 및 하류공정의 보호다. 800℃이상과 10 atm 이상에서 작동되는 가스터빈에 있어서 입경 5 $\mu$ m 이상의 분진은 가스터빈 날개에 치명적인 침식요인이 된다. 입경이 작은 분진의 경우 터빈 날개에 용융부착하여 터빈의 냉각 기능을 방해하며, 미세한 알칼리 금속화합물은 고온 반응을 일

으며 부식의 원인이 된다. 따라서 각 가스터빈 제조회사에서는 제품에 맞게 분진의 허용농도를 규정한다. STAL-LABAL과 GE에서 정한 가스터빈 유입가스 중의 분진부하는 입경  $20\mu\text{m}$  이하와 누적농도 10 ppm 이하이다. 차세대 PFBC 집진규격은 이보다 더욱 엄격해질 것이며  $5\mu\text{m}$ 이하의 입자를 10 ppmw 이하로 줄이는 것이 바람직하다.

## 2. 세라믹 캔들필터의 개발 현황 및 과제

세라믹 캔들 필터는 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. 여과체의 소재로, SiC, mullite, cordierite, alumina/mullite, 그리고 산화 및 복합체 등 다양하게 개발되고 있다<sup>2)</sup>. 이 중에서 SiC 캔들, cordierite 튜브, alumina/mullite 교차형 필터 등의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

집진기의 성능은 집진효율, 압력손실, 가스처리량 등으로 평가된다. 이중층으로 구성되어 있는 캔들 필터의 집진은 주로 멤브레인층에서 이루어지며 이 층의 기공크기 조절에 의하여 집진효율이 조절된다. 현재 상용으로 제조되고 있는 SiC 캔들의 기공은  $10\mu\text{m}$  정도이며 PFBC 운전조건에서 집진효율이 99.9%,  $5\mu\text{m}$  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. 그러나 이의 상용화를 실현하기 위해서는 다음과 같은 개발과제가 남아있다.

### 2.1. 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. 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  $750^{\circ}\text{C}$  이상에서 여러 가지 반응성 가스가 존재됨으로 소재 및 결합체의 화학적 내구성이 중요하다. 그리고 저온의 가스로 역세할 때 형성되는 열충격과 기계적인 충격에 견딜 수 있는 캔들의 제조는 소재와 결합체의 특성 및 제법에 크게 좌우된다. 세라믹 필터 소재로서 물라이트, 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, 알루미노실리케이트 섬유, 그리고 알루미나/물라이트 등의 산소계 소재도 이용되고 있다.

SiC 캔들과 같이 입자의 소결로 제조된 여과체는 유연성이 부족하기 때문에 파손시에 결정적인 문제점을 유발시킨다. 따라서 세라믹 fiber나 세라믹천을 보강하여 여과포 형태나 세라믹 fiber를 결합체로 성형소결한 캔들이 최근에 개발되고 있다.

## 2.2 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 자체의 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<sup>3)</sup>. 장기운전 내구성을 높이기 위해서는 금속 부분의 열팽창 및 고온 부식, 역세 노즐 부분의 금속재질 선정 및 최적설계 등이 중요하다. 상용설비에서는 수 천개의 캔들을 효율적으로 배열하는 것이 경제성과 직결된다. 이 경우에는 캔들의 세척을 그룹별로 하게 되며 튜브시트도 여러층으로 설계된다. 이들 Tier 형은 주어진 공간에 최대의 캔들을 설치하기 위하여 효과적으로 배열한 것이다. 그러나 실제로 운전시에는 희의 배출 및 재비산 등에서 많은 문제점이 발생될 것으로 예상된다.

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 개발단계에 있다.

## 2.3 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<sup>4)</sup>.

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. 독일의 Schumacher사에서는 유동밸브를 사용하여 캔들이 파손되어 유속이 이외로 증가되면 자동적으로 닫힐 수 있는 방법을 소개했다. 캔들필터의 신빙성을 확보하기 위하여 상당한 노력이 있지만 이 부분의 문제가 가장 심각하게 지적되고 있다.

## 3. 맺음말

세라믹 필터는 운전시의 열 및 기계적 충격으로 파손되어 전체 시스템에 치명적인 트라벌을 유발할 수 있는 문제점을 갖고 있지만 정밀 집진기로서 안정적인 집진효율을 달성할 수 있다. 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 가스와 분진과 반응하여 기질과 다른 이질상을 형성함으로써, 여과체의 강도가 감소하고 또한 열충격 저항이 감소되는 것으로 밝혀지고 있다. 그러나 최근에 새로운 결합제의 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 운전조건외 확보, 다량의 여과체를 효율적으로 배열하는 문제, 그리고 여과체의 파손시에 이를 감지하고 처리할 수 있는 보완 시스템의 확보가 큰 문제점들로 지적되었다.

### 참 고 문 헌

1. Grimethorpe PFBC Establishment: "Grimethorpe HTHP Gas Filter Experimental Program, Vol. 1, TR-100499, Final Report, September (1992).
2. 최주홍 외: "가압유동성복합발전용 고온고압 분진제거 기술개발(I)", 통상 산업부 (1996).
3. Seville, J.P.K., et al. : "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, pp3, 1996.
4. Alvin, M.A., et al. : "High temperature filter materials", Proc. of the 9th annual coal-fueled heat engines, advanced PFBC, and gas stream cleanup systems contractors review meeting, METC, October 27 - 29, 1992).