

가압유동층 복합발전용 고온고압 집진시스템 개발

박석주, 임정환, 박영옥
한국에너지기술연구원 집진기술연구센터

Development of High Temperature High Pressure Filtration System for Pressurized Fluidized Bed Combustion

Seok Joo Park, Jeong Hwan Lim, Young Ok Park
Korea Institute of Energy Research, Particle Technology Research Center

서론

가압유동층 복합발전은 차세대 최첨단 석탄활용기술로써 기존 발전공정에 비하여 50% 이상의 효율 향상을 가져다 주는 것으로 알려져 있지만, 엄격한 환경오염 규제와 발전용 터빈의 보호를 위한 허용 분진농도의 기준 때문에 고온고압 가스의 정제시스템인 고온고압 집진시스템은 필수 요소 장치로써 간주되고 있다. 그리고 집진장치 내에 설치되는 중요한 요소 부품으로 사용되는 집진필터는 고온고압에 강한 소재가 사용되어야 하기 때문에 금속, 유기물 필터가 아닌 세라믹 필터가 사용되고 있다. 또한 다양한 세라믹스 중에서도 고압에 우수한 특성을 보이는 탄화규소 세라믹스가 고온고압용 필터의 소재로 부각되고 있다. 이러한 고온고압용 집진필터는 미국, 일본, 영국, 독일, 프랑스, 러시아 등의 선진국에서 이미 개발하여 시판하고 있다. 고온고압용 집진필터의 다양한 형상이 그동안 연구 개발 및 현장적용 되어져 왔는데 금속섬유필터, 세라믹 섬유필터, cross-flow filter, tube type filter, rigid ceramic candle filter 등이 현재 개발되어 상품화되고 있다. 이 중에서도 캔들필터(candle filter)는 구조가 간단하고 설치 및 제조가 용이하여 가장 보편적으로 사용되는 형상이다. 집진장치 내로 유입된 고온고압의 배가스는 캔들필터의 표면에 포집되어 제거되고 청정한 기체만이 filter의 내부를 통하여 외부로 배출되게 된다.

본 과제 의 1단계에서는 1998년부터 2000년까지 3년간 가압유동층 연소공정에 적용하기 위한 전단계로써 500℃, 5 atm의 고온고압 가스를 고효율로 정제할 수 있는 집진시스템을 개발하였다. 고효율 고내구성 세라믹 집진필터의 국산화에 관한 연구를 통하여 탄화규소 세라믹 집진필터 개발과 다공성 탄화규소 세라믹스의 제조기술을 확보하였다. 가압유동층 복합발전 조건에 실질적으로 적용하기 위해서는 현재 개발된 집진시스템의 upgrade가 필요하며, 고온고압 가스 정제시스템의 국산화를 위한 핵심기술인 고온고압용 집진필터의 상용화 및 양산화를 위해서는 집진필터의 자동성형기술 개발이 필요하며 장기간 현장적용 시 특성저하를 방지하고 외국에서 상용화되고 있는 필터와의 경쟁력 확보를 위해서는 지속적인 연구개발이 요구되어 2단계 연구개발에 착수하게 되었다.

다양한 고온, 고압, 여과속도, 탈진압력, 입자부하량별 조건에 따른 집진성능과 탈진 성능을 실험하여 성능향상 방안을 제시하기 위해서 우선 이전 고온고압 집진시스템의 처리용량과 가열방식을 개선 보완하고, 조건별 집진시스템의 성능평가를 하고자 하였다. 집진필터는 기존의 clay 뿐 아니라 silica, mullite, alumina 등으로 무기결합체를 다양화하여 필터의 고온고압조건에서의 장시간 사용 시 특성저하를 방지하기 위한 기초기술을 확보하고자 하였다. 특히 고온, 고압, 열충격, 고온부식가스등 가압유동층 복합발전에 사용되는 환경과 유사한 분위기 하에서 필터의 강도가 얼마나 저하하는지를 평가하여 개발된 필터의 신뢰성 여부를 판단하고자 하였다.

집진성능평가 실험

가압유동층 연소배가스 조건을 모사한 고온고압 배가스 처리용 실험장치의 주요 구성은 그림 1에 나타난 바와 같이 상온의 고압공기를 간접방식으로 가열시켜 고온고압의 공기로 만들어주는 열풍발생장치, 개발된 세라믹 집진필터의 여과성능을 실험하기 위한 filter vessel, 고온의 기체 내의 먼지농도를 조절하기 위한 실험용 먼지공급 및 분산장치, 탈진성능을 규명하기 위한 pulse jet cleaning system, 고온으로 배출되는 기체의 냉각을 위한 Cooler, 자료획득 및 처리부분 등으로 구성되어 있다. 고온고압용 배가스 정제용 집진필터의 성능시험용 실험장치의 filter를 설치하는 filter vessel은 총 5개의 단으로 구성되어 문제점 및 파손이 발생할 경우 분해 및 대체가 용이하도록 설계 제작하였다. 또한 내부에 단열 내화재를 충전하여 중앙부분에 흐르는 고압공기의 온도가 원하는 고온상태를 유지하여도 vessel 표면온도는 68℃ 이하로 유지되도록 설계되었다. 필터는 4분을 서로 대칭 구조를 이루도록 배치하였으며, 별도의 탈진 노즐을 사용하도록 하였다.

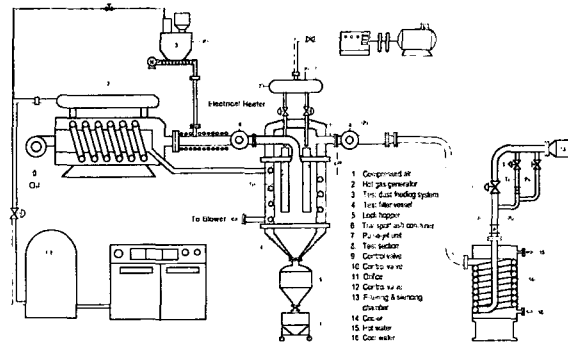


그림 1. 가압유동층 연소조건 모사 고온고압 집진필터 성능실험장치 공정도.

설계상의 특이점으로는 먼지를 함유한 공기를 상부 중앙에서 유입시키도록 한 것으로, 전산 시뮬레이션을 통한 vessel 내부에서 기체의 유동 분포와 분진의 농도 분포 특성을 수치 해석한 후, 집진 및 탈진효율을 향상시키도록 고안 설계하였다. 또한 집진 및 탈진 시 먼지층의 형성 및 분리현상을 관찰하기 위하여 sight hole을 설치하였다. Filter vessel의 설계사양 및 작동조건은 다음과 같다.

- 설계 온도 : Max. 800 ℃
- 설계 압력 : Max. 15 kgf/cm² gauge
- 처리 유량 : 최대 800 m³/hr Normal
- 필터 제원 : 60 x 40 x 500 mm (4 EA)
60 x 40 x 1000 mm (4 EA)
- 여과 면적 : 0.375 m², 0.75 m²

시험용 먼지 저장용 Test dust storage hopper는 고압에서 발생 될 수 있는 leak와 먼지의 압축현상 방지에 중점을 두고 설계 제작을 되었으며, 실험 중에 먼지 저장조를 열고 먼지를 보충 할 수 있도록 ball valve를 설치하였다.

탈진용 공기는 공기압축기에서 발생되어 공기 중의 수분과 불순물 제거장치로 유입되어 압축공기 내에 함유된 수분과 불순물이 완전히 제거된 건조공기를 압력 조절기에서 조절되어 압축공기 저장조로 유입 저장된다. 압축공기는 2개의 저장

조로 분리 저장되며, 저장조 1개에 2개의 필터의 cleaning이 적용되도록 설계하였다. 탈진용 압축공기의 유입을 원활하게 하고 탈진공기의 분사속도를 증가시키기 위하여 사용하는 venturi block의 상부를 라운드로 설계하였다.

고압 공기의 온도를 상온에서 1000℃까지 증가시키기 위하여 Hot Gas Generator (HGG)를 제작 설치하였다. HGG는 공기 유입부에 2개의 예열용 전기 히터, 본체부에는 오일버너가 설치되어 있다. 본체는 외경이 1251mm이고 표면을 150mm의 단열 내화재로 처리하여 연소열의 손실을 최소화하였으며, 내부에 압축공기 line을 코일형태로 배치하여 열효율을 극대화하였다. 특히 연소배기 가스 배출구를 버너의 중심과 일치시켜 설치함으로써 화염이 휘어지는 것을 방지하였다. 화염이 휘어지거나 넓게 퍼지면 코일형태의 압축공기 line에 화염이 접촉하여 국부과열로 인한 파손이 발생할 수 있다. Line heater는 HGG후단에서 Vessel 입구까지의 Duct에 설치한 것으로, 실험장치에서 발생하는 열손실을 보전하는 측면에서 ΔT 를 100℃/m로 하여 설계하였다. Line heater는 설치 및 보수가 용이하도록 약 50 cm 정도 길이로 5조로 분리, 제작하였다. 또한 1개조는 2개의 히터를 길이방향으로 분리되도록 제작되었다.

가압유동층 배가스 정제용 모사실험에서 배출되는 고온 및 고압의 공기를 냉각시키기 위한 장치로, 고온조건에 적용시킬 수 있는 유량계 및 유량 조절 밸브의 선정에 어려움이 있어, 온도에 따라 부피가 변화되는 공기의 성질을 이용하여 고온 및 고압의 공기를 조절 가능한 범위로 냉각시켜 실험장치 내부의 유량, 압력 및 온도를 조절하도록 설계하였다. 고온 고압의 공기는 cooler내부에 설치된 tube 안으로 통과하고 외부에 물을 충전 및 순환시켜 냉각시키는 condensing 방법을 채택하였다. 온도가 감소할 경우 부피가 적어짐으로서 압력이 감소되므로 후단의 배출구를 확대시켜 소음도 제거할 수 있도록 하였다.

실험 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 실험용 먼지는 동해화력 CFBC(coal fluidized bed combustor) 발전소의 석탄 미분탄 연소 후 발생된 분진입자로서 평균입자크기(MMD) 2.038 μm , 입자크기 표준편차는 1.931, 비중 2.2 g/cm^3 이다. 실험용 먼지는 screw type 먼지 정량공급장치에서 정량화 되어 공급되며, 먼지의 공급량은 screw의 회전수로 조절된다.

세라믹 집진필터의 성능실험을 하기 위하여 필터 면속도(face velocity)를 2, 3, 4 m/min 으로, filter vessel 내부 압력을 1, 3, 5 kgf/cm^2 으로 변화시켜가면서 필터 양단의 압력손실 변화를 측정하였다. 내부 온도는 먼지 상온으로 고정하여 실험하였고, 고온 조건에서의 실험결과와 비교하기 위한 기준으로 설정하였다. 탈진에 사용되는 압축공기의 게이지 압력은 내부압력보다 5 kgf/cm^2 더 높게 설정하였으며, 분사시간은 100 ms로써 세라믹 집진필터 양단의 압력손실이 500 mmH_2O 에 도달하면 자동으로 탈진되도록 조작하였다.

그림 2은 분진입자를 공급하지 않은 상태로 filter vessel 내부의 압력을 일정하게 한 상태에서 필터 표면에서의 여과속도를 변화시켜가며 필터 양단의 압력손실을 측정한 결과이다. 필터 양단의 압력차는 식 (1)과 같이 점성력에 의한 요소와 관성력에 의한 요소의 합에 의하여 결정이 된다. μ 는 기체점성계수, α 는 필터의 투과율(permeability), v 는 여과속도, C 는 관성저항상수(inertial resistance factor), ρ 는 기체밀도, Δm 은 필터두께를 의미한다. 필터의 기공을 통하여 흐르는 유동이 층류인 경우에는 관성력에 의한 영향은 무시된다. 점성력에 의한 압력손실 성분은 기체의 점성계수와 여과속도에 비례하고, 필터의 투과율에 반비례한다. 필터의 투과율은 필터 고유의 물리적 특성이기 때문에 주위 기체의 조건에 의하여 영향을 받지 않고 일정하게 유지되기 때문에, 기체가 필터를 통과하는 여과속도가 일정할 경우 점성력에 의한 압력손실은 기체의 점성계수에

비례하게 된다(FLUENT User Guide, Volume 1, p. 6-104). 기체의 점성계수는 절대온도가 증가함에 따라 증가하지만, 압력의 변화에는 무관하다(물리학, Alonso-Finn, p.397).

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad (1)$$

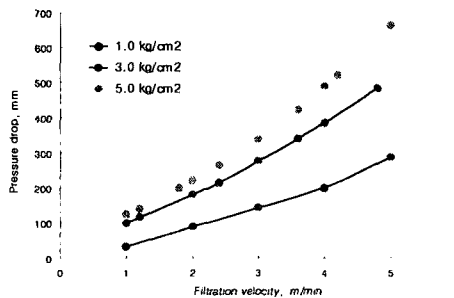


그림 2. 여과속도에 따른 vessel 내부 압력별 초기압력손실 변화.

그러므로 vessel 내부 압력이 높은 경우 필터 양단의 압력손실이 증가하는 이유는 장치 전체 공정에 의한 것으로 설명될 수 있다. Compressor로부터 열풍공급장치를 거쳐 filter vessel을 통하여 열교환기, 소음기 등을 지나 외기로 흐르는 공기유동이 존재하기 때문에 compressor로부터 외기까지 순차적으로 위치별 압력 감소가 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 관로와 내부 장치들로 인한 압력손실로 볼 수 있는데, vessel 내부 압력이 증가함에 따라 compressor에서 공급해주는 유량이 증가하게 되어 장치 전체를 통한 압력손실량이 증가하기 때문에 그림 2와 같은 결과를 얻은 것으로 사료된다.

그림 3은 입자공급장치로부터 일정량의 분진이 공급되어 운전시간의 경과에 따른 필터 표면으로의 입자부하량이 증가함에 따른 여과속도별 압력손실 변화를 보여준다. 필터 표면에 부착되는 분진층이 입자부하에 의하여 증가함에 따라 필터 양단의 압력손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 여과속도가 증가함에 따라 같은 입자부하량에 대한 압력손실이 증가하는 것은 여과속도의 증가로 인한 필터 여재와 분진층을 기체 통과에 의한 점성저항력 증가로 인한 것이다. 여과속도가 클수록 입자부하량에 따른 압력손실 증가율이 큰 것은 여과속도가 큰 경우 필터 표면에 형성되는 분진층의 기공율이 감소하기 때문이다.

그림 4는 vessel 내부 압력이 변화할 경우 입자부하량에 대한 필터 양단의 압력손실의 변화를 보여준다. 여과속도가 3 m/min으로 일정한 경우 vessel 내부 압력이 높은 경우 절대적인 유체의 질량유량이 증가하여 공급되는 입자가 필터표면까지 전달되는 입자부하량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 전체 집진시스템을 따라 흐르는 기체유동에 의한 압력손실 성분도 추가로 작용하기 때문이다.

그림 5는 운전시간에 따른 여과속도별 압력손실 변화를 보여준다. 여과속도가 증가할수록 필터 표면으로의 입자부하량이 증가하기 때문에 탈진개시압력에 이르는 시간이 감소한다. 여과속도가 2, 3 m/min인 경우는 탈진 후 낮은 압력손실까지 도달하지만, 4 m/min인 경우는 탈진 후의 압력손실이 계속 증가한다. 여과속도 증가함에 따라 탈진 후의 압력손실 감소량이 작은 것은 여과속도가 높은 경우 분진층의 부착상태가 더욱 조밀해져 탈진 후 필터 표면에 더 많은 입자들이 잔류하거나 탈진된 입자들의 재비산에 의한 재부착량이 많기 때문이다.

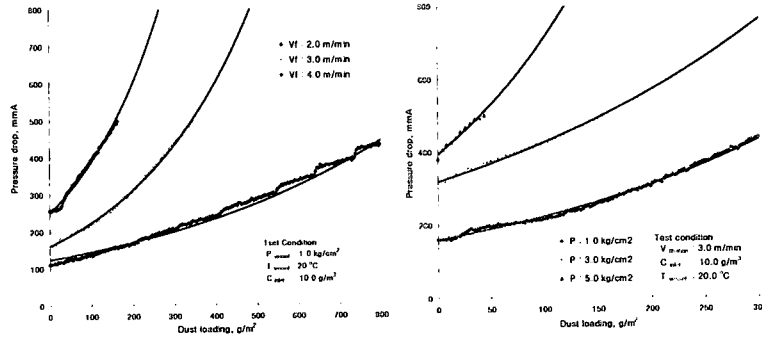


그림 3. 입자부하량에 따른 여과속도별 압력손실 변화.

그림 4. 입자부하량에 따른 vessel 내부 압력별 압력손실 변화.

그림 6은 여과속도가 서로 다른 경우 탈진회수에 따른 탈진 후 필터 표면에 남은 입자층으로 인한 잔류압력손실을 보여준다. 잔류압력손실은 탈진회수가 증가함에 따라 차츰 증가하면서 그 증가율이 점점 감소하게 되고 나중에는 어느 일정한 값을 유지하게 된다. 이는 분진들이 필터 표면을 지나 일정한 깊이까지 침투하는 depth filtration이 일어나서 집진량과 탈진량이 평형을 이루는 조건에 도달하기 때문이다. 여과속도가 증가할수록 잔류압력손실이 증가하는 것은 높은 여과속도로 필터 표면을 통하여 유입되는 입자들이 더 깊은 곳까지 침투하여 탈진 효율이 나빠지기 때문이다.

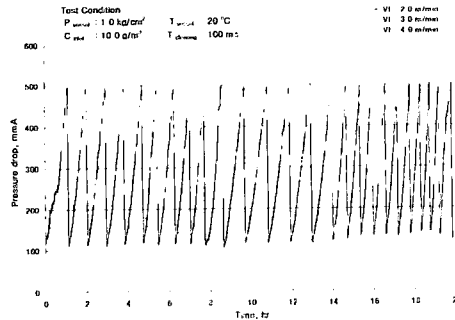


그림 5. 운전시간에 따른 여과속도별 압력손실 변화.

그림 7은 vessel 내부압력이 증가할 경우 탈진회수에 따른 잔류압력손실의 변화를 보여준다. vessel 내부압력이 증가함에 따라 잔류압력손실이 증가하는 것은 앞에서 거론한 바와 같이 필터 양단의 압력차가 증가하기 때문에 탈진성능의 저하보다는 기본 압력손실이 증가하기 때문이다. 그러므로 vessel 압력이 5 kgf/cm²인 경우 탈진회수에 따른 잔류압력손실의 증가 정도가 적은 것을 알 수 있다.

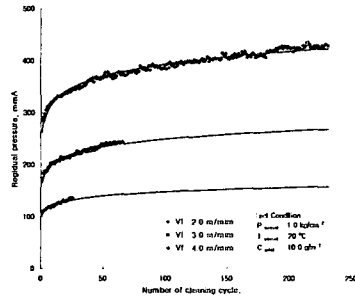


그림 6. 탈진 회수에 따른 여과속도별 잔류압력손실 변화.

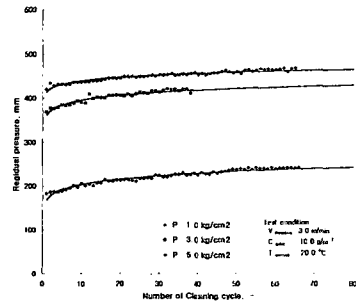


그림 7. 탈진 회수에 따른 vessel 내부 압력별 잔류압력손실 변화.

결론

집진장치 내부의 온도를 최대 800℃로 유지하기 위하여 열풍공급장치로부터 배출되는 배기가스를 heating pipe를 이용하여 집진장치 내부를 거쳐 지나가도록 집진장치를 수정한 Heating vessel을 설계 제작하였다. Filter vessel 내부 압력과 여과속도를 변화시켜가며 입자부하에 따른 필터 양단의 압력손실 변화를 실험한 결과, vessel 압력과 여과속도가 증가할수록 압력손실의 증가율이 높았으며, 탈진 성능은 더 나빠지는 것을 알 수 있었다. 향후 vessel 내부의 온도를 증가시킬 경우 필터의 압력손실과 탈진 특성을 계속 실험할 것이다.