

IGCC용 세라믹캔들필터 집진장치에서의 가스 유입 및 탈진 조건에 따른 차압 특성 변화

박 석주, 임 경수, 임 정환

Difference of Pressure Drop through Ceramic Candle Filter System for IGCC according to Inflow and Regeneration Conditions

Seokjoo Park, Kyeongsoo Lim, Jeonghwan Lim

Key words : Filter system(집진시스템), Ceramic candle filter(세라믹 캔들 필터), Hot gas cleanup
(고온 가스 정제), IGCC(석탄가스화 복합발전), Gas inflow pattern (가스 유입 방식)

Abstract : IGCC (석탄가스화 복합발전) 시스템 공정 중 가스화기에서 발생하는 합성가스 내에는 높은 농도의 분진들이 함유되어 있기 때문에 하부 공정들을 보호하기 위해서는 가스화기 후단에 집진장치가 필히 설치되어야 한다. 집진장치의 설계 제작 운전에서 집착성 분진층 부착, 분진 브리징, 필터 파손 현상 등과 같은 다양한 문제점들로 인하여 고온의 합성가스를 처리하는 데는 아직 기술적 한계들이 산재해 있는 상황이다. 이와 같은 문제점들은 필터에 부착된 분진층의 탈진성능을 향상시키거나, 필터의 열피로를 줄일 수 있도록 필터 재생을 위한 탈진의 횟수를 줄이는 방법을 통하여 해결될 수 있다. 본 연구에서는 파일럿 규모의 IGCC용 세라믹캔들필터 집진장치에서의 가스 유입 및 탈진 조건에 따른 집진장치의 차압 특성 변화를 수치해석과 실험을 통하여 분석함으로써 탈진성능을 향상시킬 수 있는 조건과 탈진 횟수를 최소화시킬 수 있는 방안을 도출하고자 하였다.

1. 서 론

IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) [1]와 같은 고온고압의 합성가스를 이용한 발전공정에서는 합성가스 내에 함유되어 있는 입자상물질로 인한 다양한 문제점들이 발생되고 있다. 가스화장치에서 발생한 고온고압의 합성가스는 미세한 입자상물질을 다량 함유하고 있어서, IGCC 공정 후단에 위치하고 있는 터빈 또는 열교환기 등과 같은 장치의 부식과 침적으로 인한 하부 장치들의 수명 단축 및 성능저하와 같은 문제들을 야기할 수 있기 때문에, 합성가스 내의 입자상물질의 농도를 1 ppm 이하로 낮출 수 있는 집진시스템이 가스화장치 후단에 설치되어야 한다.

현재까지의 집진장치 운전에서 빈번히 발생하는 대표적인 문제점들은 점착성 분진층 부착, 회 브리징 (ash bridging), 필터 파손 현상으로 알려져 있다 [2]. 이와 같은 문제점들을 궁극적으로 해결하기 위해서는 필터 재생을 위한 탈진의 횟수를 줄이거나 분진층의 탈진 효율을 향상시키는 방법을 제안할 수 있다. 탈진 횟수를 줄

이기 위해서는 필터에 부착되는 분진의 양을 줄여야 한다. 분진층의 탈진 효율을 향상시키기 위해서는 필터 표면 기공의 막힘 현상을 최소화하여야 한다. 필터 표면의 기공 막힘 현상을 최소화하기 위해서는 미세한 분진 입자들의 필터 표면 접근을 줄여야 한다.

본 논문에서는 필터의 탈진 횟수를 줄임과 동시에 분진층의 탈진효율을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하기 위하여 가스 유입 방식에 따른 필터로의 분진 부하 특성과 그로 인한 집진장치의 차압 특성 변화를 분석하기 위한 수치해석과 실험을 수행하였다.

2. 가스유입방식에 따른 필터로의 분진 부하특성 수치해석 분석

수치해석을 위한 IGCC용 파일럿 집진장치의 기하형상은 Fig.1과 같다. 집진장치 내의 유동장 및 입자 농도장을 해석하기 위하여 상용 전산 프로그램FLUENT를 이용하였다. 입자상 물질을 함유하고 있는 3차원 난류 비압축성 정상 유동을 지배하는 방정식은 유체의 연속방정식, x, y, z

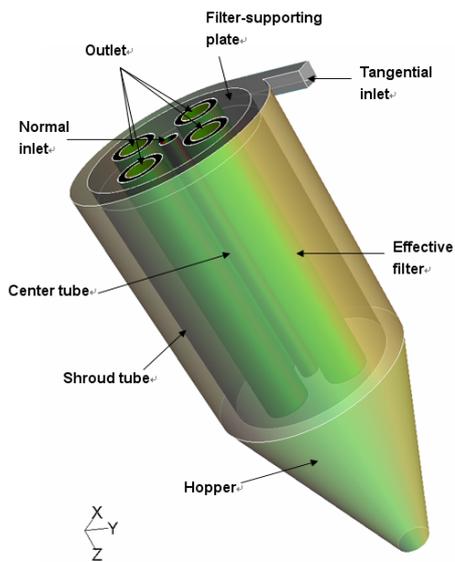


Fig. 1. 집진장치 수치해석 기하형상.

방향의 운동량방정식, 에너지방정식과 난류모델에 따른 난류운동에너지방정식, 난류소산에너지방정식, 입자의 운동과 궤적을 나타내는 Lagrangian 입자궤적추적모델(particle trajectory tracking model) 방정식 등으로 서로 결합(coupling)되어 있으며, 이 식들을 동시에 풀어야 한다. 유체유동은 유입구의 레이놀즈수($Re = \rho u L / \mu$)를 기준으로 전유동장이 난류유동으로 간주되어 수치적 난류모델을 적용하여야 하며, 높은 전단변형율을 고려할 수 있는 RNG k- ϵ 모델을 채택하였다. 장치 내부의 유동장 및 입자궤적을 계산하기 위한 계산 격자는 기하학적 구조와 격자 제작용 소프트웨어인 GAMBIT을 이용하여 구성하였다. 유입구에서는 질량유량 경계조건을 이용하여 공기가 유입면에 수직하게 유입된다고 하였고, 필터 출구에서는 노이만(Neumann) 경계조건을 설정하였다. 벽면에서의 난류 방정식의 경계조건은 평형벽법칙(equilibrium law of the wall)을 적용하였고, 유입구에서의 난류 강도는 1%, 기준 대표길이는 100 mm로 지정하였다. 모든 벽면에서 유체는 정지조건(no-slip condition), 입자는 부착(trap)조건을 적용하였고, 벽면에 부착되지 못한 입자들은 모두 필터에 부착되도록 설정하였다.

입자상물질이 부유된 가스의 총 4 가지 유입 조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 차단판이 있는 접선 유입구 ('Inlet_t'), 차단판이 없는 접선 유입구 ('Inlet_t_wos'), 유입관이 있는 수직 유입구 ('Inlet_n'), 유입관이 없는 수직 유입구 ('Inlet_n_wot')를 통한 가스 유입 방식에 대하여 유동장 및 입자 농도장을 수치해석하였다. 수치해석 결과, 집진용기 내부의 압력 분포는 필터 전단

과 후단 영역에서는 거의 균일하였지만, 필터 양단의 압력에는 큰 차이를 보였다. 차단막이 있는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우, 유입된 가스 유동이 집진용기 벽면과 차단판 사이에서 원심 유동으로 변환 후, 호퍼 영역에서 가스가 대류 확산에 의하여 분산되어 유속이 급격히 낮아지면서 상부의 필터로 이동하게 된다. 필터 내부에서는 필터를 통한 가스의 배출에 의하여 필터 출구에 이룰수록 유속이 더 증가함을 알 수 있다. 난류 운동에너지는 가스 유입 영역과 집진용기 상부 벽면 근처에서 높게 나타난다. 입자 농도 분포는 유입되는 대부분의 입자들이 집진용기 벽면과 차단판 외벽에 부착 제거되어 필터로 전달되기 때문에 필터 표면에서의 입자 농도는 Fig. 2(a)에서와 같이 아주 낮은 것을 알 수 있다. 차단막이 없는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우, 유입된 가스 유동이 집진용기 벽면을 접하여 원심 유동을 형성한 후, 차단막이 없기 때문에 필터 영역으로 가스가 직접 대류 확산에 의하여 전달되게 된다. 난류 운동에너지는 가스 유입 영역에서 가장 높고, 차단막이 없기 때문에 집진용기 벽면과 필터 사이의 상부 영역에서 높은 난류 운동에너지가 넓게 분포함을 알 수 있었다. 입자 농도 분포는 유입되는 입자들 중 상당량이 집진용기 벽면에 부착 제거되고, 나머지 입자들이 필터로 직접 전달되기 때문에 필터 상부 표면에서 Fig. 2(b)에서와 같이 다소 높은 입자농도 분포를 보였다. 유입관이 있는 수직 유입구를 통하여 입자상물질과 가스가 유입되는 경우, 가스의 유속은 수직 유입구를 통하여 호퍼 쪽으로 직접 높은 유속의 가스가 수직 분사되기 때문에 호퍼 영역에서 높은 유속 분포를 보인다. 호퍼를 지난 가스 유동은 집진용기 상부 영역에서 이르러 낮은 유속으로 대류 확산되어 필터를 지나 배출되게 된다. 난류 운동에너지 분포는 수직 유입구의 유입관 출구 끝단과 호퍼 하부에서 가장 높게 나타나지만, 집진용기 상부 영역에서는 가스 유속이 아주 낮기 때문에 난류에너지 또한 낮게 나타나고 있다. 입자 농도 분포는 수직 유입구로 유입된 입자들이 호퍼 영역에서 높은 대류 확산에 의하여 분산 분포하고, 그 중 상당량의 입자들이 필터 영역으로 낮은 유속으로 대류 확산되기 때문에 다소 높은 농도의 입자들이 필터 표면에 균일하게 전달됨을 알 수 있다. 유입관이 없는 수직 유입구를 통하여 입자상물질과 가스가 유입되는 경우, 유입관이 없기 때문에 집진장치 상부 벽면의 수직 유입구를 통하여 직접 높은 유속의 가스가 분사되기 때문에 필터 상부 영역에서 높은 유속 분포를 보인다. 높은 유속의 가스가 접선 유입구를 통하여 집진장치 중앙으로 직접 분사되기 때

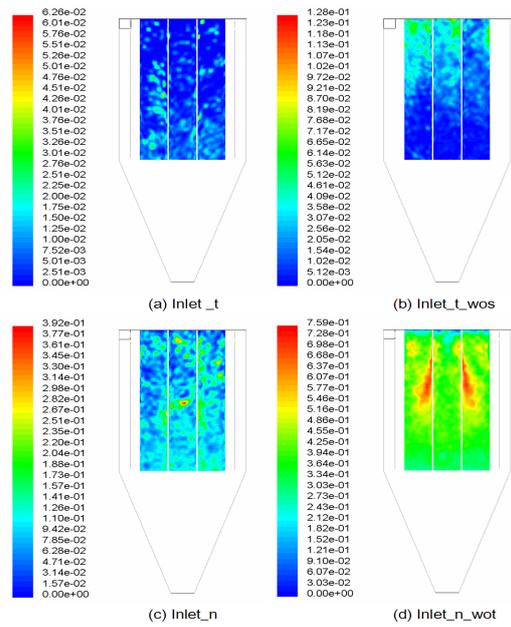


Fig. 2 가스 유입구 조건에 따른 유효필터 표면에서의 정상 입자농도 분포(입자 직경 : 1 μm)

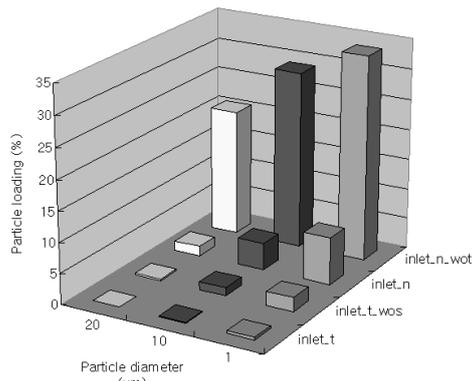


Fig. 3 가스 유입 방식에 따른 필터로의 입자 부하율 비교

문에 수직 유입구 끝단에서 시작된 높은 난류 운동에너지가 집진장치 중앙 부분을 넓게 분포하였다. 입자 농도 분포는 수직 유입구를 통하여 집진장치 상부 중앙 영역으로 직접 분사되기 때문에 상당량의 입자들이 필터로 전달되며, 특히 집진장치 중앙선을 향하고 있는 필터 표면에 아주 높은 농도의 입자들이 전달됨을 알 수 있다.

유입 조건에 따른 필터로의 입자 부하 (particle loading)는 Fig. 3에서와 같이 비교된다. 입자 부하율은 유입구를 통하여 집진장치 내부로 유입되는 총 입자 수에 대하여 필터 표면에 도달하는 총 입자 수의 비를 의미한다. 모든 유입 조건에서 입자 직경 크기가 클수록 입자 부하율이 낮아지며, 이는 큰 입자일수록 입자의 관성력

이 크게 작용하여 원심 유동이나 수직 분사 유동에 의하여 집진용기 내벽에 더 많은 입자들이 부착 제거되기 때문이다. 차단관이 있는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우 필터로의 입자 부하량이 가장 낮았으며, 유입관이 없는 수직 유입구를 통한 가스가 유입되는 경우 필터로의 입자 부하량이 가장 높게 나타났다. 그러나 Fig. 4에서와 같이 차단관이 있는 접선 유입 방식의 경우에는, 큰 입자들이 미리 제거되고 미세한 입자들이 주로 필터 표면에 도달하기 때문에 필터 표면의 기공 막힘이 심해져, 필터 표면으로부터 분진층을 제거하기 위한 탈진공정에서 탈진 효율이 낮아질 가능성이 다분하다.

3. 가스유입방식에 따른 집진장치 차압 특성 변화의 실험적 분석

가스유입방식에 따른 집진장치의 집진 및 탈진 특성을 분석하기 위하여 Fig.4에서와 같은 IGCC 집진공정 설계용 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 크게 필터, 집진용기, 분진호퍼, 분진챔버, 가스유입구, 가스 유출구 및 흡입팬, 탈진장치로 구분된다. 7개의 세라믹캔들필터 (길이 1500, 직경 60, Pall Schumacher DS 10-20)로 이루어진 필터 다발이 집진용기의 중심축을 기준으로 90도 방향으로 4개 설치되며, 필터의 탈진은 다발 단위로 이루어지도록 설계 제작되었다. 집진용기와 필터 다발 사이에는 덮개튜브 (shroud tube)가 설치되어 접선유입구를 통하여 집진용기 내로 유입되는 분진들이 필터로 직접 전달되는 현상을 차단하게 하였다. 집진용기에 부착된 분진층은 고압 공기 저장조로부터 솔밸브를 통하여 분사되는 탈진가스에 의하여 필터 표면으로부터 탈진되어 하부의 호퍼로 떨어지게 된다. 호퍼에 쌓인 분진들은 로터를 통하여 하부의 분진챔버로 이송된다. 분진챔베에 충전된 분진들은 노즐을 통하여 분사되는 고압공기와 혼합팬에 의하여 균일한 농도로 분진챔버로부터 배출되어 유입관으로 전달된다. 유입관은 집진용기에 접하게 설치된 접선유입구와 집진용기의 필터 지지판의 중앙에 축방향으로 수직되게 설치된 수직유입구로 이루어진다. 집진용기로 유입된 분진 가스는 필터에 의하여 분진이 여과된 후 청정한 가스가 흡입팬을 통하여 외기로 배출된다. 흡입팬에 의하여 집진용기로 유입되는 가스는 외부의 공기이며, 공기 중에 부유되어 있는 외부 분진 입자를 제거하기 위하여 프리필터를 설치하였다.

집진장치의 가스 유량은 400 Nm³/hr, 탈진가스 압력은 2 bar, 펄싱을 위한 솔밸브의 개폐시간은 100 msec, 탈진 수행 압력은 220 mmH₂O, 필터 번들간의 탈진시간 간격은 5 sec로 설정하

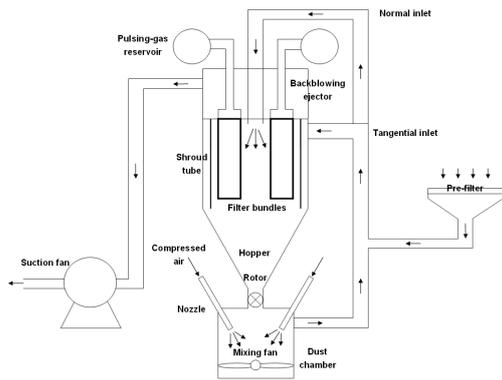


Fig. 4 세라믹캔들필터 집진장치

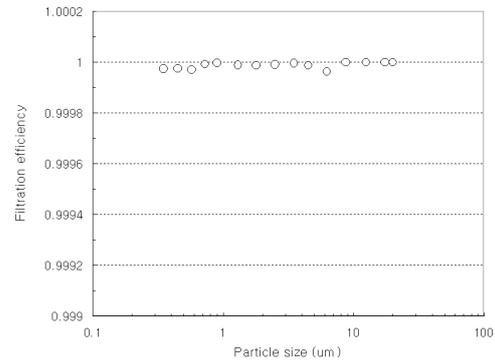


Fig. 6 집진장치의 여과효율

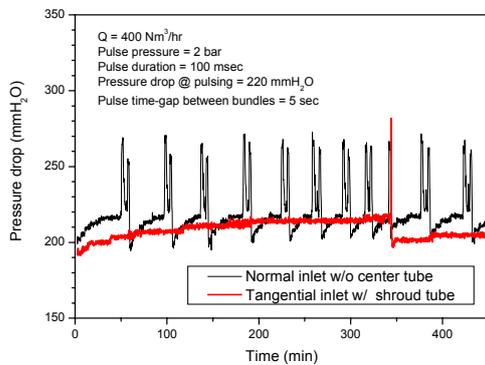


Fig. 5 집진장치의 차압 특성

였을 때, 분진가스가 필터 지지판 중앙에 설치된 수직유입구를 통하여 공급되는 경우와 집진용기 상부 끝단 벽에 접하게 설치된 접선유입구를 통하여 공급되는 경우의 차압 특성을 Fig. 5에서 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수직유입구를 통하여 분진가스가 공급될 경우, 수치해석에서 분석한 결과에서 알 수 있듯이 집진용기로 공급된 분진들의 상당 부분이 필터 표면에 직접 전달되어 부착되기 때문에 부착된 분진층에 의한 차압 상승이 급격하게 일어남을 알 수 있으며, 그 결과 필터의 재생을 위한 탈진이 빈번하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이에 반하여 분진가스가 접선 유입구를 통하여 집진용기로 공급될 경우에는 덮개튜브와 집진용기 외벽 사이를 분진들이 지나면서 상당량이 집진용기 내벽과 덮개 튜브, 하부 호퍼 벽면에 부착되기 때문에 필터로 전달되는 분진량이 상당히 줄게 되어 필터 표면에 형성되는 분진층 두께의 성장 속도가 낮아짐으로 인하여 차압 상승이 아주 천천히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 집진장치의 유입구와 출구에서의 입자크기별 분진농도를 측정하여 여과효율을 계산한 결과, Fig. 6에서와 같이 본 집진장치의 여과효율은 99.99 % 이상임을 알 수 있다.

4. 결론

필터로의 입자 부하 특성을 제어하기 위하여 집진장치로의 서로 다른 가스 유입 방식에 따른 유동장 및 입자농도장의 변화를 비교 분석하였다. 차단관이 없는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우 필터로의 분진 부하량이 가장 낮았으며, 유입관이 없이 집진 장치 상부 벽면 중앙의 수직 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우 필터로의 분진 부하량이 가장 높게 나타났다. 또한 다공성물질을 필터 개구 면에 설치하여 다공성물질의 투과율에 따른 필터 표면에서의 탈진가스 유동분포를 해석한 결과, 투과율이 낮을수록 필터 표면에서의 탈진가스 유동장은 더 균일하게 분포하였다.

후기

본 연구는 산업자원부, 신재생에너지기술개발 사업의 석탄IGCC 사업단 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Smith, D. H. and Ahmadi, G., 1998. "Problems and Progress in Hot-Gas Filtration for Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC) and Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 3, pp. 163-169.
- [2] Ahmadi, G. and Smith, D. H., 1998. "Particle Transport and Deposition in a Hot-Gas Cleanup Pilot Plant", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 3, pp. 183-205.