

## 분진 유입 방식에 따른 세라믹 캔들 필터 집진장치의 집진 및 탈진 특성 비교 연구

박 석주<sup>1)</sup>, 임 경수<sup>2)</sup>, 임 정환<sup>3)</sup>

### Comparison Research of Filtration and Regeneration Characteristics of Ceramic Candle Filter System at Different Inflow Pattern of Dusty Gas

Seokjoo Park, Kyeongsoo Lim, Jeonghwan Lim

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

**Abstract** : Computational studies have been performed to analyze the particle loadings onto the filters according to the different inflow pattern of dusty gas and the flow uniformities on the filter surface of back-blown gas at different permeability of porous media setup at the filter outlet. This is preliminary study to find how we can reduce the regeneration time and improve the regeneration efficiency of filters with dust layer.

#### 1. 서론

IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) [1]와 같은 고온고압의 합성가스를 이용한 발전과정에서는 합성가스 내에 함유되어 있는 입자상물질로 인한 다양한 문제점들이 발생되고 있다. 가스화장치에서 발생된 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 줄이기 위해서는 필터에 부착되는 분진의 양을 줄여야 한다. 분진층의 탈진 효율을 향상시키기 위해서는

필터 표면 기공의 막힘 현상을 극소화하거나 탈진가스의 운동에너지 전달을 극대화하여야 한다. 필터 표면의 기공 막힘 현상을 극소화하기 위해서는 미세한 분진 입자들의 필터 표면 접근을 줄여야 하며, 탈진가스의 운동에너지 전달을 극대화하기 위해서는 탈진가스의 필터 표면에서의 유동 균일화가 필요하다.

본 논문에서는 필터의 탈진 횟수를 줄임과 동시에 분진층의 탈진효율을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하기 위한 전 단계 연구로써, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 집진장치 내로의 가스 유입 방식에 따른 필터 표면으로의 분진 부하 특성과 필터 출구 면에 다공성물질을 설치함으로써 필터 표면에서의 탈진가스 유동 균일화에 관한 연구를 수행하였다.

#### 2. 가스유입방식에 따른 필터 표면으로의 분진 부하특성 분석

수치해석을 위한 IGCC용 파일릿 집진장치의 기하형상은 Fig.1과 같다. 집진장치 내의 유동장 및 입자 농도장을 해석하기 위하여 상용 전산 프로그램 FLUENT를 이용하였다. 입자상 물질을 함

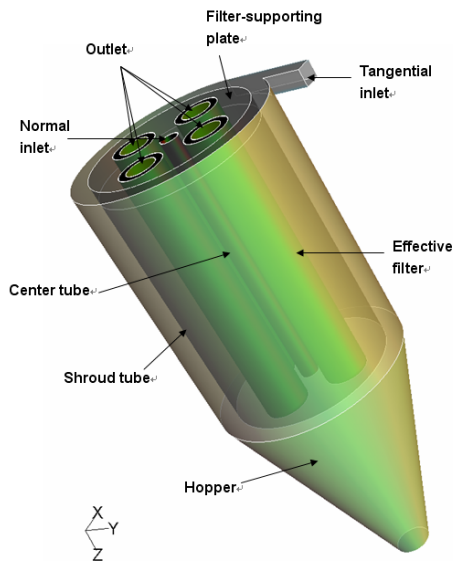


Fig. 1. 집진장치 수치해석 기하형상.

유하고 있는 3차원 난류 비압축성 정상 유동을 지배하는 방정식은 유체의 연속방정식, x, y, z 방향의 운동량방정식, 에너지방정식과 난류모델에 따른 난류운동에너지방정식, 난류소산에너지방정식, 입자의 운동과 궤적을 나타내는 Lagrangian 입자 궤적추적모델(particle trajectory tracking model) 방정식 등으로 서로 결합(coupling)되어 있으며, 이 식들을 동시에 풀어야 한다. 유체유동은 유입구의 레이놀즈수( $Re = \rho uL / \mu$ )를 기준으로 전유동장이 난류유동으로 간주되어 수치적 난류모델을 적용하여야 하며, 높은 전단변형율을 고려할 수 있는 RNG k- $\epsilon$  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%, 기준대표길이는 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. 차단관이 있는 접선 유입구 ('Inlet\_t'), 차단관이 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 유

동장 및 입자 농도장을 수치해석하였다. 수치해석 결과, 집진용기 내부의 압력 분포는 필터 전단과 후단 영역에서는 거의 균일하였지만, 필터 양단의 압력에는 큰 차이를 보였다. 차단막이 있는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우, 유입된 가스 유동이 집진용기 벽면과 차단관 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 차단관 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 영역에 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

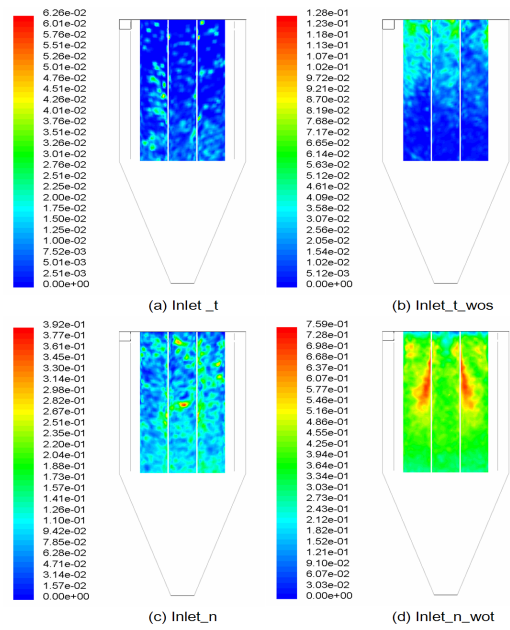


Fig. 2 가스 유입구 조건에 따른 유효필터 표면에서의 정상 입자농도 분포(입자 직경 : 1  $\mu\text{m}$ )

보인다. 높은 유속의 가스가 접선 유입구를 통하여 집진장치 중앙으로 직접 분사되기 때문에 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 집진용기 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 관성력이 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.

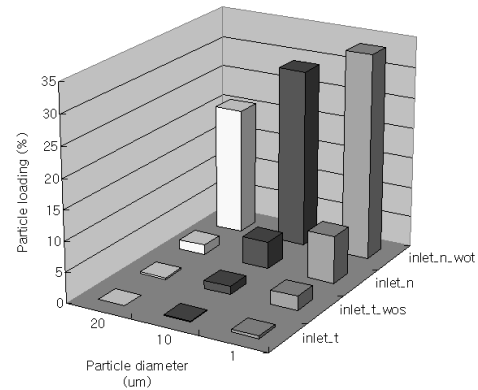


Fig. 3 가스 유입 방식에 따른 필터로의 입자 부하율 비교

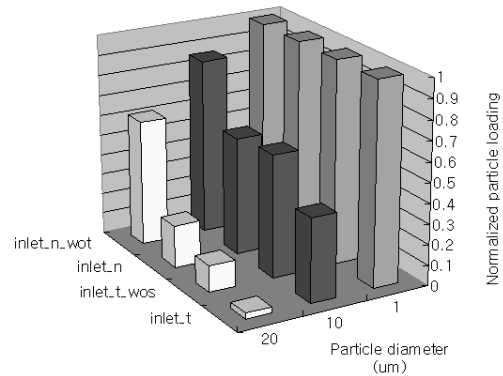


Fig. 4 가스 유입 방식에 따른 필터로의 입자크기별 부하율 분포 비교

### 3. 다공성물질의 투과율에 따른 필터 표면에서의 탈진가스 유동 균일화 특성

분진층을 탈진하기 위한 Fig. 5와 같은 탈진장치에서 필터 개구면에 설치되는 Safety filter는 탈진가스 저장조로부터 필터로 역분사 공급되는 탈진가스의 확산 효과를 야기할 수 있으며, 또한 세라믹 캔들 필터의 파손에 의한 분진의 누출을 최소화할 수 있는 효과를 기대할 수 있다. Safety filter의 투과율 크기에 따른 필터 내로 분사되는 탈진가스의 유동특성과 필터 표면으로부터 방출

<표 1> Safety filter를 이용한 탈진장치의 형상조건.

실험장치 조건	Case 1	Case 2	Case 3
Backblowing tube diameter, D (mm)	100	100	100
Permeability of safety filter ( $\text{m}^2$ )	$\infty$ (open)	$10^{-9}$	$10^{-10}$

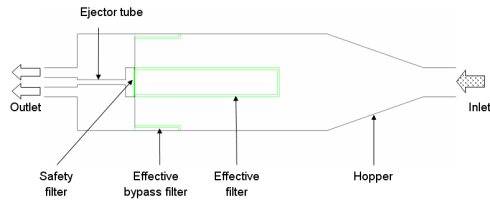


Fig. 5 Safety filter의 투과율에 따른 필터 표면에서의 탈진가스 유동분포 해석을 위한 수치해석 기하형상

되는 탈진가스의 유량을 분석하였다. <표 1>에서와 같이 탈진가스 공급 튜브의 직경은 100 mm로 일정하게 두었고, safety filter의 투과율을  $\infty$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$   $m^2$ 으로 정하였다. 투과율이  $\infty$ 라는 의미는 safety filter가 설치되지 않음을 의미하며, 투과율이  $10^{-9}$   $m^2$ 인 경우는 기공 (pore)의 크기가 0.1 ~ 1 mm 수준인 고 기공도 (high porosity)의 필터나 철망 (mesh) 또는 타공판 (perforated plate)을 사용한 경우를 의미한다. 투과율이  $10^{-10}$   $m^2$ 인 경우는 기공 크기가 10 ~ 100  $\mu m$  수준인 다공성물질을 사용한 경우를 의미한다.

<표 2>에서와 같이 safety filter의 투과율에 따른 필터 표면으로 역 방출되는 탈진가스의 유량에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 필터 표면에서의 압력과 유속 분포의 불균일도는 투과율이 클수록 개선되는 경향을 보였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 safety filter의 투과율이 낮아질수

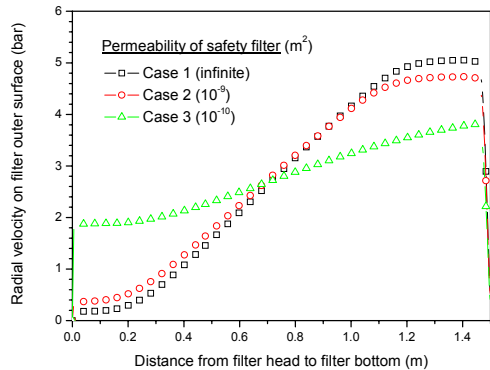
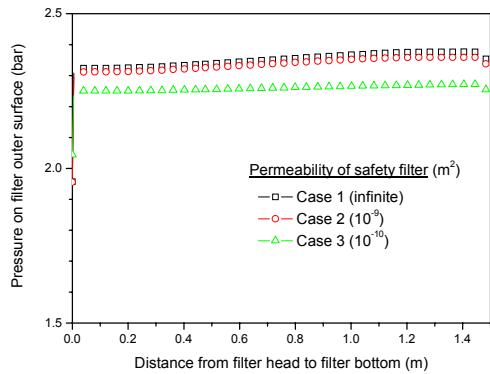


Fig. 6 필터 표면에서의 탈진가스 압력 및 유속분포

록 필터 바깥 표면에서의 압력 크기 분포는 다소 낮아지지만, 그 감소가 그다지 크지 않고, 반면에 유속 분포는 필터 하단 영역은 낮아지지만, 오히려 필터 상부 영역은 증가하여 유속 분포 균일도가 향상되는 것을 알 수 있다.

<표 2> Safety filter를 이용한 탈진장치의 형상조건에 따른 탈진 가스의 유로 위치별 질량 유량 비교.

실험장치 조건	Case 1	Case 2	Case 3
Mass flow rate of backblowing gas from gas reservoir, $m_{bb}$ (kg/s)	10.19	10.19	10.12
Mass flow rate of backblowing gas through filter outer surface, $m_{fos}$ (kg/s)	10.09	10.08	10.02

#### 4. 결론

필터로의 입자 부하 특성을 제어하기 위하여 집진장치로의 서로 다른 가스 유입 방식에 따른 유동장 및 입자농도장의 변화를 비교 분석하였다. 차단판이 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 과제에 일환으로 수행되었습니다.

#### References

- 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.
- 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.