

가스 유입 방식에 따른 집진장치 내에서의 세라믹 캔들 필터로의 입자 부하 특성 비교

박석주[†] · 임정환 · 임경수

한국에너지기술연구원 청정석탄연구센터
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2008년 3월 1일 접수, 2008년 4월 7일 채택)

Comparison of Particle Loading Characteristics onto Ceramic Candle Filters in Filtration System at Different Gas Inflow Pattern

Seok-Joo Park[†], Jeong-Hwan Lim and Kyeong-Soo Lim

Clean Coal Technology Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 1 March 2008; accepted 7 April 2008)

요 약

IGCC 파일럿 플랜트의 집진시스템을 최적 설계하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 서로 다른 가스 유입 방식이 집진용기 내부의 유체 유동장과 입자 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 필터 표면에 전달되는 입자의 부하율은 분진입자가 혼합된 가스가 내부에 차단관이 설치된 집진용기의 외벽에 접하게 설치된 접선 유입구를 따라 집진용기 내로 유입되는 경우 아주 낮았으며, 입자크기가 클수록 입자부하율은 급격히 감소하였다. 이에 반하여, 가스 유동이 집진용기의 필터지지판 중앙에 수직하게 설치된 수직 유입구를 통하여 집진용기 내로 유입되는 경우, 필터 표면으로의 입자 부하율이 아주 높았으며, 입자크기 증가에 따른 입자부하율의 감소는 접선 유입 방식에 비하여 크지 않았다.

Abstract – Computational simulation has been performed to design optimally the filtration system for IGCC pilot plant. It was analyzed how the different inflow pattern influences the flow field and the particle behavior in a filter vessel. The particle loading onto the filter surface lowers significantly and decreases dramatically with particle size when the dusty gas flows into the filter vessel with a shroud tube through a tangential inlet setup tangentially on the vessel outer wall. However, the particle loading is considerably high when the dusty gas enters the filter vessel through a normal inlet setup vertically on the vessel top wall, and the decrease of the particle loading with particle size is not steeper compared with the tangential inflow pattern.

Key words: Filtration System, Ceramic Candle Filter, Hot Gas Cleanup, IGCC, Gas Inflow Pattern

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 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.

현재 상용 IGCC 발전공정에 적용되고 있는 대표적인 대용량 집진시스템으로는 미국 Pinon Pine과 Wilsonville 그리고 네덜란드

Buggenum에 설치된 집진장치를 대표적 사례로 들 수 있다. 일반적으로 고온 집진공정에서의 여과속도는 3 cm/s 수준을 유지하고 있다. 대용량 집진장치에는 직경 60 mm, 길이 1500 mm의 세라믹 캔들 필터 수백 개가 설치된다. 대용량 집진장치에는 많은 수의 필터들이 설치되어야 하므로 개별의 필터들에 대하여 집진과 탈진이 이루어질 수 없기 때문에 다수의 필터를 다발(cluster 또는 bundle)로 묶는 방식의 클러스터링 기법을 이용하고 있다. Buggenum의 집진장치에는 48개의 필터로 이루어진 18개의 필터 클러스터가 병렬 방식으로 총 864개의 세라믹 캔들 필터가 설치되어 있다. 각 클러스터에는 대형 벤츄리가 설치되어 원활한 필터의 재생을 위한 탈진이 가능하도록 설계 제작되어 있다.

현재까지의 집진장치 운전에서 빈번히 발생하는 대표적인 문제점들은 점착성 분진층 부착, 회 브리징(ash bridging), 필터 파손 현상으로 알려져 있다[2]. 필터 표면에서의 타르(tar)와 같은 미세한 점착성 분진들의 부착 현상은 탈진성을 나쁘게 하며 두꺼운

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sjpark@kier.re.kr

잔류분진층의 형성으로 인하여 필터 차압을 과도하게 높이는 역할을 한다. 회 브리징 현상 또한 차압성능에 아주 나쁜 영향을 미친다. 특히 화(char) 분진이 탈진에 의하여 완전히 필터로부터 제거되지 않고 남은 경우, 잔류된 화 분진층이 필터 사이에서 점점 성장하여 화 브리지를 형성하게 된다. 화 브리지는 집진용기 내에서의 합성 가스나 탈진가스의 흐름을 방해하여 필터의 차압 상승을 야기하게 된다. 현재로서는 탈진 조건의 최적화가 회 브리징 현상을 억제하는 핵심 기술 중의 하나로 고려되고 있다. 필터 파괴 현상은 석탄 공급이 원활하게 이루어지지 않거나 장치의 재시작(re-start) 시점에서 산소농도의 상승에 의한 필터 표면에 부착된 미연 탄소(unburned carbon)를 함유한 잔류 분진층의 산화성 물질 연소로 인하여 필터 표면의 부분적인 온도 상승이 일어나기 때문에 발생한다. 필터 파손의 또 다른 이유는 뜨겁게 달구어진 필터로부터 부착된 분진층을 제거하기 위하여 차가운 탈진 가스를 역-분사(back-pulsing) 함으로써 필터에 열피로가 누적되기 때문이다. 또한 간접적으로는 완전히 탈진되지 않고 필터 표면에 잔류하는 분진층의 축적이나 탈진된 분진 케이크 덩어리가 필터와 필터 사이에 늘어붙어 필터와 분진 케이크 덩어리의 열팽창 정도의 차이에 의하여 필터에 물리적 외력이 작용하여 파손되기도 한다. 그러므로 필터의 파손 문제를 궁극적으로 해결하기 위해서는 탈진에 의한 필터의 열충격을 최소화하여야 하며, 아울러 필터로의 균일한 분진 부착과 필터로부터의 분진층의 탈진 효율을 향상시켜야 한다.

이상의 문제점들을 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. 필터 표면에 도달하여 부착되는 분진 입자의 양을 줄이기 위해서는 집진용기(filter vessel)로 유입되는 가스 유동을 집진용기 외벽에 접선방향으로 유입되게 함으로써 유입 입자들에 원심력 효과를 부여하여 벽면에 큰 입자들을 미리 부착 제거시켜 해결할 수 있다. 그러나 큰 입자들이 미리 제거되고 미세한 입자들만 필터 표면에 도달하여 부착될 경우 필터의 표면 기공을 막을 소지가 높아지기 때문에 오히려 분진층의 탈진효율을 저감시킬 수 있으므로 필터 표면의 기공이 노출된 시점에서는 큰 입자와 미세한 입자들이 혼재한 상태로 필터 표면에 집진되게 할 필요가 있다.

이와 같이 집진용기 내로 유입되는 분진들의 필터 표면으로의 전달 특성을 제어하기 위한 방법으로는 집진용기로의 가스 유입 방식 조절을 제안할 수 있다. 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 부착 특성을 분석하였다.

2. 최적 설계를 위한 컴퓨터 시뮬레이션

2-1. 집진장치 기하형상 모델

개발하고자 하는 IGCC용 집진시스템의 요소 명칭은 Fig. 1에서와 같이 집진용기(filter vessel), 7개의 세라믹 캔들 필터로 이루어진 4개의 필터 클러스터, 이중 호퍼, 접선 유입구(tangential inlet), 차단관(shroud tube), 수직 유입구(normal inlet), 중앙튜브(center tube), 벤츄리, 탈진 시스템으로 구성되어 있다. 접선 유입구는 집진용기 외벽에 접하게 설치되며, 수직 유입구는 중앙튜브가 필터의 하부 끝단 위치까지 드리워져 있는 형상이다. 분진 입자들이 부유된

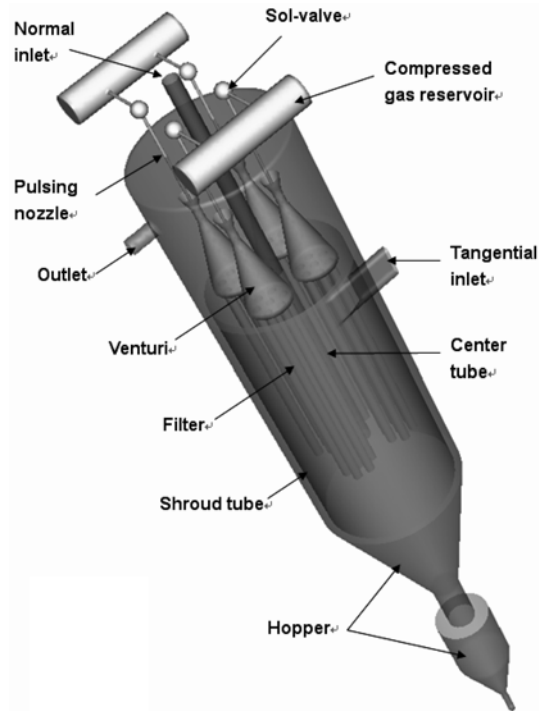


Fig. 1. Geometry of filter system.

고온의 가스 유동이 유입구를 통하여 집진용기 내로 유입된 후, 집진용기 내의 유동장을 따라 이동하면서 일부 입자들은 집진용기 내벽과 충돌하여 부착되고 나머지 입자들의 대부분이 필터 표면에 집진된 후, 분진이 제거된 청정 가스가 필터를 통과하여 출구를 빠져 나간다. 필터 표면에 부착된 분진층이 일정 두께 이상 쌓이게 되면 고압의 불활성 가스를 여과 유동의 반대 방향으로 역-분사하여 필터 표면으로부터 분진층을 분리 제거하게 된다. 탈진에 의하여 필터 표면으로부터 분리된 분진 덩어리들은 하부의 호퍼로 떨어져 모인 후, 추후에 폐기 처리된다. 실험 장치는 압력 1 bar, 온도 300 °C의 고온 가스 300 Nm³/hr(0.1 kg/s)를 여과속도 2.4 cm/s로 처리할 수 있도록 내부에 길이 1.5 m, 직경 60 mm의 세라믹 캔들 필터 28개가 설치되게 설계하였다. 가스 온도는 현재까지 성공적으로 장시간 운전되고 있는 Buggenum의 IGCC 시스템의 집진장치의 가스 온도 조건을 기준으로 설정하였다. 본 연구를 통하여 설계하고자하는 실험 장치는 압력 20 bar, 온도 300 °C인 최대 10,000 Nm³/hr 유량의 합성가스를 생산할 수 있는 IGCC 10 MW 파일럿 플랜트에 적용이 가능한 규모의 집진 장치이다.

2-2. 수치해석 방법

집진장치의 설계를 위하여 Fig. 1에서와 같은 집진용기 내부에 설치된 각각의 필터들과 필터의 탈진을 위한 벤츄리와 탈진 시스템, 이중 호퍼 모두를 포함한 실제 기하 형상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 할 경우, 계산에 필요한 컴퓨터 용량과 계산 시간이 기하급수적으로 증가하기 때문에 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 단순화된 설계 모델에 대하여 수치해석을 수행하였다. 7개의 필터로 이루어진 각 필터 클러스터는 하나의 유효 필터(effective filter)[3-5]로 대체하였으며, 필터 출구 이후의 영역은 유동장과 입자 농도장의 관심 영역 밖이기 때문에 계산 영역에서 제외하였다. 이중 호퍼의 하부 호퍼는 집진시스템 운전 시 상부 호퍼와 차단되어 있으므로 또

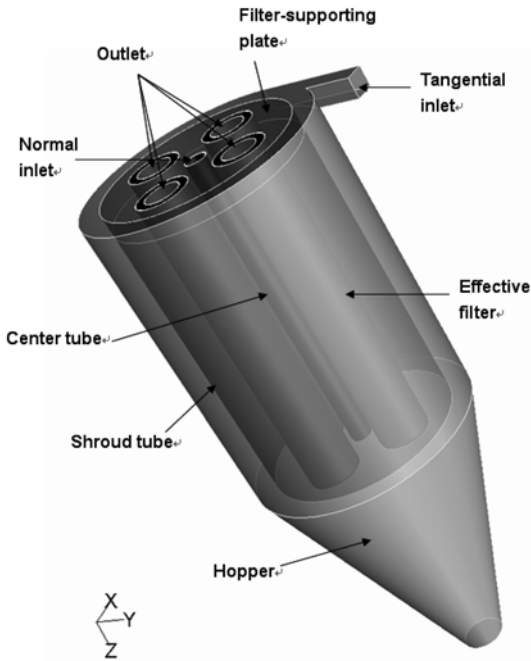


Fig. 2. Model for computational simulation of filter system.

한 계산 영역에서 제외하였다.

집진장치 내의 유동장 및 입자 농도장을 해석하기 위하여 상용 전산 프로그램 FLUENT를 이용하였다. 입자상 물질을 함유하고 있는 3차원 난류 비압축성 정상 유동을 지배하는 방정식은 유체의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식과 난류모델에 따른 난류운동 에너지방정식, 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($Re=uL/\mu$)를 기준으로 전유동장이 난류유동으로 간주되므로 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) 경계조건[7]을 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 적용하였다.

세라믹 캔들 필터 7개로 구성된 하나의 필터 클러스터를 그에 상응하는 하나의 큰 직경의 유효 필터로 대체하였다. 유효 필터는 직경 240 mm, 길이 1,500 mm인 위쪽은 개방되어 있고 아래쪽은 막혀 있는 실린더 형상을 취한다. 유효 필터를 실제 필터 클러스터에 상응하는 유체역학적 특성을 가지게 하기 위하여 Darcy law 가정을 사용하여 유효 필터의 두께와 투과율을 결정하였다. 실제 7개의 세라믹 캔들 필터(투과율= $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 두께=10 mm)로 구성된 필터 클러스터에 상응하는 유효 필터의 두께는=40 mm 이고, 투과율은 $\alpha_c = 6.8\alpha$ 으로 설정하였다.

3. 수치해석 결과

입자상물질이 부유된 가스의 총 4 가지 유입 조건에 대하여 수치 해석을 수행하였다. ‘차단관이 있는 접선 유입구’(‘Inlet_t’), ‘차단관이 없는 접선 유입구’(‘Inlet_t_wos’), ‘중앙튜브가 있는 수직 유입구’(‘Inlet_n’), ‘중앙튜브가 없는 수직 유입구’(‘Inlet_n_wot’)를 통한 유입 조건에 대하여 유동장 및 입자 농도장을 수치해석 하였다. 수치 해석 결과, 집진용기 내부의 압력 분포는 필터 전단과 후단 영역에서는 거의 균일하였지만, 필터 양단의 압력에는 큰 차이를 보였다. Fig. 3은 가스 유입 방식에 따른 집진장치 내부의 평균속도 분포를 보여준다. ‘차단관이 있는 접선 유입구’를 통하여 가스가 유입되는 경우 Fig. 3(a)에서와 같이 유입된 가스 유동이 집진용기 내벽과 차단관 사이에서 원심 순환유동으로 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 이를수록 유속이 더 증가함을 알 수 있다. 난류 운동에너지는 가스 유입 영역과 집진용기 상부 벽면 근처에서 높게 나타났다. 입자 농도 분포는 유입되는 입자들 중 상당수의 입자들이 집진용기 내벽과 차단관 외벽에 부착 제거되고, 나머지 입자들만이 필터로 전달되기 때문에 필터 표면에서의 입자 농도는 Fig.

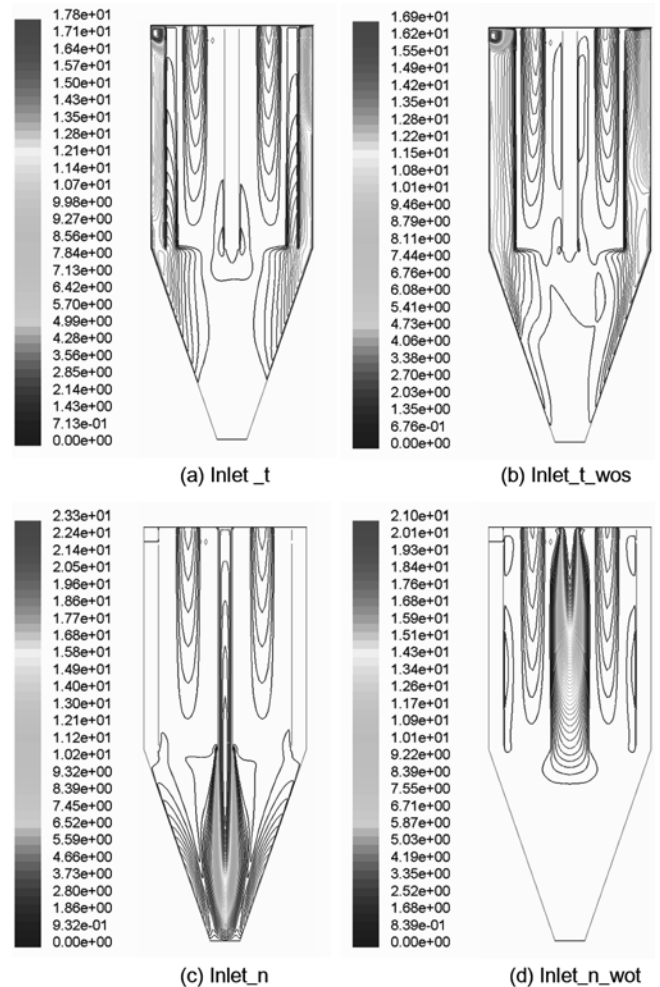


Fig. 3. Contours of gas mean velocity (m/s) at different inflow condition.

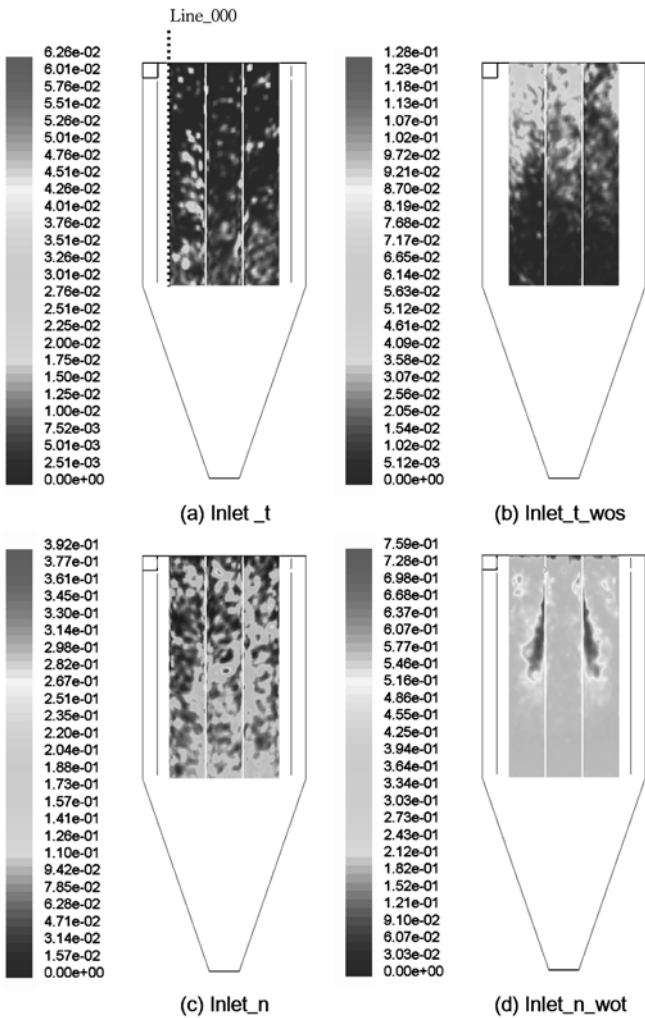


Fig. 4. Contours of normalized particle concentration on effective filter surface at different inflow condition (particle diameter : 1 μm).

4(a)에서와 같이 아주 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 4에서는 필터 표면에서의 입자 수농도를 유입구를 통하여 공급되는 평균 입자 수농도로 나누어준 정상화된(normalized) 입자 수농도 분포를 보여준다.

‘차단판이 없는 점선 유입구’를 통하여 가스가 유입되는 경우 Fig. 3(b)에서와 같이 유입된 가스 유동이 집진용기 벽면을 접하여 원심순환유동을 형성하지만, 차단판이 없기 때문에 필터 영역으로 가스가 대류 확산에 의하여 전달되게 된다. 난류 운동에너지는 가스 유입 영역에서 가장 높았고, 차단판이 없기 때문에 집진용기 벽면과 필터 사이의 상부 영역에서 높은 난류 운동에너지가 넓게 분포함을 알 수 있었다. 입자 농도 분포는 유입되는 입자들 중 많은 입자들이 필터의 상부 표면으로 직접 전달되기 때문에 필터 상부 표면에서 Fig. 4(b)에서와 같이 다소 높은 입자농도 분포를 보였다.

다음으로 ‘중양튜브가 있는 수직 유입구’를 통하여 입자상물질과 가스가 유입되는 경우, Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)에서와 같은 수치해석 결과를 얻었다. 수직 유입구를 통하여 유입된 가스 유동은 중양튜브를 따라 흘러내려와 호퍼를 향하여 직접 높은 유속으로 수직 분사되기 때문에 호퍼 영역에서 높은 유속 분포를 보인다. 호퍼를 지난 가스 유동은 집진용기 상부 영역에 이르러 낮은 유속으로 전달되어 필터를 지나 배출되게 된다. 난류 운동에너지 분포는 수직 유입구의 중양튜브 출구 끝단과 호퍼 하부 영역에서 가장 높게 나타

났지만, 집진용기 상부 영역에서는 가스 유속이 아주 낮기 때문에 난류에너지 또한 낮게 나타났다. 입자 농도 분포는 수직 유입구의 중양튜브를 통하여 유입된 입자들이 호퍼 영역에서 높은 대류 확산에 의하여 분산 혼합(mixing)되고, 그 중 상당량의 입자들이 집진용기 상부 영역을 향하여 낮은 유속으로 상승 이동되기 때문에 다소 높은 농도의 입자들이 필터 표면에 균일하게 전달됨을 알 수 있다.

‘중양튜브가 없는 수직 유입구’를 통하여 입자상물질과 가스가 유입되는 경우, Fig. 3(d)와 Fig. 4(d)에서와 같은 수치해석 결과를 얻었다. 중양튜브가 없기 때문에 집진장치의 필터지지판(filter-supporting plate) 중앙의 수직 유입구를 통하여 직접 높은 유속의 가스가 분사되기 때문에 필터 상부 영역에서 높은 유속 분포를 보인다. 높은 유속의 가스가 수직 유입구를 통하여 집진장치 중앙으로 직접 분사되기 때문에 수직 유입구 끝단에서 시작된 높은 난류 운동에너지가 집진장치 중앙 부분에 넓게 분포하였다. 입자 농도 분포는 수직 유입구를 통하여 집진장치 상부 중앙 영역으로 유입 가스가 직접 분사되기 때문에 상당량의 입자들이 필터로 전달되며, 특히 집진장치 중앙선을 향하고 있는 필터 표면에 아주 높은 농도의

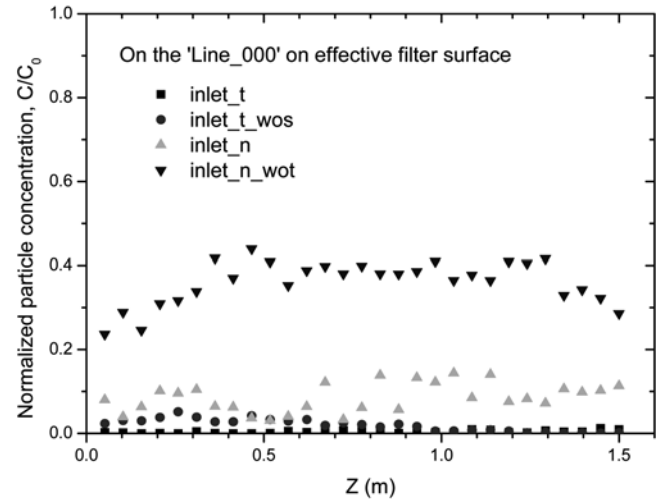


Fig. 5. Distributions of normalized particle concentration on effective filter surface at different inflow condition (particle diameter : 1 μm).

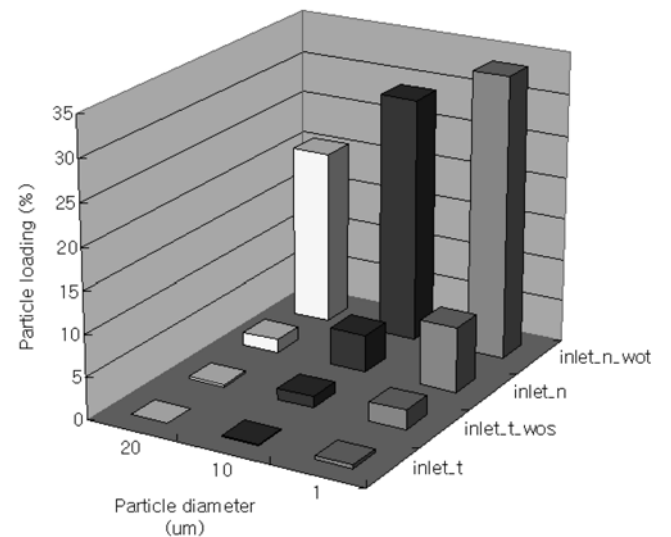


Fig. 6. Comparison of particle loadings onto the filter surface at different inflow condition.

입자들이 분포함을 알 수 있다. 가스 유입 방식에 따른 필터 표면의 특정 선 'Line_000'(Fig. 4(a)의 점선) 상에서의 1 μm 입자의 수농도 분포를 Fig. 5에서 비교하였다. 유입 방식에 따른 입자의 수농도를 비교한 결과, 필터 표면에서의 입자농도는 '차단관이 있는 접선 유입구', '차단관이 없는 접선 유입구', '중앙튜브가 있는 수직 유입구', '중앙튜브가 없는 수직 유입구' 순으로 높음을 알 수 있다.

가스 유입 방식에 따른 필터로의 입자 부하율(*particle loading*)은 Fig. 6에서와 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 낮아지는데, 이는 큰 입자일수록 입자의 관성력이 크게 작용하여 원심 유동이나 수직 분사 유동에 의하여 집진용기 내벽에 더 많은 입자들이 부착 제거되기 때문이다. '차단관이 있는 접선 유입구'를 통하여 가스가 유입되는 경우 필터로의 입자 부하량이 가장 낮았으며, '중앙튜브가 없는 수직 유입구'를 통하여 가스가 유입되는 경우 필터로의 입자 부하량이 가장 높게 나타났다.

가스 유입 방식에 따른 입자 크기별 필터로의 입자 부하율의 감소 정도를 파악하기 위하여 입경 1 μm 크기 입자의 수농도에 대하여 정상화시킨 입자 부하율(*normalized particle loading*)을 Fig. 7에 도시하였다. 1 μm 입경의 입자 수농도에 대하여 10, 20 μm 입경의 입자 수농도의 크기는 '중앙튜브가 없는 수직 유입구'의 경우 가장 높고, '차단관이 있는 접선 유입구'의 경우 가장 낮게 분포하였다. 이로부터 '중앙튜브가 없는 수직 유입구'의 가스 유입 방식에서는 필터 표면에 미세한 입자(*fine particle*) 뿐만 아니라 상대적으로 조대한 입자(*coarse particle*)들로 부착될 수 있지만, '차단관이 있는 접선 유입구'의 경우에는 조대한 입자들은 거의 제거되고 미세한 입자들만이 주로 부착될 수 있음을 알 수 있다. '차단관이 있는 접선 유입구'를 통하여 입자들이 집진용기로 유입될 경우 필터 표면으로의 전체 입자 부하율이 줄어들어 분진층 성장에 의한 차압 상승속도를 줄일 수는 있지만, 미세한 입자들이 주로 필터 표면에 도달하여 부착되기 때문에, 필터 표면의 기공을 막을 소지가 높아져 필터 재생을 위한 탈진에는 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

그러므로 필터 표면에 분진층이 형성되는 초기에는 '중앙튜브가

없는 수직 유입구'를 통하여 집진용기 내로 분진을 공급함으로써 미세 분진에 의한 필터의 기공 막힘 현상을 최소화할 수 있으며, 필터 표면에 일정 두께의 분진층이 형성되어 필터 표면 기공의 직접 노출이 차단되고 나면 '차단관이 있는 접선 유입구'로 가스의 유입을 전환함으로써 필터로의 입자 부하율을 최소화하여 필터 표면의 분진층 성장 속도를 줄임으로써 분진층에 의한 차압 상승 속도를 줄여 분진층의 탈진 간격을 최대로 유지할 수 있을 것이다. 그 결과, 필터의 재생을 위한 탈진 에너지를 최소화할 뿐만 아니라 필터의 탈진 회수를 줄여 필터의 수명을 극대화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

IGCC용 파일럿 집진시스템을 최적 설계하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 집진시스템 내부에 설치되는 필터로의 입자 부하 특성을 제어하기 위하여 집진용기 내로의 서로 다른 가스 유입 방식에 따른 유동장 및 입자농도장의 변화를 비교 분석하였다. 차단관이 설치된 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우, 필터로의 분진 부하율이 모든 입자크기에 대하여 가장 낮게 나타났지만, 미세한 분진들의 입자 부하 분포가 상대적으로 높았다. 이에 반하여 중앙튜브가 없이 집진용기의 필터지지판 중앙에 설치된 수직 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우, 필터로의 분진 부하량이 가장 높게 나타났으며, 입자 크기에 따른 입자 부하 분포의 차이가 접선 유입 방식에 비하여 그다지 크지 않았다.

감 사

본 연구는 산업자원부, 신재생에너지기술개발 사업의 석탄 IGCC 사업단 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Joshi, M. M. and Lee, S., "Integrated Gasification Combined Cycle, A review of IGCC Technology," *Energy Sources* **18**(5), 537-568(1996).
- Smith, D. H. and Ahmadi, G., "Problems and Progress in Hot-Gas Filtration for Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC) and Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)," *Aerosol Sci. Technol.* **29**(3), 163-169(1998).
- Ahmadi, G. and Smith, D. H., "Gas Flow and Particle Deposition in the Hot Gas Filter Vessel at the Tidd 70 MWE PFBC Demonstration Power Plant," *Aerosol Sci. Technol.* **29**(3), 206-223(1998).
- Zhang, H. and Ahmadi, G., "Particle Transport and Deposition in the Hot-Gas Filter Vessel at Wilsonville," *Powder Technol.*, **116**(1), 53-68(2001).
- Ahmadi, G. and Smith, D. H., "Gas Flow and Particle Deposition in the Hot-Gas Filter Vessel of the Pinon Pine Project," *Powder Technol.*, **128**(1), 1-10(2002).
- Yakhot, V. and Orszag, S. A., "Renormalization Group Analysis of Turbulence - I: Basic Theory," *J. Scientific Computing*, **1**(1), 1-51(1986).
- Fletcher, C. A. J., *Computational Techniques for Fluid Dynamics 1*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg(1988).

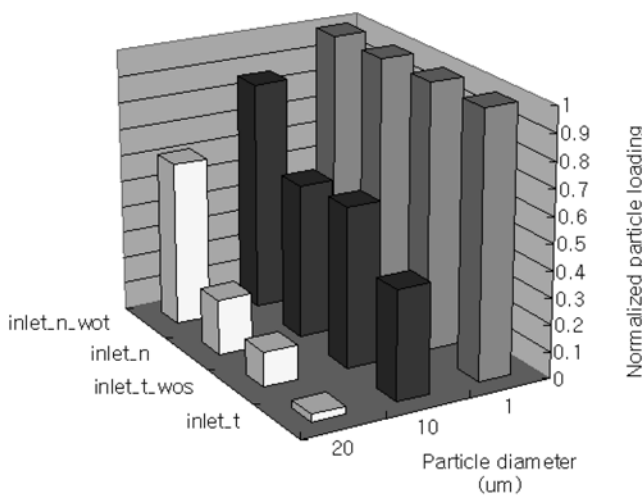


Fig. 7. Comparison of particle loadings normalized with particle loading of 1 μm in diameter at different inflow condition.