

## 한국형 IGCC 대용량 집진시스템 개발

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

### Development of Filtration System for Korean Model IGCC Demonstation Plant

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 inlet geometry (가스 유입 기하구조)

**Abstract** : Computational simulation has been performed to design the filtration system for Korea model IGCC demonstration plant. The filtration system for optimal design has four effective filters corresponding to the clusters composed of a group of ceramic candle filters. It was analyzed how the different entrance geometry influences the flow field and the particle behavior in the filtration system. The particle loading is minimum when the gas mixed with particles flows into the filter vessel with a shroud tube through a tangential inlet. However, the particle loading is maximum when the gas with particles enters the filter vessel through a normal inlet which a entrance tube extended from. By controlling adequately both conditions of inflow, the filtration system can be operated optimally to prolong the filter life-time and to save the energy for cleaning filters.

#### 1. 서 론

IGCC와 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 연료전지 등의 장치의 부식과 침식으로 인한 하부 장치들의 수명 단축이 야기될 수 있기 때문에 합성가스 내의 입자상물질의 농도를 1 ppm 이하로 낮출 수 있는 집진시스템이 요구된다.

집진장치 운전에서 빈번히 발생하는 문제점들은 타르 (tar) 층 부착, 분진 브리징, 필터 파손 현상으로 알려져 있다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해서는 필터의 열피로를 줄일 수 있도록 필터 재생을 위한 탈진의 횟수를 줄이는 방법을 제안할 수 있다. 탈진 횟수를 줄이기 위해서는 필터에 부착되는 분진의 양을 줄여야 한다. 필터 표면에 도달하여 부착되는 입자의 양을 줄

이기 위하여 집진용기로 유입되는 가스 유동을 용기 내벽에 접선방향으로 유입되게 함으로써 유입 입자들에 원심력 효과를 부여하여 벽면에 큰 입자들을 미리 부착시켜 해결할 수 있다. 그러나 큰 입자들이 미리 제거되고 미세한 입자들만 필터 표면에 도달하여 부착될 경우 필터의 표면 기공을 막을 소지가 있기 때문에 탈진 직후 집진 시에는 큰 입자가 미리 제거되지 않고 필터 표면에 도달하여 부착되도록 가스 유동을 수직 유입구를 통하여 집진용기 내부로 유입되도록 할 필요가 있다. 그러므로 탈진 직후 집진 시에는 수직 유입 방식으로, 필터 표면에 분진층이 어느 정도 형성되고 나면 접선 유입 방식으로 가스 유동을 집진용기 내로 유입시켜, 필터 표면의 기공 막힘도 줄이면서, 동시에 필터로의 분진 부착량도 줄여 분진 부착으로 인한 필터 차압 상승 속도를 줄일 수 있어, 결국에는 필터의 탈진 횟수도 줄일 수 있고, 필터 표면 바로 위에 형성된 큰 입자들과 작은 입자들로 이루어진 분진층 형성으로 인하여 탈진 효율도 향상시킬 수 있을 것이다.

본 논문에서는 필터로의 분진 부하율을 제어할 수 있는 국내 최초의 클러스터 방식 대용량 집진시스템을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 최적 설계하였다.

## 2. 최적설계 컴퓨터 시뮬레이션

### 2.1 집진장치 기하형상 모델

개발하고자 하는 IGCC용 집진시스템의 요소 명칭은 Fig.1 에서와 같이 집진 용기, 7개의 세라믹 채널 필터로 이루어진 4개의 필터 클러스터, 이중 호퍼, 차단관 (shroud tube), 접선 유입구, 수직 유입구, 벤츄리, 탈진 시스템으로 구성되어 있다. 접선 유입구 (tangential inlet)는 집진 용기에 접하게 설치되며, 수직 유입구 (normal inlet)는 유입관 (inflow tube)이 필터의 하부 끝단 위치까지 드리워져 있는 형상이다. 실험장치 (모델명: KIER IGCC-Filter)는 압력 1 atm, 온도 300 °C의 고온 가스 300 Nm<sup>3</sup>/hr (0.1 kg/s)를 여과속도 2.4 cm/s로 처리할 수 있도록 내부에 길이 1.5 m, 직경 60 mm의 세라믹 채널 필터 28개를 설치하도록 설계하였다.

### 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 높아야하기 때문에 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 단순화된 설계 모델에 대하여 수치해석을 수행하였다. 7개의 필터로 이루어진 각 필터 클러스터는 하나의 유효 필터 (effective filter)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 또한 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, x, y, z 방향의 운동량방정식, 에너지 방정식과 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 ( $Re = \rho$

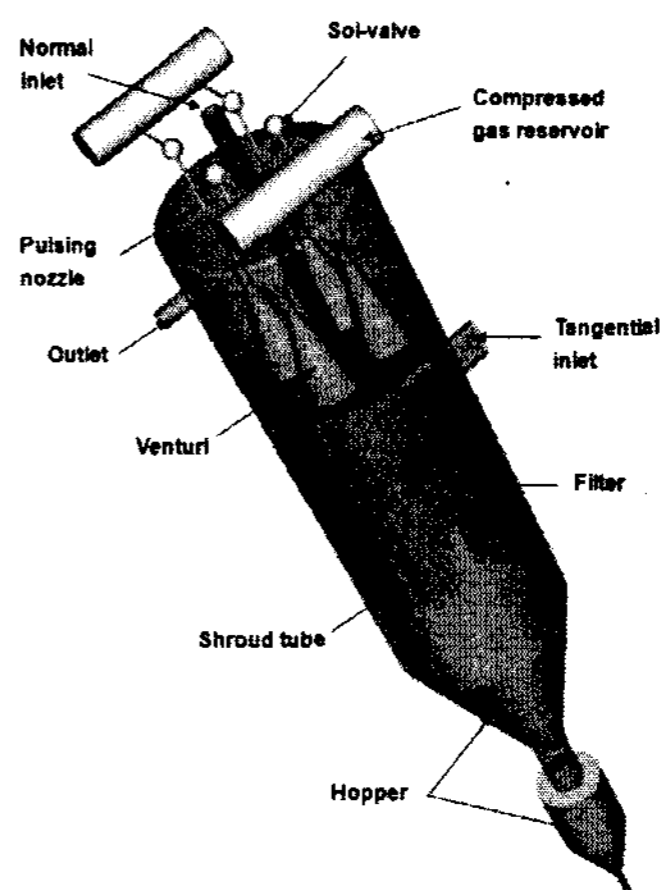


Fig. 1 집진장치의 기하 형상

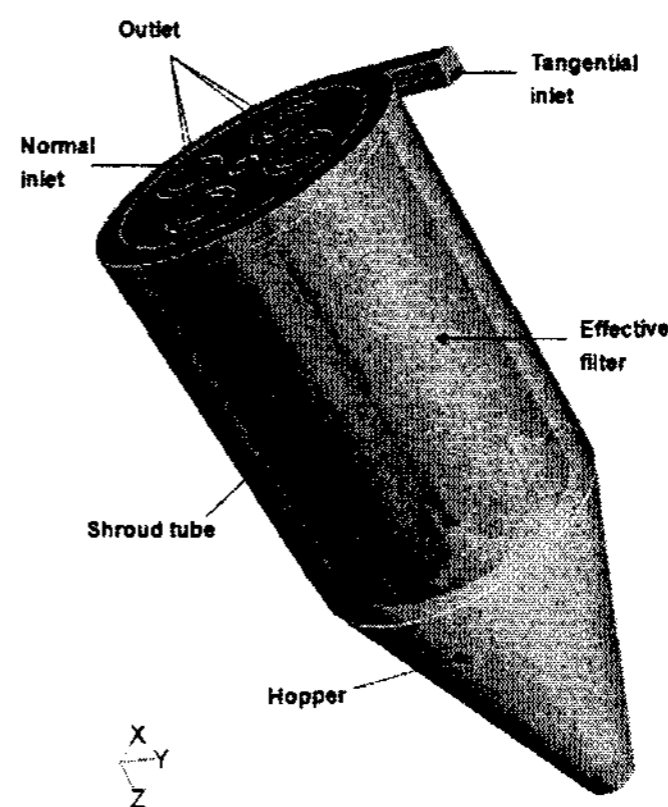


Fig. 2 집진장치의 수치해석 설계 모델

$uL/\mu$ )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.

### 3. 수치해석 결과

입자상물질이 부유된 가스의 총 4 가지 유입 조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 차단막이 있는 접선 유입구 ('Inlet\_t'), 차단막이 없는 접선 유입구 ('Inlet\_t\_wos'), 유입관이 있는 수직 유입구 ('Inlet\_n'), 유입관이 없는 수직 유입구 ('Inlet\_n\_wot')를 통한 유입 조건에 대하여 유동장 및 입자 농도장을 수치해석하였다. 집진장치 내부의 온도가 모든 위치에서 고온으로 일정하게 300 °C로 유지되는 경우는 온도차에 의한 유동 변화를 고려할 필요가 없기 때문에 필터 표면에서의 여과속도가 같은 조건인 상온 상압 조건에서 유입 가스의 질량 유량이 0.2 kg/s인 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 집진용기 내부의 압력 분포는 필터 전단과 후단 영역에서는 거의 균일하였지만, 필터 양단의 압력에는 큰 차이를 보였다. Fig. 3은 가스 유입 조건에 따른 집진장치 내부의 평균속도 분포를 보여준다. 차단막이 있는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우 Fig. 3(a)에서와 같이 유입된 가스 유동이 집진용기 벽면과 차단막 사이에서 원심 유동으로 변한 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 차단막 외벽에 부착 제거되어 필터로 전달되기 때문에 필터 표면에서의 입자 농도는 Fig. 4(a)에서와 같이 아주 낮은 것을 알 수 있다.

차단막이 없는 접선 유입구를 통하여 가스가 유입되는 경우 Fig. 3(b)에서와 같이 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. 4(b)에서와 같이 다소 높은 입자농도 분포를 보였다.

다음으로 유입관이 있는 수직 유입구를 통하여 입자상물질과 가스가 유입되는 경우, Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)에서와 같은 수치해석 결과를 얻었다. 가스의 유속은 수직 유입구를 통하여 호퍼 쪽으

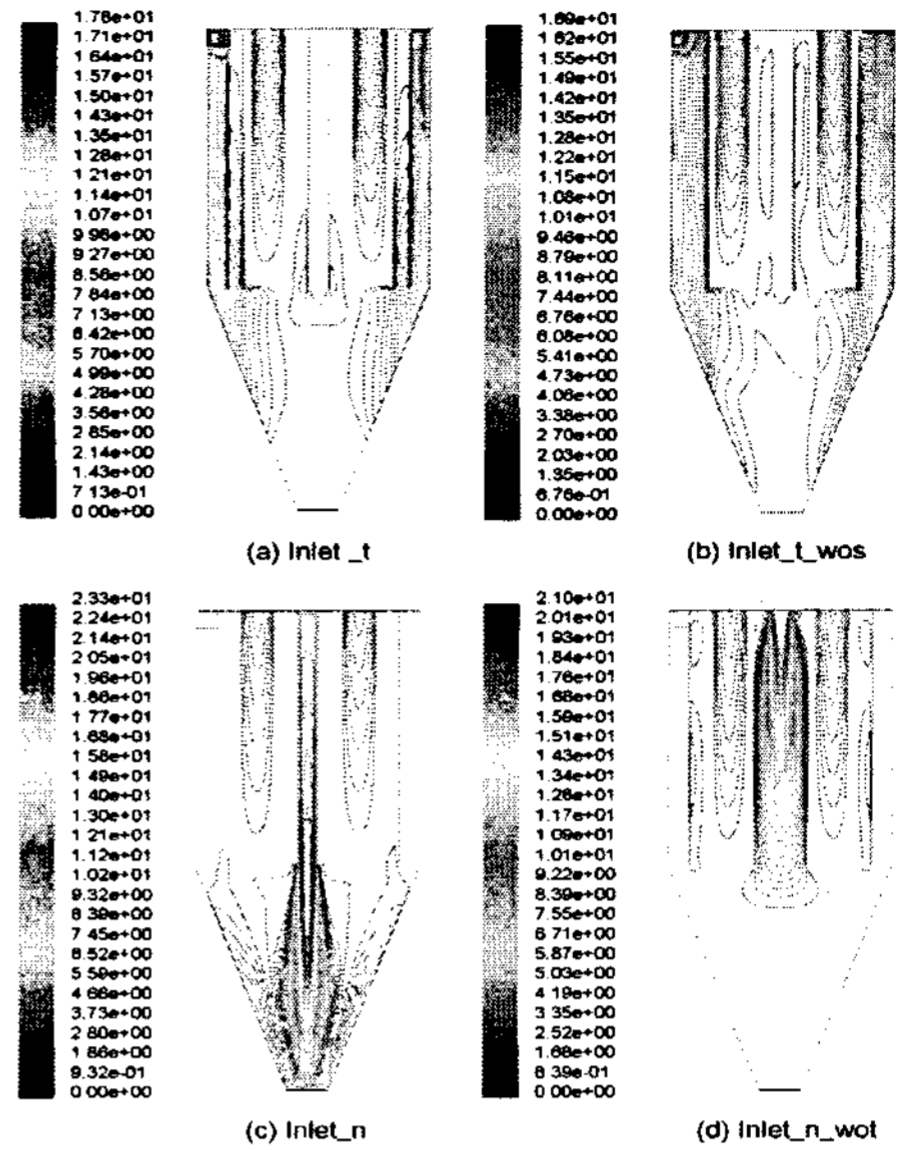


Fig. 3 가스 유입 조건에 따른 집진장치 내부 평균속도 분포

로 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, Fig. 3(d)와 Fig. 4(d)에서와 같은 수치해석 결과를 얻었다. 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 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.

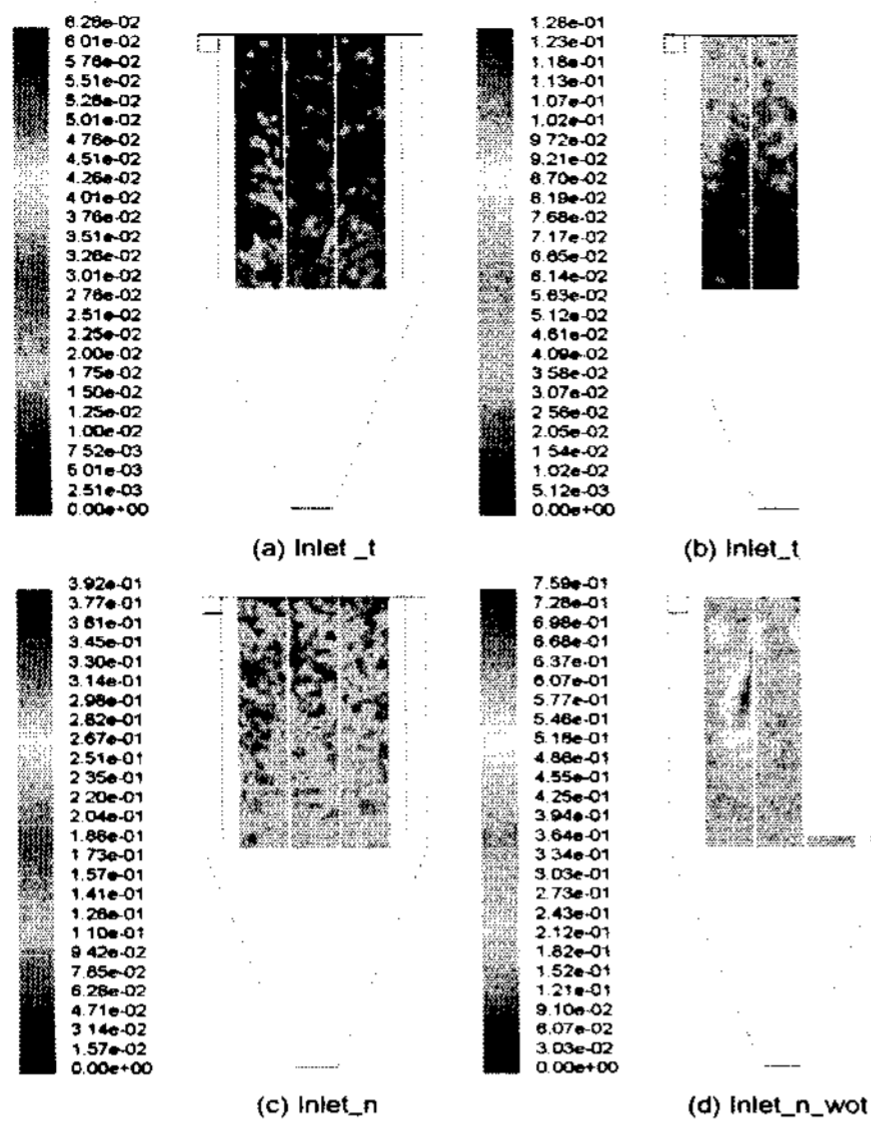


Fig. 4 가스 유입구 조건에 따른 유효필터 표면에서의 정상 입자농도 분포(입자 직경: 1  $\mu\text{m}$ )

유입 조건에 따른 필터로의 입자 부하율 (particle loading rate)은 Fig. 5에서와 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.

#### 4. 결론

한국형 IGCC 대용량 집진시스템을 최적 설계하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 집진 시스템 내부에 설치되는 필터로의 입자 부하량을 제어하기 위하여 집진장치로의 서로 다른 가스 유입 조건에 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. 필터 표면에 분진층이 형성되는 초기 시점에는 유입관이 없는 수직 유입구를 통하여 분진 가스를 유입하고, 필터 표면에 일정한

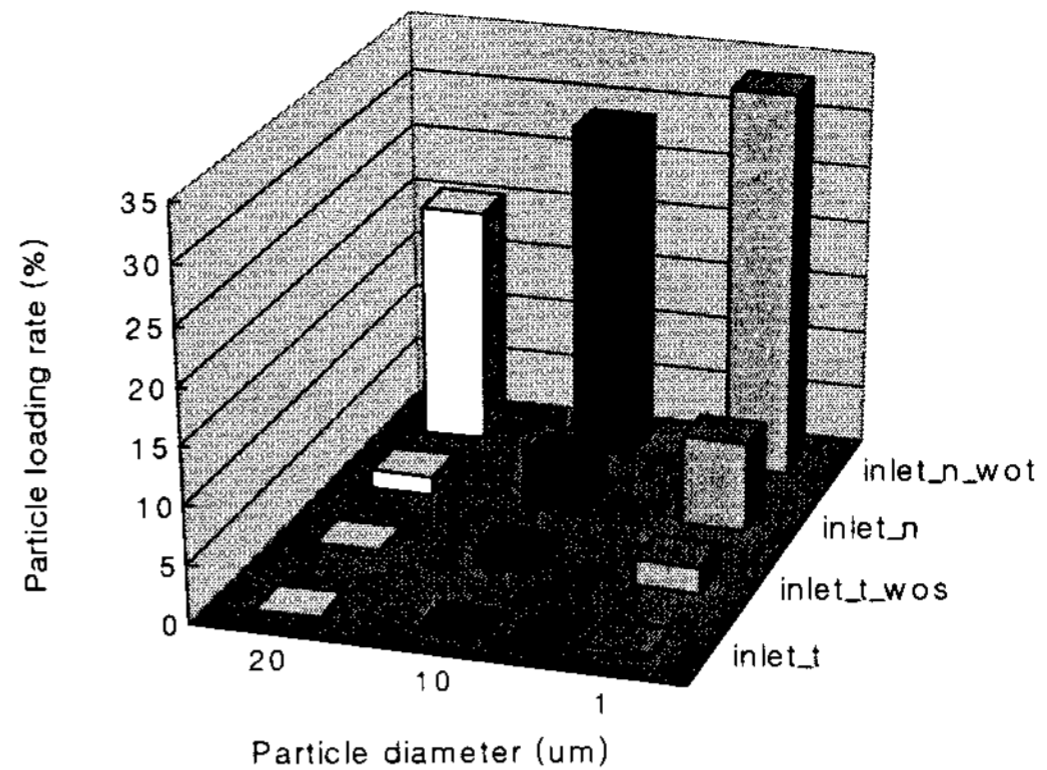


Fig. 5 가스 유입구 조건에 따른 필터로의 입자 부하율 비교

두께의 분진층이 형성된 후에 분진 가스를 차단관이 설치된 접선 유입구를 통하여 집진장치 내로 공급함으로써 집진장치의 운전을 최적화시킬 수 있다.

#### 후 기

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.
3. Ahmadi. G. and Smith, D. H., 1998. "Gas Flow and Particle Deposition in the Hot Gas Filter Vessel at the Tidd 70 MWE PFBC Demonstration Power Plant", Aerosol Sci. Technol., Vol. 29, No. 3, pp. 206-223.
4. Zhang, H. and Ahmadi. G., 2001. "Particle Transport and Deposition in the Hot-Gas Filter Vessel at Wilsonville", Powder Technol., Vol. 116, No. 1, pp. 53-68.