

세라믹필터 집진장치의 역세정 시스템 설계를 위한 유동해석

정재화 · 서석빈 · 김시문 · 안달홍 · 김종진

한전전력연구원 발전연구실

E-mail : jhchung@kepri.re.kr

A Numerical Analysis of Pulse-Jet Cleaning Characteristics for Ceramic Filter System Design

Jae-Hwa Chung, Suk-Bin Seo, Si-Moon Kim, Dal-Hong Ahn and Jong-Jin Kim

Korea Electric Power Research Institute

요 약

본 연구에서는 다공성 세라믹 필터를 사용하는 집진장치에서 역세정 과정의 유동특성을 규명하고, 역세정 시스템 설계에 적용하기 위한 전산해석을 수행하였다. 주요 연구내용으로는 역세정 과정에서 중요한 변수인 노즐 직경, 노즐 팁의 위치, 다공성 세라믹 캔들필터의 투과율, 디퓨저 형상, 역세정 압력 등이 집진장치 내부에서의 속도분포, 압력분포 등 역세정 유동특성에 미치는 영향을 상세히 계산하여 역세정 시스템의 사양 설계에 활용할 수 있도록 하였다. 전산해석에는 상용의 FLUENT code를 사용하여 에너지 보존식을 포함한 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법(Finite volume method)으로 해석하였다.

Abstract— A numerical analysis of the pulse-jet cleaning characteristics in a porous ceramic candle filter system was performed. To obtain the detailed velocity and pressure distribution during the cleaning process in a porous filter system, the axi-symmetric compressible Navier-Stokes equations including energy conservation equation were solved by using the FLUENT code which adopts FVM (Finite Volume Method). The effects of pulse cleaning nozzle diameter, nozzle tip position, permeability of a porous ceramic candle filter, diffuser throat diameter, and cleaning pressure on the cleaning flow characteristics were investigated extensively.

1. 서 론

세라믹 필터를 사용하는 집진기술은 청정 석탄 발전 방식인 석탄가스화 복합발전(IGCC)^{[1][2]} 등에서 열효율을 향상시키고 환경오염을 최소화할 수 있는 고온고압 집진기술로 응용되며, 전세계적으로 세라믹 필터 집진장치의 상용화를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 석탄가스화 복합발전에서 집진과정은 고온고압에서 석탄분진을 제거하고 가스터빈을 보호하기 위하여 필수적이며, 최근 세라믹필터를 사용하는 집진법이 효율적으로 판명되어 국내에서도 활발한 연구가 수행되고 있다^{[3][4]}.

집진과정 중에 세라믹 캔들필터 표면에 부착되는 석탄분진은 노즐을 통하여 고압의 역세정 기체를 분사하여 제거된다. 이때 필터내로 흡인되는 기체에는 노즐에

서 분사되는 기체와 노즐 주위로부터 동반되는 유동이 합쳐지게 된다^[5]. 이러한 노즐주위 유동은 동반류를 포함한 필터내의 역세정 유동과 압력분포에 직접적인 영향을 미치므로 노즐주위 유동특성의 정확한 파악이 필요하다. 또한, 석탄가스화 복합발전용 집진장치에서 역세정 효율의 향상을 위해서는 역세정 노즐이나 디퓨저 등 역세정 부품의 적정 형상과 역세정 압력, 압력 지속 시간 등의 운전조건을 최적화하여 설계하는 것이 매우 중요하다.

역세정 시스템의 설계를 위해서 지금까지 주로 실험적 연구^{[6][7]}를 많이 수행하여 왔으며, 최근에는 전산유체역학을 적용하는 방법이 실험의 보완, 실험 소요시간의 단축, 개발 비용의 절약을 위해 유용한 방법으로 주목받고 있다. 특히 집진과정을 전산해석하여 석탄가스화 복

합발전용 집진장치의 구조설계에 적용하는 연구⁽⁸⁾⁽⁹⁾도 활발히 수행되고 있다. 역세정 과정의 전산해석에 관한 연구⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾도 시도되었으나 역세정 장치의 설계에 필요한 변수들에 대하여는 충분한 해석 결과를 제공하지는 못하였다.

본 전산해석 연구에서는 세라믹 필터를 사용하는 집진장치에서 역세정 과정에 영향을 미치는 여러 설계 변수들에 관하여 전산해석하여 역세정 유동에 미치는 영향을 규명함으로써 역세정 시스템의 설계에 적용할 수 있도록 하였다. 특히 역세정 과정에서 중요한 변수인 노즐 직경, 노즐 팁의 위치, 필터의 투과율, 역세정 압력 등이 세라믹 필터 시스템내에서의 속도분포, 압력분포 등 역세정 유동특성에 미치는 영향을 상세히 해석하여 역세정 시스템의 사양 결정에 활용하고자 하였다. 전산해석에는 에너지 보존식을 포함한 압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법(Finite volume method)으로 계산하는 상용 FLUENT code⁽¹²⁾를 사용하였다.

2. 계산조건 및 계산방법

2-1. 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서는 다공성 세라믹 캔들필터에서의 역세정 유동특성을 파악하기 위하여 다공질 필터를 포함하고 있는 정상상태 Navier-Stokes 방정식을 해석하였다. 역세정 노즐로부터 분사되는 고속의 압축성 유동해석을 위해서는 연속방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식, 기체의 상태 방정식을 2차원 축대칭으로 가정하였다. 본 해석에 사용한 지배방정식은 다음과 같이 편미분 방정식의 형태로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\theta \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_\phi \quad (1)$$

상기식에서 ϕ 는 계산하고자 하는 종속변수를 나타내며 각방향에 대한 속도성분(u, v)과 레이놀즈 응력(Reynolds Stress)의 각방향 성분들을 나타낸다. 여기서 x 는 축방향 거리, r 은 반경방향 거리를 나타내며, ρ 는 기체의 밀도, Γ_r 는 종속변수에 대한 확산 계수, S_ϕ 는 종속변수에 대한 생성항을 나타낸다. 난류유동 계산을 위해서는 RNG(Renormalization Group) k- ϵ 난류모델⁽¹²⁾을 적용하였다.

세라믹 필터 부분인 다공성 물질(porous media)내의 유동장 해석에는 Darcy 모델⁽¹³⁾을 적용하였다. Darcy 모델에 의하면 다공매체에서의 압력강하는 유동속도에 비례하는 다음 식(2)로 표현된다.

$$\nabla p = \frac{\mu}{K} \vec{v} \quad (2)$$

여기에서 p 는 압력, K 는 필터의 투과율을 나타내며, μ

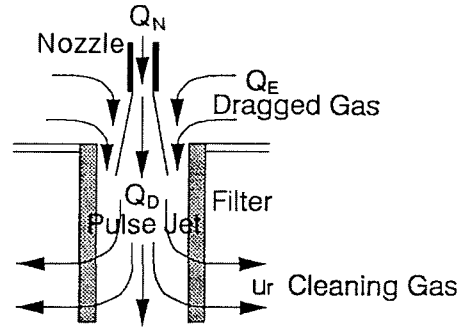


Fig. 1. Schematic diagram of pulse jet cleaning.

는 유체의 점성계수, \vec{v} 는 속도를 각각 나타낸다.

2-2. 역세정 시스템 사양

Fig. 1은 세라믹 필터에서 펄스제트에 의한 역세정 과정을 설명하는 개념도이다. 집진과정 중에 세라믹 캔들 필터 표면에 부착되는 분진은 노즐을 통하여 고압의 역세정 압력에 의하여 제거되며, 역세정 효율을 향상시키기 위하여는 역세정 노즐의 형상, 역세정 노즐 끝단의 위치, 역세정 압력을 적절하게 설계할 필요가 있다. 역세정 과정에서 노즐로부터 강한 압력의 압축공기가 필터 내로 흡인되며, 이때 세라믹 필터 내부로 흡인되는 유량 Q_D 는 노즐에서 분사되는 공기량 Q_N 과 노즐 주위로부터의 동반류 Q_E 가 합쳐진 것이다. 역세정 효과는 노즐을 통과하는 유동과 노즐 주위로부터 디퓨저내로 동반되는 유동에 의하여 달라진다. 디퓨저는 역세정에 필요한 필터내부 압력파를 조절해 주는 효과가 있다. 여기서는 해석의 편의를 위하여 디퓨저내로 동반되는 동반류 비(entrainment ratio) R 을 노즐 통과 유량 Q_N , 디퓨저 통과 유량 Q_D 로부터 다음 식(3)으로 정의하였다.

$$R = (Q_D - Q_N) / Q_N \quad (3)$$

위 식에서 동반류 비 R 의 증가는 동일한 노즐 통과 유량 Q_N 에 대해서 세라믹 필터내로 도입되는 디퓨저 통과 유량 Q_D 가 증가하는 것을 의미하며, 디퓨저 통과 유량이 증가하면 역세정 효율의 상승을 기대할 수 있으며 결과적으로 역세정에 소요되는 에너지를 절감시킬 수 있다. 또한, 동반류의 비 R 이 클수록 노즐 주위에서 동반되는 유량이 증가하므로 고온고압 집진장치의 역세정과정에서는 상대적으로 노즐로부터 분사되는 낮은 온도의 가스량의 비가 줄어들기 때문에 필터가 받는 열충격을 완화시켜 필터의 파손을 방지하고 필터의 수명을 연장시키는 효과가 있다.

세라믹 필터를 사용하는 집진장치의 역세정 특성을 파

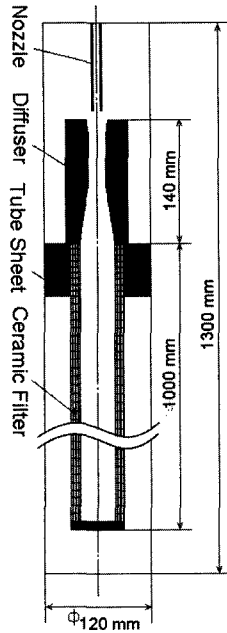


Fig. 2. Schematic of pulse jet cleaning system with a single ceramic candle filter for the present computation.

약하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 단일필터 집진장치를 계산영역으로 선정하여 해석하였다. Fig. 2에서 집진과정에서 튜브시트(tube sheet) 하부에서는 분진이 포함된 가스가 세라믹 필터를 통과하면서 분진이 제거되며, 튜브시트 상부에는 필터를 통과한 청정가스가 존재하게 된다. 전산해석에 사용된 세라믹 캔들필터를 포함한 시스템은 필터 vessel의 내경이 120 mm, 높이가 1,300 mm이며, 튜브시트(tube sheet)는 두께 60 mm로 설정하였다. 본 전산해석에 사용한 다공성 세라믹 캔들 필터는 독일 Schumacher사의 DIA-SCHUMALITH 20 Single Filter¹⁴⁾를 대상으로 하였으며 그 기본사양은 Table 1과 같다.

Fig. 3에는 역세정 성과 관련한 노즐과 디퓨저 부분의 주요 형상변수들을 표시하였다. 계산에 사용한 노즐은 단순한 튜브형을 사용하였으며 노즐 직경 D_N 은 계

Table 1. Ceramic candle filter specification

| Items | Specification |
|--|---|
| Filter Model | • DIA-SCHUMALITH 20 Single Filter |
| Properties | • Porosity: 36% • Specific Permeability: $6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ |
| Filter Dimension (Outer Dia./Inner Dia.×Length) | • $\Phi 60 \text{ mm}/\Phi 40 \text{ mm} \times 1,000 \text{ mm}$ |

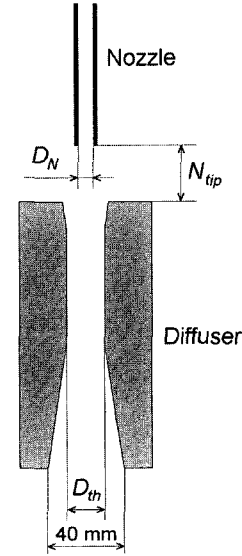


Fig. 3. Geometry of pulse jet nozzle and diffuser.

산변수로 하여 6, 8, 10, 12 mm의 4가지로 계산하였다. 노즐 팁의 위치 N_{tip} 은 Fig. 3에서와 같이 필터 위에 체결되는 디퓨저의 상면으로부터의 거리로 정의하였으며 -20, 0, 10, 30, 50 mm로 변경하면서 역세정 효과를 계산하였다. 디퓨저는 Fig. 3과 같이 축소-확대형을 사용하였으며 디퓨저 목부분의 직경 D_{th} 을 10, 20, 25, 30 mm로 변경하여 계산하였다. 디퓨저 목부분의 길이는 지름의 3배로, 노즐쪽의 디퓨저 축소부분의 벽면구배는 8°로 설정하였고, 세라믹 필터에 인접한 디퓨저 확대부의 끝의 직경은 세라믹 캔들 필터의 내경과 동일한 40 mm로 설정하여 디퓨저 목부분에서부터 점차 확대되는 형상으로 되어 있다.

2-3. 경계조건 및 계산격자

Fig. 4(a)는 본 계산에 사용된 계산영역과 계산 경계조건을 보여주며, Fig. 4(b)는 계산격자를 나타낸다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 필터길이 방향의 배율을 축소하여 그린 그림이다. Fig 4(a)에서 노즐과 디퓨저 및 세라믹 필터의 중심축에 대하여 축대칭 조건을 적용하여 Fig. 2에 보여준 전체영역의 반을 계산영역으로 설정하였다. 동반류가 들어오는 유동의 입구, 역세정 노즐 입구, 세라믹 필터를 통과하여 역세정된 가스가 나가는 출구부는 모두 압력경계 조건을 사용하였다. 노즐입구의 압력경계 조건은 Fig. 4(a)에서 BC1로 표시하였으며, 역세정 압력 P_{inj} 을 $0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$ 에서 $10.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 범위에서 조정하여 계산변수로 사용하였다. Fig. 4(a)에서 동반류가 들어오는 유동의 입구는 BC2로 표시하였으며, 세라믹 필터를

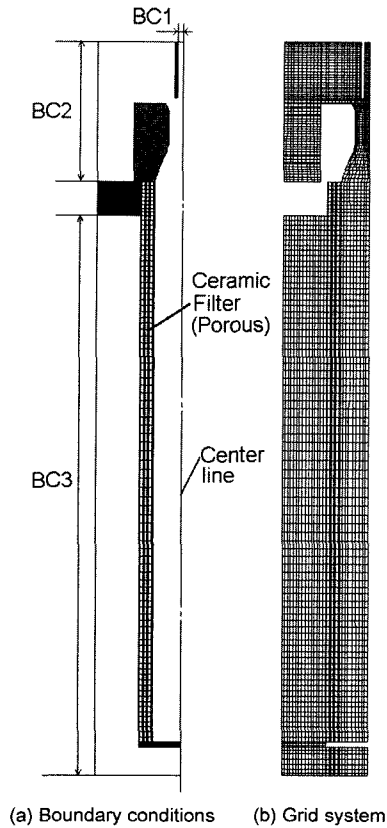


Fig. 4. Boundary conditions and computational grid for the ceramic filter system.

통과하여 역세정된 가스가 나가는 출구는 BC3로 표시하였다. BC2와 BC3의 압력경계조건으로는 0 Pa로 가정하였다. 해석 대상 유체는 공기로 가정하였고, 계산시 필터 vessel 내의 모든 경계온도조건은 25°C로 가정하였다. 계산의 기준압력은 대기압이며, 계산된 압력은 모두 대기압에 대한 상대 값으로 표시된다.

Fig. 4(b)에서 계산에 사용한 격자를 보여주며, 격자가 해에 미치는 영향을 비교하여 총 5,313개의 격자를 선정하였다. 유동의 변화가 심한 노즐 팁과 디퓨저 부분은 계산격자를 조밀하게 배치하였다.

3. 전산해석 결과 및 고찰

여기서는 앞에서 생성한 계산격자와 경계조건을 사용하여 역세정 시스템 내부의 유동특성을 전산해석한 결과를 설명하고자 한다. 전산 해석결과는 역세정 노즐직경, 노즐팁 위치, 필터의 투과율, 역세정 압력 등의 변화에 따른 역세정 노즐, 디퓨저 및 필터내부의 속도분포, 압력분포, 동반유량 등을 상세히 분석하였다. 본 전산해석에 사용한 계산 변수들은 Table 2에 요약하였다.

3-1. 역세정 노즐주위 및 디퓨저내의 유동특성

Fig. 5에서 Fig. 7까지는 노즐직경을 변경하여 계산한 결과 가운데 대표적으로 직경 8 mm 노즐에 대하여 노즐 및 디퓨저 주위의 압력분포, 속도분포를 보여주는 그림들이다. 이 그림들은 노즐의 직경 $D_N=8$ mm, 노즐 팁의 위치 $N_{tp}=10$ mm, 투과율 $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², 역세정 압력 $P_{inj}=5.0 \times 10^5$ Pa, 디퓨저 목직경 $D_b=20$ mm에 대한 계산 결과이다.

Fig. 5는 노즐 및 디퓨저 주위의 압력분포의 계산결과를 보여주며, Fig. 6과 Fig. 7은 속도장의 계산결과를 보여주는 그림이다. Fig. 5에서 노즐 입구 부근의 압력은 3.0×10^5 Pa 정도이며, 노즐을 통하여 기체가 팽창하면서 압력이 급격히 감소하여 압력에너지가 속도에너지로 변환되어 간다. 노즐출구를 통과하면서 압력은 계속 감소하여 디퓨저 입구부근에서는 노즐 주위보다 압력이 낮아지게 된다. 이러한 압력 감소에 의해 노즐주위로부터 디퓨저 내로 동반되는 유동이 생성된다. 유체가 디퓨저 내부를 통과하면서 속도에너지가 압력에너지로 바뀌어 디퓨저 내부의 압력은 다시 증가한다. 디퓨저를 통과하여 증가된 압력은 필터의 역세정에 필요한 압력을 생성하여 세라믹 필터의 바깥벽 표면에 부착된 분진을 제거할 수 있도록 한다.

Fig. 6은 노즐 및 디퓨저 주위의 속도분포를 보여주는 그림이다. 고압의 역세정 기체가 노즐을 통과하면서 팽창하며 팽창한 유체는 노즐 팁을 통과하면서 더욱 팽창하여 마하수 1이 넘는 초음속 유동이 국부적으로 생성되어 이 부분의 속도 구배가 커진다. 디퓨저 입구에서 유속은 다시 감소하여 아음속으로 바뀌고 속도 에너

Table 2. Summary of simulation parameters.

| Parameters | Units | Values |
|-------------------------------------|----------------|--|
| Nozzle diameter, D_N | mm | 6, 8, 10, 12 |
| Nozzle tip position, N_{tp} | mm | -20, 0, 10, 30, 50 |
| Diffuser throat diameter, D_b | mm | 10, 20, 25, 30 |
| Permeability of ceramic filter, K | m ² | 6.3×10^{-13} , 1.26×10^{-12} , 6.3×10^{-12} , 1.26×10^{-11} |
| Nozzle pressure, P_{inj} | Pa | 0.8×10^5 , 1×10^5 , 2×10^5 , 4×10^5 , 5×10^5 , 7×10^5 , 8×10^5 , 10×10^5 |

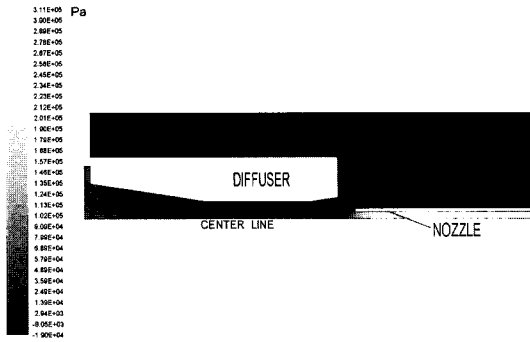


Fig. 5. Contour lines of static pressure near the nozzle tip ($D_N=8$ mm, $N_{ip}=10$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

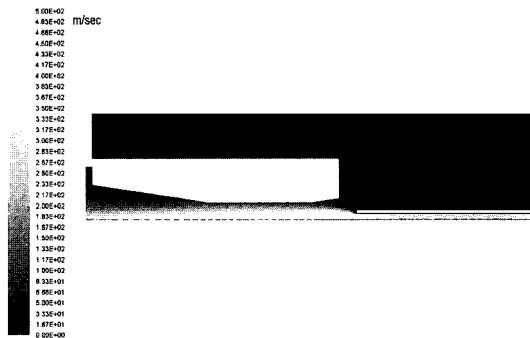


Fig. 6. Contour lines of velocity magnitude ($D_N=8$ mm, $N_{ip}=10$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

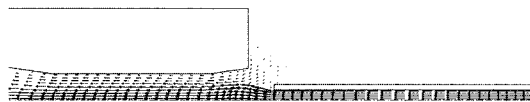


Fig. 7. Velocity vectors ($D_N=8$ mm, $N_{ip}=10$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

지는 점차 압력 에너지로 변환된다.

Fig. 7은 노즐 팁과 디퓨저에서의 속도 vector를 보여주는 그림이다, 이 그림에서 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 노즐 주위와 디퓨저 입구의 압력차에 의하여 노즐 팁 주변으로부터 디퓨저 내부로 동반되는 유동의 속도 vector를 관찰할 수 있다.

3-2. 노즐 직경의 영향

Fig. 8에서 Fig. 10까지는 노즐의 직경에 따른 유동특성의 해석결과를 상호 비교한 그림들이다. 필터 축방향

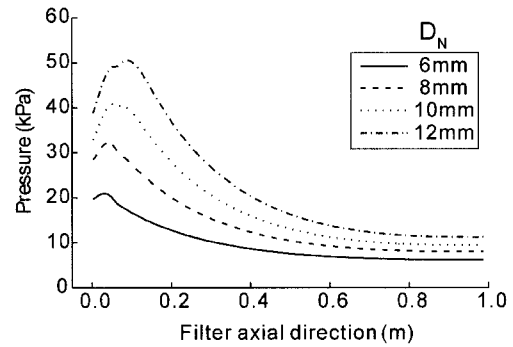


Fig. 8. Effect of nozzle size on pressure distribution along the filter inner surface ($N_{ip}=10$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

길이는 필터 상부를 0 m, 필터 하부를 1 m로 표시하였다. 이 그림들은 노즐 팁의 위치 $N_{ip}=10$ mm, 투과율 $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², 역세정 압력 $P_{inj}=5.0 \times 10^5$ Pa, 디퓨저 목 직경 20 mm에 대한 계산 결과이다.

Fig. 8은 필터의 축방향을 따라서 필터 내부의 압력 변화를 보여주는 그림이다. 동일 역세정 압력에서 노즐 직경이 증가할수록 필터내부의 압력이 증가하는 것을 볼 수 있으며 필터의 입구부분이 압력이 크고 필터의 하부로 갈수록 압력이 감소하는 결과를 보이고 있다. 역세정과정의 전산해석 연구^{[10][11]}에서도 본 해석결과에서와 같이 필터의 상부가 압력이 높으며, 필터의 하부로 갈수록 압력이 낮아지는 해석결과를 보이고 있다. 그러나 일부 실험논문^{[15][16]}에서 필터의 중단부와 하부의 압력분포가 거의 같거나, 하부 쪽의 압력이 약간 높은 결과를 보이는 경우가 있으며, 그 이유는 이러한 실험에서는 분진부하의 영향이 있는 상태이어서 필터의 투과율(permeability)이 감소하였거나, 필터 끝단의 형상이 반구형으로 본 연구와는 형상이 달라서 필터내부의 압력분포가 달라진 것으로 판단된다. Fig. 8에서 최대압력은 필터의 상부에서 약간 떨어진 부분에서 나타나고 있는데, 이것은 디퓨저를 통과하면서 이 부분에서 유로 단면적이 증가하고 유속이 감소하면서 속도에너지가 점차로 압력에너지로 변환되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 필터 바깥 표면을 통과하는 역세정 속도의 변화를 보여주는 그림이다. 역세정 속도는 필터의 상부에서 빠른 속도를 보이며 필터 하부로 갈수록 감소한다. 필터상부의 처음 부분은 튜브시트가 위치한 곳이므로 속도는 0이다. 노즐 직경이 증가할수록 필터내부로 유입되는 전체 유량이 증가하여 역세정 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 노즐직경이 작아질수록 전반적으로 필터의 상부와 하부의 역세정 속도차가 줄어드는 것을 관찰할 수 있다.

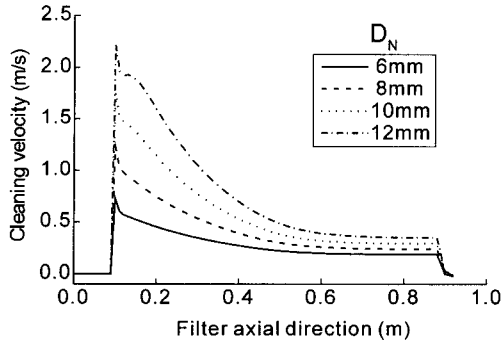


Fig. 9. Effect of nozzle size on cleaning velocity along the filter outer surface ($N_{tip}=10\text{ mm}$, $K=6.3\times 10^{-12}\text{ m}^2$, $P_{inj}=5\times 10^5\text{ Pa}$).

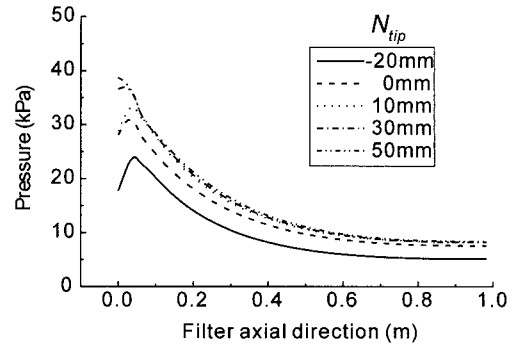


Fig. 11. Effect of nozzle tip position on pressure distribution along the filter inner surface ($K=6.3\times 10^{-12}\text{ m}^2$, $N_{tip}=10\text{ mm}$, $P_{inj}=5\times 10^5\text{ Pa}$).

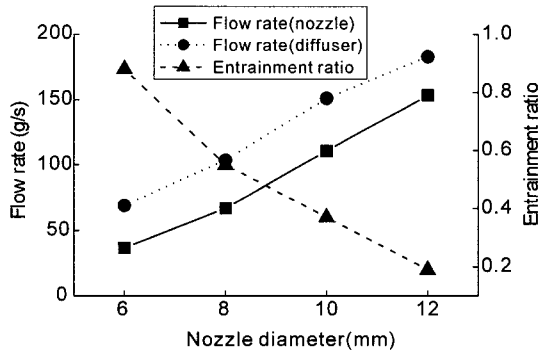


Fig. 10. Flow rates through nozzle and diffuser according to nozzle diameter ($N_{tip}=10\text{ mm}$, $K=6.3\times 10^{-12}\text{ m}^2$, $P_{inj}=5\times 10^5\text{ Pa}$).

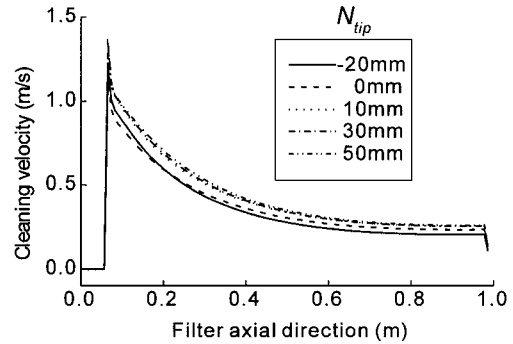


Fig. 12. Effect of nozzle tip position on cleaning velocity along the filter outer surface ($K=6.3\times 10^{-12}\text{ m}^2$, $N_{tip}=10\text{ mm}$, $P_{inj}=5\times 10^5\text{ Pa}$).

Fig. 10은 노즐직경에 따른 노즐과 디퓨저를 통과하는 유량 및 동반류비(entainment ratio)의 변화를 보여준다. 여기서 동반류의 비 R 은 앞의 식(2)로 정의하였다. Fig. 10에서 노즐직경이 증가할수록 노즐을 통과하는 유량과 디퓨저를 통과하는 유량이 증가하지만, 노즐을 통과하는 유량과 디퓨저를 통과하는 유량의 비는 노즐 직경이 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 노즐 직경이 증가하면서 노즐 주위에서 디퓨저 내로 유체가 유입될 수 있는 면적의 감소가 주요 원인으로 보이며, 동반류 비가 노즐 직경의 증가에 따라서 감소하는 경향은 기존의 실험들^{[9][17]}과도 일치함을 보인다.

3.3. 노즐 팁 위치의 영향

Fig. 11에서 Fig. 13까지는 노즐 팁의 위치가 역세정에 미치는 영향을 해석한 결과를 보여주는 그림들이며, 노즐 팁의 위치 N_{tip} 은 디퓨저 상면에서 -20 mm에서 50 mm 범위까지 변경하였다. 이 그림들에서 필터투과율 $K=$

$6.3\times 10^{-12}\text{ m}^2$, 역세정 압력 $P_{inj}=5.0\times 10^5\text{ Pa}$, 노즐직경 $D_N=10\text{ mm}$, 디퓨저 목직경 $D_m=20\text{ mm}$ 에 대한 계산 결과이다.

Fig. 11은 필터의 축방향을 따라서 필터 내부의 압력 변화를 보여주는 그림이며, 노즐팁의 위치가 디퓨저 상면을 기준으로 -20 mm인 경우는 역세정에 필요한 필터 내부의 압력이 전반적으로 낮으나 노즐팁의 위치가 10 mm 이상이면 역세정 압력은 거의 차이가 없음을 보여주고 있다.

Fig. 12는 노즐팁의 위치에 따라서 필터 바깥 표면을 통과하는 역세정 속도의 변화를 보여주는 그림이다. 역세정 속도는 노즐팁 위치가 10 mm 이상에서 큰 변화를 보이지 않고 있다.

Fig. 13은 노즐 팁의 위치를 디퓨저 상면에서 -20 mm에서 50 mm 범위까지 변경하면서 노즐과 디퓨저를 통과하는 유량을 계산한 결과이다. 노즐팁의 위치에 따라서 노즐을 통과하는 유량은 노즐 팁의 위치에 관계없이 거의 일정하게 유지된다. 디퓨저를 통과하는 유량은 디

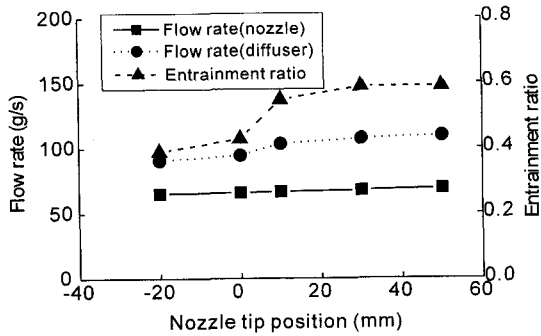


Fig. 13. Flow rates through nozzle and diffuser according to nozzle tip position ($K=6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $N_{ip}=10 \text{ mm}$, $P_{inj}=5 \times 10^5 \text{ Pa}$).

퓨저 상면에서 10 mm 이상 50 mm 범위까지 유량은 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 노즐팁이 디퓨저 상면에서 내부에 위치한 -20 mm의 경우는 디퓨저에 유입되는 유로면적이 감소하여 동반류의 생성량이 감소하고 역세정 효과가 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 노즐팁의 위치가 디퓨저 상부근처에 있으면서 10 mm 이상 떨어지면 디퓨저를 통과하는 유량이 일정하게 증가한 상태로 유지되어 역세정 유동에 있어서 적절한 위치임을 알 수 있다.

3.4. 필터 투과율의 영향

집진과정에서 세라믹 필터의 표면에 부착되는 분진층의 부착특성에 따라서 필터의 투과율(permeability)이 변한다. 여기에서는 이러한 분진층의 영향을 해석하고자 필터의 투과율 변화에 따른 역세정 유동특성을 계산하였다.

Fig. 14에서 Fig. 16까지는 필터의 투과율을 6.3×10^{-13} 에서 1.26×10^{-11} 까지 변화시킨 경우의 세라믹 필터

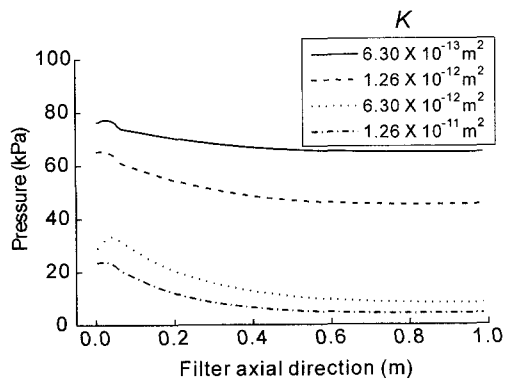


Fig. 14. Effect of filter permeability on pressure distribution along the filter inner surface ($D_N=8 \text{ mm}$, $N_{ip}=10 \text{ mm}$, $P_{inj}=5 \times 10^5 \text{ Pa}$).

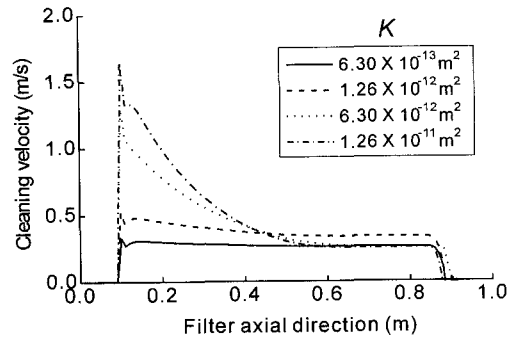


Fig. 15. Effect of filter permeability on cleaning velocity along the filter outer surface ($D_N=8 \text{ mm}$, $N_{ip}=10 \text{ mm}$, $P_{inj}=5 \times 10^5 \text{ Pa}$).

내부의 압력 및 속도분포를 계산한 결과를 보여준다. 이 그림들은 노즐 직경 $D_N=8 \text{ mm}$, 노즐팁 위치 $N_{ip}=10 \text{ mm}$, 역세정 압력 $P_{inj}=5.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, 디퓨저 목직경 $D_m=20 \text{ mm}$ 로 설정하여 계산한 결과이다.

Fig. 14는 필터의 투과율 변화에 따른 필터내부 압력 변화를 보여준다. 필터의 투과율이 높은 경우는 필터의 상부에서 압력이 높으며 필터의 하부로 갈수록 압력이 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 반면에 필터의 투과율이 낮아질수록 전체적으로 필터내부의 압력이 증가하며, 필터의 상부와 하부에 걸친 필터내부의 압력분포도 균일해지는 경향을 보인다.

Fig. 15에서 필터의 투과율이 높은 경우는 필터의 상부에서 압력이 높으므로 필터의 상부를 통과하는 유속이 빠른 것을 알 수 있으며 필터의 하부로 갈수록 급격히 속도가 감소하는 것은 알 수 있다. 반면에 필터의 투과율이 낮아질수록 전반적으로 필터내부의 압력이 균일해지므로 속도분포도 필터내부에서 균일해지며, 필터상부의 유속은 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 본

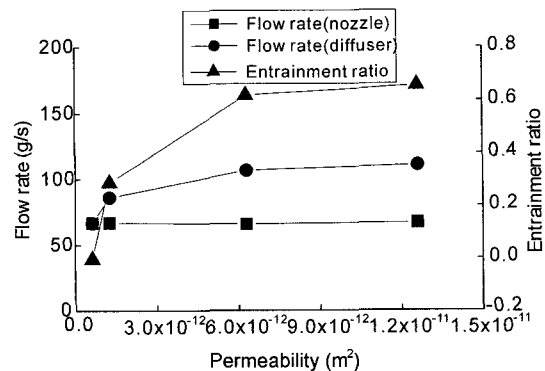


Fig. 16. Effect of filter permeability on flow rates ($D_N=8 \text{ mm}$, $N_{ip}=10 \text{ mm}$, $P_{inj}=5 \times 10^5 \text{ Pa}$).

전산해석 결과로부터 분진이 필터의 표면에 많이 부착할수록 필터의 투과율은 낮아지므로 필터내부 압력은 균일해지고 필터표면을 통과하는 역세정 속도도 균일해지는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 16에서는 필터투과율에 따른 노즐과 디퓨저를 통과하는 유량과 동반류비의 계산결과를 보여주는 그림이다. 필터 투과율이 증가하면 디퓨저를 통과하는 유량이 증가하고 이에 따라서 동반류비도 증가하는 결과를 보이고 있다.

3-5. 역세정 압력의 영향

Fig. 17에서 Fig. 19까지는 역세정 압력에 따른 유동 특성의 해석결과를 상호 비교한 그림들이다. 이 그림들은 노즐직경 $D_N=8$ mm, 투과율 $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², 노즐 팁 위치 $N_{tip}=10$ mm, 디퓨저 목직경 $D_{th}=20$ mm이고, 역세정 압력 P_{inj} 은 0.8×10^5 Pa에서 10×10^5 Pa로 폭 넓

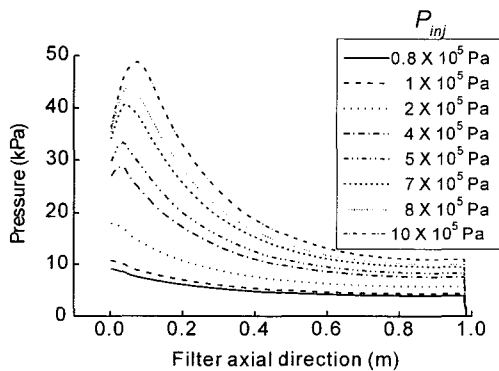


Fig. 17. Effect of injection pressure on pressure distribution along the filter inner surface ($D_N=8$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $N_{tip}=10$ mm).

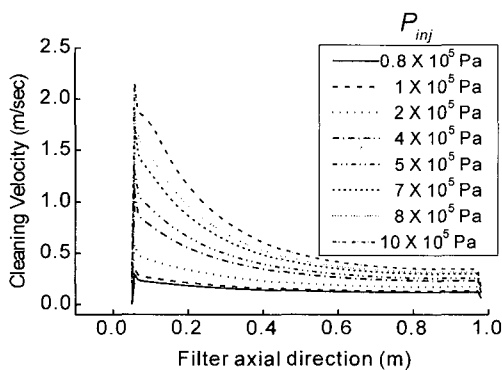


Fig. 18. Effect of injection pressure on cleaning velocity along the filter outer surface ($D_N=8$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $N_{tip}=10$ mm).

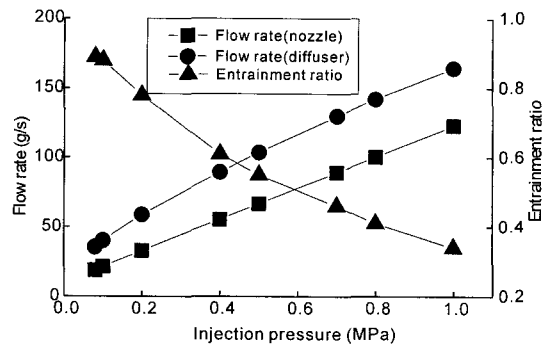


Fig. 19. Flow rates through nozzle and diffuser according to injection pressure ($D_N=8$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12}$ m², $N_{tip}=10$ mm).

게 변화시켜 그 효과를 상호 비교한 것이다.

Fig. 17은 필터의 축방향을 따라서 필터 내부의 압력 변화를 보여주는 그림이다. 역세정 압력이 증가할수록 필터내부의 압력이 증가하는 것을 볼 수 있으며 필터의 입구부분이 압력이 크고 필터의 하부로 갈수록 압력이 감소하는 결과를 보이고 있다. 또한 최대압력은 역세정 압력이 높은 경우는 필터 상부에서 약간 떨어진 부분에서 나타나고 있으나, 역세정 압력이 감소해감에 따라서 최대압력 위치는 필터 상부로 이동한다.

Fig. 18은 역세정 압력에 따른 역세정 속도의 계산결과이며, 역세정 압력이 증가할수록 상부와 하부의 역세정 속도의 차가 커지는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 역세정 압력이 2.0×10^5 Pa 이하로 되면 필터 상부와 하부의 역세정 속도는 거의 균일해 지는 것을 알 수 있다.

Fig. 19는 역세정 압력 변화에 따른 노즐과 디퓨저를 통과하는 유량 및 동반류 비의 계산 결과를 보여준다. Fig. 19에서 역세정 압력이 증가할수록 노즐을 통과하는 유량과 디퓨저를 통과하는 유량이 증가하지만, 동반류 비는 역세정 압력이 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 역세정 압력을 증가시켜 해석한 결과에서 노즐 끝에서 유동이 퍼지는 각도가 커져서 동반류동이 디퓨저 내부로 유입되는 데에 방해가 되며, 또한 유속의 증가로 인하여 디퓨저 벽면에서의 마찰 손실이 증가하기 때문에 유량의 증가를 억제하는 것으로 판단된다. 이러한 역세정 압력변화에 따른 동반류의 감소는 동일한 조건은 아니지만 여과백으로 실험한 문헌¹⁸⁾과도 경향의 일치를 보이고 있다.

3-6. 디퓨저 목 직경의 영향

디퓨저는 역세정 노즐에서 분사되는 유체의 빠른 속도 에너지를 일부 압력에너지로 변환시키고, 형상에 따라서 동반류의 양을 증가시켜 필터내부에서의 압력분포와

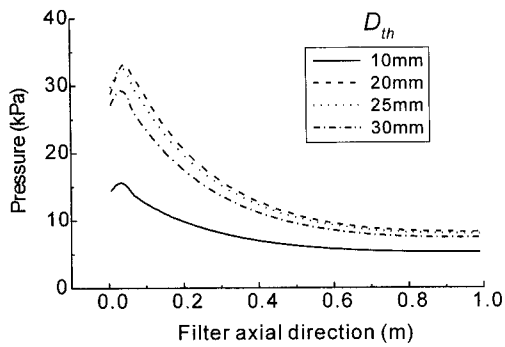


Fig. 20. Effect of diffuser diameter on pressure distribution along the filter inner surface ($D_N=8$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $N_{ip}=10$ mm, $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

속도분포를 조절하여 역세정 효과를 높여주는 역할을 한다. Fig. 20에서 Fig. 22까지는 축소확대형 디퓨저를 사용하고 디퓨저 목의 직경 D_{th} 를 10 mm에서 30 mm 사이로 변경하였을 경우의 세라믹 필터내부 압력 및 속도 분포를 보여주는 계산 결과이다. 이 그림들은 노즐 직경 $D_N=8$ mm, 투과율 $K=6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, 노즐팁 위치 $N_{ip}=10$ mm, 역세정 압력 $P_{inj}=5.0 \times 10^5$ Pa로 설정하여 계산한 결과이다.

Fig. 20은 디퓨저 목의 직경 변화에 따른 필터내부 압력 변화를 보여준다. 디퓨저 목의 직경이 10 mm의 경우가 필터내부에서 압력분포가 낮으며, 디퓨저 목의 직경이 20 mm의 경우가 필터의 내부에서의 압력이 가장 높다. 필터의 목 직경이 20 mm에서 25 mm, 30 mm로 증가함에 따라서 필터의 상부에서 하부에 걸친 필터내부의 압력은 다시 감소한다. 따라서 필터 내부의 압력이 최대로 되어 역세정 효과가 높은 디퓨저 목의 직경은 20 mm 근처로 정해짐을 알 수 있다.

Fig. 21은 디퓨저 목의 직경이 역세정 속도에 미치는

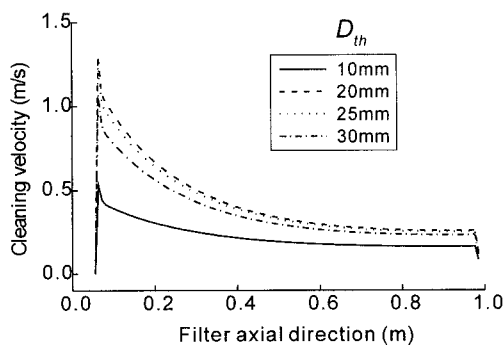


Fig. 21 Effect of diffuser throat diameter on cleaning velocity along the filter outer surface ($D_N=8$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $N_{ip}=10$ mm, $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

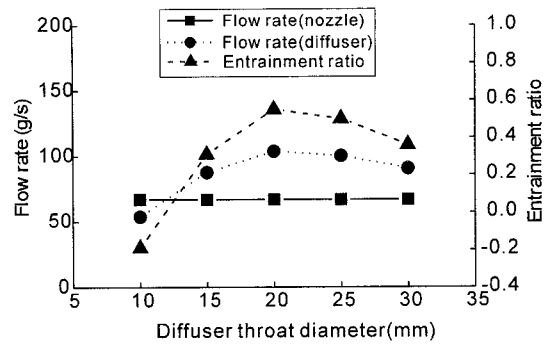


Fig. 22. Effect of diffuser throat diameter on flow rates ($D_N=8$ mm, $K=6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $N_{ip}=10$ mm, $P_{inj}=5 \times 10^5$ Pa).

영향을 보여주는 그림이다. 디퓨저 목의 직경이 20 mm 근처인 경우는 필터내부에서 압력이 전반적으로 높으므로 필터를 통과하는 유속도 가장 빠른 것을 알 수 있다.

Fig. 22는 디퓨저 목 직경의 변화에 따른 유량과 동반류비를 계산한 결과이며, 목 직경이 20 mm인 경우가 디퓨저를 통과하는 유량과 동반류비가 가장 크게 나타났다. 따라서 역세정 압력 $P_{inj}=5.0 \times 10^5$ Pa인 경우 본 세라믹 캔들필터 집진장치의 전산해석 결과로 목 직경이 20 mm 근처인 축소확대형 디퓨저를 사용하면 역세정 효과가 클 것으로 예측되었다.

4. 결 론

본 세라믹 필터를 사용한 집진장치의 역세정 유동특성 전산해석 연구를 통하여 역세정 과정에서 중요한 변수들인 노즐 직경, 노즐팁의 위치, 필터의 투과율, 역세정 압력, 디퓨저 목의 직경 등이 집진장치 내부에서의 속도분포, 압력분포, 동반류 등 역세정 유동특성에 미치는 영향을 상세히 파악하였다. 본 연구에서 얻은 결론들을 요약하면 다음과 같다.

1) 노즐직경이 증가할수록 노즐을 통과하는 유량과 디퓨저를 통과하는 유량이 증가하지만 노즐주위에서 디퓨저 내로 유입되는 동반류의 비는 노즐 직경이 증가함에 따라서 감소하였다.

2) 노즐 팁의 위치가 디퓨저 상부에서 10 mm 이하이면 디퓨저를 통과하는 유량이 줄어들지만, 디퓨저 상부에서 10 mm 이상 떨어지면 디퓨저를 통과하는 유량이 적절히 유지되는 것을 알 수 있었다.

3) 필터의 투과율이 높은 경우는 필터의 상부가 압력이 높고 역세정 속도도 빠르지만, 필터의 투과율이 작아질수록 필터내부의 압력이 균일해지고 필터를 통과하는 역세정 속도도 필터 상하부에 걸쳐서 균일해졌다.

4) 역세정 압력이 증가할수록 노즐과 디퓨저를 통과하는 유량은 증가하지만 노즐주위에서 디퓨저 내로 유입되는 동반류의 비는 감소하는 경향을 보였다.

5) 디퓨저 목 직경의 변화에 따른 유량과 동반류비를 계산한 결과로 목 직경이 20 mm 근처인 축소-확대형 디퓨저를 사용하면 역세정 효과가 가장 높은 것으로 예측되었다.

참고문헌

- Schmidt, E., Gang, P., Pilz, T. and Dittler, A.: "High Temperature Gas Cleaning", University Karlsruhe (TH), (1996).
- Mitchell, S.C.: "Hot Gas Particulate Filtration", IEACR/95 IEA Coal Research, London, UK (1997).
- 김종영, 정진도, 정현일: "석탄가스화 복합발전기술 개발(I)-석탄가스화 복합발전용 고온고압 집진기술 개발", 전력연구원 (1997).
- 정진도, 최주홍: "석탄가스화 및 연소가스의 집진을 위한 세라믹 필터 집진기술 평가", 대한환경공학회지, 17(8) (1995).
- 정재화, 정현일: "IGCC 제진장치에서 노즐 및 디퓨저 형상이 역세정 유동에 미치는 영향", 대한환경공학회 춘계학술대회 (1998).
- Choi, J.H., Seo, S.Y., Jeong, H.I. and Chung, J.H.: "The Pulse Cleaning Behaviors of Group Ceramic Candle Filter in a Hot Bench Unit", 4th International Aerosol Symposium, Russia (1998).
- Choi, J.H., Jeong, H.I. and Chung, J.H.: "The Performance of SiC Candle Filter in a Bench Scale Unit", J. Aerosol Sci., Vol. 29, Suppl. 1, pp. S487-S488 (1998).
- Seo, T.W., Kim, H.D., Choi, J.H. and Chung, J.H.: "Mathematical Modeling of Flow Field in Ceramic Candle Filter", Journal of Thermal Science, Vol. 7, No. 2 (1998).
- 서태원, 최주홍, 정재화: "세라믹필터에서의 축대칭 유동해석", 대한환경공학회지, 20(12), pp. 1761-1769 (1998).
- Schiffer, E.P., Laux, S. and Renz, U.: "High Temperature Gas Filtration", Volume 3: Flow Characteristics and Heat Transfer in a Ceramic Filter Element, EPRI GS-6489s (1991).
- Laux, S., Giernoth, B., Bulak, H. and Renz U.: "Aspects of pulse-jet cleaning of ceramic filter elements", In R. Clift and J.P.K. Seville, Gas cleaning at high temperatures, Blakies, Glasgow, pp. 203-224 (1993).
- FLUENT Users' Guide, Volume 1-4, Release 4.4 (1996).
- Brinkman, H.C.: "A Calculation of the Viscous Force Exerted by a Flowing Fluid on a Dense Swarm of Particles", Appl. Sci. Res., A1, 27-34 (1947).
- Durst, M., Freude, E., Schulz, K. and Walch, A.: "Schumacher's Hot Gas Filter Technology", Schumacher Umweltund Trenntechnik GmbH (1996).
- Stephen, C.M., Grannell, S.K. and Seville, J.P.K.: "Conditioning and Pulse-Cleaning of Rigid Ceramic Filters", In E. Schmidt, P. Gang, T. Pilz, and A. Dittler, High temperature gas cleaning, Institute fur Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universitat Karlsruhe (TH), pp. 208-218 (1996).
- Berbnor, S. and Loffler, F.: "Pulse Jet Cleaning of Rigid Filter Elements at High Temperatures", In R. Clift and J.P.K. Seville, Gas cleaning at high temperatures, Blakies, Glasgow, pp. 203-224 (1993).
- Ito, S. and Tanaka, T.: "Pulse Jet Cleaning of Porous Ceramic Filter Applied to Coal Gas Cleaning-A Study on Filter Cleaning Model Including Diffuser Effect", CRIEPI report W92004 (1992).
- 황계순, 공성용: "펄스-젯 여과집진기에서의 최적 탈진시스템", 대한환경공학회지, 19(9), pp. 1193-1204 (1997).