

ORIGINAL ARTICLE

충격기류식 여과집진기의 내부 유동 시뮬레이션 해석을 통한 압력손실 예측

장경민 · 정은상 · 서정민*

부산대학교 바이오환경에너지학과

Prediction of Pressure Drop Using the Internal Flow Simulation of Pulse Air Jet Bag Filters

Kyeong-Min Jang, Eun-Sang Jung, Jeong-Min Suh*

Department of Bio Environmental Energy, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

Abstract

With continuous industrial development, the types, and amount of particulate matter (PM) have been increasing. Since 2018, environmental standards regarding PM have become more stringent. Pulse air jet bag filters are suitable for PM under the 20 μm and, can function regardless of size, concentration and type. Filtration velocity and shape are important factors in the operation and design of the pulse air jet bag filters however, few established studies support this theory. In this research, numerical simulations were conducted based on experimental values and, several methods were employed for minimizing the pressure drop. In the pilot system, as the inlet duct velocity was faster than 19 m/sec, flow was not distributed equally and, re-entrainment occurred due to the hopper directional vortex. The multi-inlet system decelerated the hopper directional vortex by 25 ~ 30% , thereby decreasing total pressure drop by 6.6 ~ 14.7%. The guide vane system blocked the hopper directional vortex, which resulted optimal vane angle of 53°. The total pressure of the guide vane system increased by 0.5 ~ 3% at 1.5 m/min conditions. However, the filtration pressure drop decreased by 4.8 ~ 12.3% in all conditions, thereby reducing the operating cost of filter bags.

Key words : Pulse air jet bag filter, Filtration velocity, Pressure drop, Simulation

1. 서론

고도 경제성장으로 인한 공업화로 업종이 다양해짐에 따라 여기에 수반되어 발생하는 대기오염물질이 증가할 뿐만 아니라 종류도 여러 가지로 다양해지고 있다. 특히, 미세먼지는 다양한 산업 활동으로 인해 배출되며, 산업이 발전함에 따라 미세먼지의 배출량이 증가하여 심각한

대기오염의 원인이 된다(Ryu et al., 2007; Suh et al., 2012). 이에 따라 정부에서는 2018년 3월 27일부터 미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)에 대한 환경기준을 강화하여 시행하고 있다(Ministry of Environment, 2018).

산업시설에서 배출되는 미세먼지를 처리하기 위해 다양한 종류의 집진설비가 사용되고 있는데, 여과집진기는 입자상 오염물질 처리를 위해 가장 일반적으로 사용되는

Received 20 February, 2020; Revised 12 April, 2020;

Accepted 16 April, 2020

*Corresponding author: Jeong-Min Suh, Department of Bio Environmental Energy, Pusan National University, Miryang 50463, Korea
Phone : +82-55-350-5436
E-mail: suhjm@pusan.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

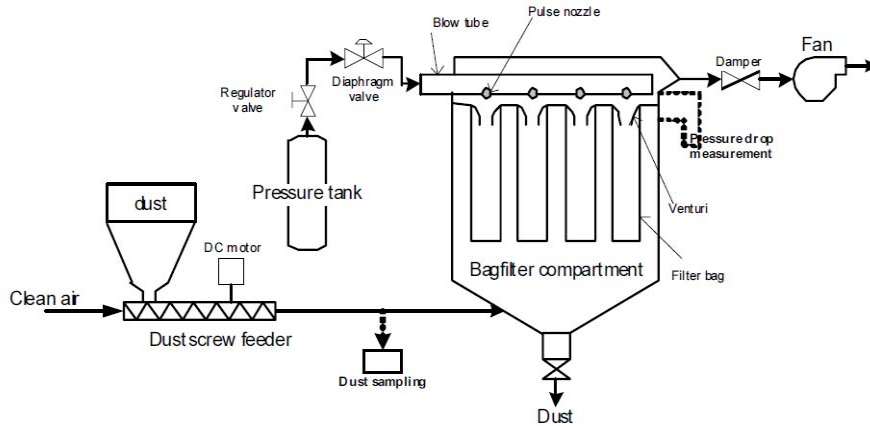


Fig. 1. Experimental apparatus schematic.

집진설비로, 흡진 가스를 여과포에 통과시켜 청정가스와 오염물질을 분리·제거 한다. 여과집진기는 입경 20 μm 미만 미세 오염물질 처리에 적합하며, 적절한 여과포를 사용할 경우 오염물질의 크기, 종류, 농도에 관계없이 집진 처리가 가능하다(Gabites et al., 2008). 그러나, 여과집진장치는 여과포 표면에 부착되는 입자층에 의한 과도한 압력손실로 인해 동력비가 과다하게 소요되며, 여과포에 부착된 먼지층 제거를 위한 주기적인 탈진으로 인해 운전비 상승과 여과포의 교체 등으로 인한 유지·보수비 등 경제적 부담이 큰 단점이다(Suh et al., 2011).

국내에서는 여과집진장치의 설계 및 운전에 가장 중요한 인자인, 여과속도와 장치의 형상 등에 대해 이론적으로 확립된 연구는 거의 없다. 대부분의 방지시설업체 및 사용업체는 경험에 의존하여 여과집진장치를 설계, 운전하여 여과집진장치의 장점인 고성능을 유지하지 못할 뿐만 아니라, 여과포의 수명이 단축되어 운전유지비 과다 소요의 요인이 되고 있다(Liu and Liptak, 1997; Anderson et al., 2016).

따라서 본 연구는 현재 산업체에 가장 많이 이용되고 있는 충격기류식 여과집진장치 (Pulse air jet bag filter)의 압력손실 실측 실험 결과를 바탕으로, 입구 덕트 형상 변화에 따른 압력손실 예측 및 최소화 연구를 수행하였다. 다양한 조건에서의 예측 및 실험이 불가능한 영역을 예측하기 위해서 Navier-Stokes 방정식의 해석이 가능한 수치해석 시뮬레이션을 통해 압력손실 예측 및 최소화

화 방안을 제시하여 여과집진기의 설계 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

본 실험에서는 여과면적 6 m^2 인 Pilot 충격기류식 여과집진장치를 이용하여 여과속도, 입구농도, 벤츄리 설치 조건에 따라 여과포의 압력손실을 측정하였다. 실험에 사용된 분진은 P제철소 coke공장의 여과집진장치에서 포집된 것이며, 평균입경은 57.33 μm , 진비중은 1.78이다. 실험용 여과포는 실제 산업현장에서 가장 널리 사용되는 폴리에스테르 여과포로서 크기 $\text{O} 140 \times L 850$ 를 16개 사용하였다.

압력손실을 측정하기 위한 소형 충격기류식 여과집진장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다(Suh et al., 2011).

Table 1은 실험에 사용된 분진의 특성과 성분을 나타내었고, Table 2는 여과포의 재질과 성상을 나타내었다.

2.2. 집진기 모델링

충격기류식 집진기에서 측정된 실측 압력손실 결과를 바탕으로, 수치해석 시뮬레이션을 통해 집진기 내부 유동 특성 및 압력 분포를 예측하였으며, 해석 프로그램은 ANSYS Fluent 19.0 software를 활용하였다. 집진기 형상 및 해석 영역은 Fig. 2에, 집진기의 여과포 배열 및 가스 흐름 방향은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1. Characteristics and components of coke dust

Characteristics		Value				
Particle mean diameter (μm)		58.9				
Standard deviation of diameter		13.2				
True density of particle (kg/m^3)		1,780				
Components (%)						
C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	T-Fe	Others	Total
78.6	6.56	2.74	1.45	0.95	9.7	100

Table 2. Characteristics of filter without surface treatment

Specification	Value
Material	Polyester
Size (mm) / Cylindrical type	$\varnothing 140 \times L 850$
Thickness (mm)	2.34
Air permeability ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$)	0.166
Number of bags	16
Total filter area (m^2)	5.98
Filtration velocity (m/min)	1.5
Initial pressure drop (Pa)	206

2.2.1. 지배방정식

지배방정식은 유체 거동 해석을 위한 기본 조건으로, 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식이 포함된 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 이용, 유체의 거동을 해석하였다.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) \\ = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho g + S_m \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t}(\rho E) + \nabla \cdot (u(\rho E + p)) \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \end{aligned} \tag{3}$$

식 (1)은 연속방정식으로 ρ 는 유체의 밀도, u 는 유체의 속도 벡터를 나타낸다. 식 (2)는 운동량 방정식으로 P 는 압력, τ 는 응력 텐서, S_m 은 운동량 변화량을 나타내며, 식 (3)는 에너지 방정식으로 E 는 에너지, T 는 절대온도, k_{eff} 는 유효 열전달계수, S_h 는 에너지 변화량을 나타낸다.

2.2.2. 난류 방정식

수치해석 시뮬레이션에서 유체의 점성에 따른 난류의 예측 및 해석 방법으로는, DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation), RANS (Raynolds Averaged Numerical Simulation) 등이 있다. DNS는 유체를 가장 세밀하게 모사하는 방법으로, 미세한 크기의 격자를 다수 배열하고 매우 작은 입자 하나 하나의 거동을 해석하여, 정확성은 뛰어나나 계산에 많은 시간과 비용이 소요된다. LES는 최소 크기의 난류 소용돌이(Eddy)를 예측하여 모사하는 방식으로 정확성은 DNS 모델에 비해 다소 낮아질 수 있으나, 해석에 소요되는 시간과 비용이 적어 효율적이다. RANS는 평균 레이놀드 수를 이용하여 유체의 전체적인 거동을 모사하는 방식으로 미소 구간의 해석 정확성은 DNS, LES 모델에 비해 다소 떨어질 수 있으나 유체의 전체적인 거동 및 특성을 모사하기에 가장 적합하며, 계산에 소요되는 시간이 짧아 매우 효율적으로 사용되는 모델이다(Zhiqiang et al., 2007; Xavier et al. 2010). 본 연구에서는 집진기 내부 유체의 전체적인 거동을 모사하고 해석시간의 단축을 위해 RANS 모델 중 가장 널리 이용되며 비압축성

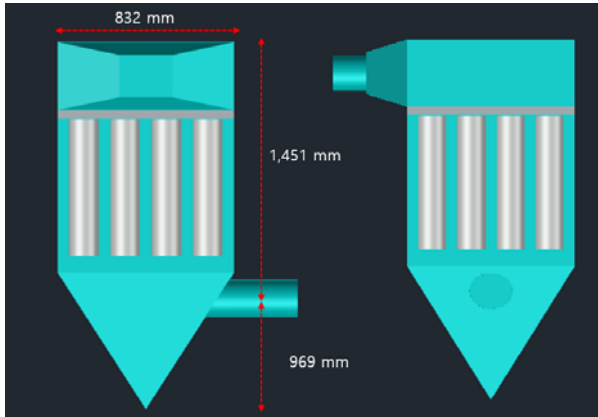


Fig. 2. Pilot system diagram and simulation volume.

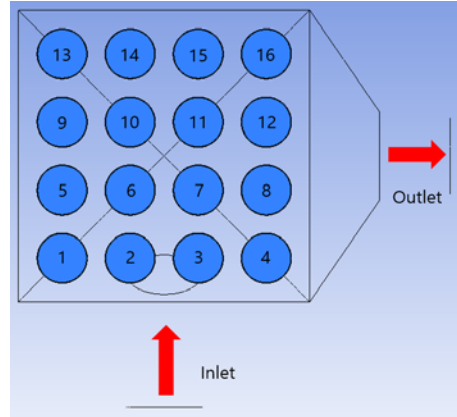


Fig. 3. Gas flow direction and filter bag layout.

유동 해석에 적합한 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였다. k 는 난류강도, ϵ 은 난류 소산율로, 유체의 속도에 따른 난류에너지 강도와 난류혼합길이에 따른 난류 에너지 소산율을 바탕으로 유체를 모사한다. 식 (4)는 난류강도 변화량으로, μ 는 난류점성, σ 는 프란틀 수, G_k 는 속도에 의한 난류에너지, G_b 는 부력에 의한 난류에너지, Y_M 은 난류에너지에 의한 팽창율과 소산율의 비를 S 는 난류에너지, 소산율의 변화량을 나타낸다.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho k u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \epsilon) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\delta \epsilon}{\delta x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (7)$$

2.3. 압력손실

여과집진기에서 발생하는 압력손실의 대부분은 다공성 물질인 여과포와 집진기의 형상 변화에 의해 발생한다. 식 (8)은 여과포에 의해 발생하는 압력손실로서, 함진가스는 다공성 물질인 여과포를 통과하면서 달시(Darcy) 법칙에 의해 압력손실이 발생하며, 이때 발생하

는 압력손실은 여과속도, 여과포의 두께 및 점성계수와 비례한다. μ 는 가스의 점성계수, α 는 여과포의 투수계수로 여과포의 종류와 탈진 상태에 따라 고유한 값을 가지며, d 는 여과포의 두께이다. 식 (9)는 집진기의 형상 변화에 의해 발생하는 관성 손실로, 여과집진기는 여과포 입구에서의 팽창, 출구에서의 압축 유동이 발생한다. K_f 는 집진기 형상 변화에 따른 상수로 팽창, 수축부의 면적비, 집진기 벽면 소재 등에 따라 달라지며, 관성에 의한 압력손실은 가스의 밀도, 속도의 제곱에 비례한다.

$$\Delta P = - \frac{\mu}{\alpha} v_i d \quad (8)$$

$$\Delta P = K_f \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

여과집진기 내부 유동해석을 위해, 기존 장치를 바탕으로 분진 투입구 형상 및 여과속도 변화에 따른 내부 유동과 압력손실 변화를 예측하였으며, 실험 조건 및 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Pilot system experiment conditions and results

Conditions	
Dust concentration (g/m ³)	0.5
Filtration velocity (m/min)	1.0 ~ 2.0
Total pressure drop (Pa)	469.7

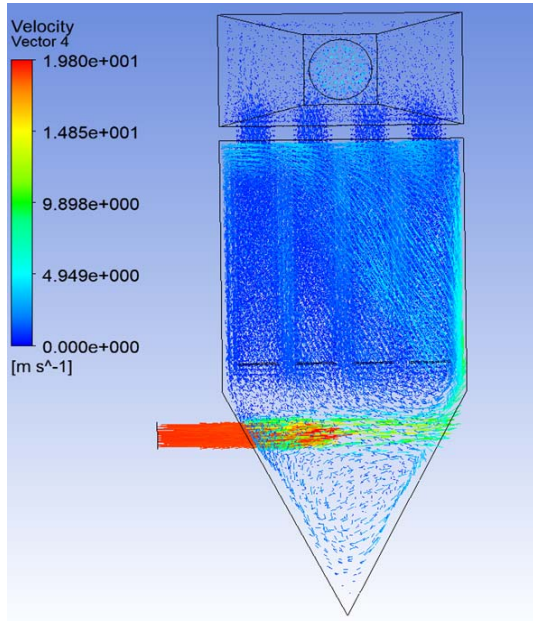


Fig. 4. Pilot system gas flow stream lines at $V_f = 1.5$ m/min.

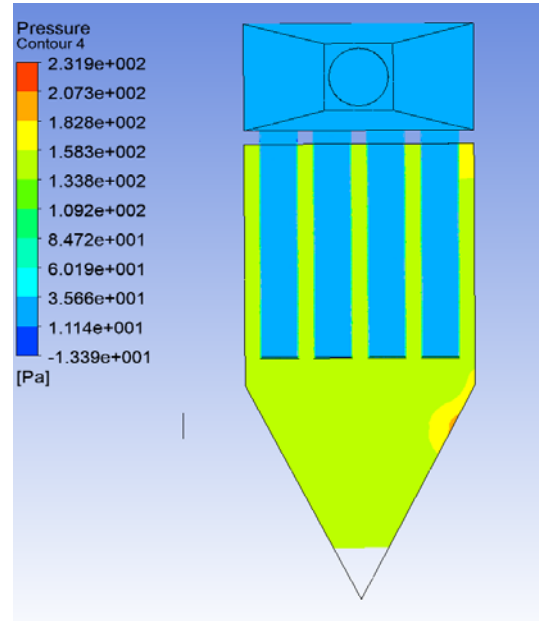


Fig. 5. Pilot system static pressure diagram at $V_f = 1.5$ m/min.

3.1. 기존 집진기 내부 유동해석 결과

집진기 내부 유동 해석 결과 여과속도 1.5 m/min에서 집진기 형상에 의해 43.7 Pa, 여과포에 서 199.8 Pa, 유체 가속으로 인해 208.7 Pa, 총 452.2 Pa의 압력손실이 발생하는 것으로 예측되었다. Fig. 4에서 집진기 내부 유입속도가 19 m/sec로 높아서 여과포로 유입되기 전에 집진기 본체 벽면과 강하게 충돌하고, 호퍼 방향으로 1 ~ 5 m/sec의 와류가 발생하여 퇴적된 분진이 재비산 됨을 알 수 있었다. Fig. 5는 여과속도 1.5 m/min 조건에서, 기존 집진기 내부의 전체적인 정압 분포로, 여과포로 인해 약 200 Pa의 압력손실이 발생한다. Fig. 6과 같이 집진기 벽면과 충돌 후 상승하는 가스는 집진기 내부로 고르게 분배되지 않고, 집진기 뒤쪽 벽면을 중심으로 확산되어 13 ~ 16번 여과포로 유체가 집중되어 여과포에 고루 분포되지 않으므로, 유체의 속도를 최대한 낮추는 것이 좋을 것으로 사료된다.

기존 집진기의 여과속도에 따른 압력손실 변화는 Fig. 7에 나타내었는데, 여과 속도 1.0 m/min에서 총 압력손실은 262.28 Pa, 1.25 m/min에서는 355.84 Pa, 1.75 m/min에서 572.72 Pa, 2 m/min 조건에서는 696.81 Pa로 나타났다.

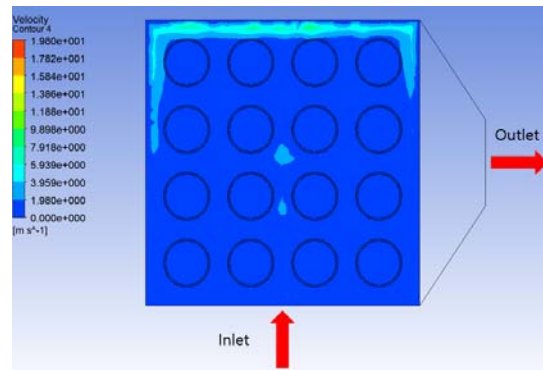


Fig. 6. Pilot system gas velocity distribution at $V_f = 1.5$ m/min.

여과속도가 1.5 m/min 이상으로 상승할 경우 여과포에 의한 압력손실 보다 유체의 가속에 의한 압력손실이 급격하게 증가하므로 여과 속도를 1.5 m/min이하로 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다. Fig. 8의 회귀분석 결과와 같이 집진기에서 발생하는 전체 압력손실은 여과 속도에 대한 2차 함수로 나타났고, 여과속도가 빠를수록 압력손실이 크게 증가함을 알 수 있었다.

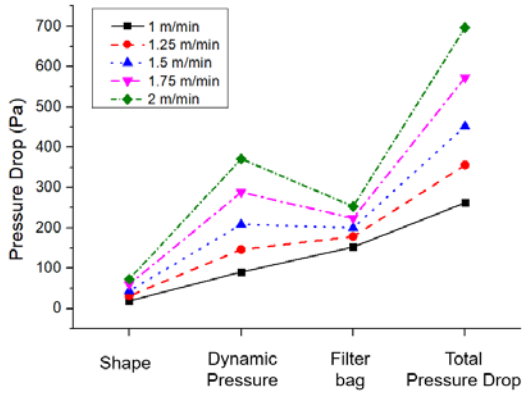


Fig. 7. Pilot system pressure drop by filtration velocity.

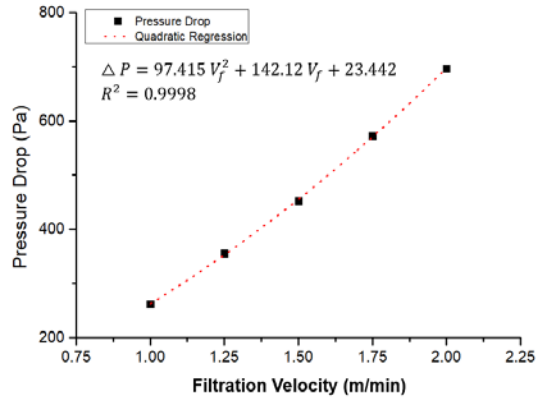


Fig. 8. Pressure drop regression analysis of pilot system.

3.2. 다중 입구 덕트 설치시 내부 유동 해석 결과

기존 집진기에서는 19 m/sec 이상의 빠른 입구 유속으로 인해 함진가스가 여과포로 유입되기 전 벽면과 강하게 충돌하여 호퍼 방향으로 와류가 발생하고 가스가 불균일하게 분배되어 입구 근처 여과포에는 집진이 잘 이루어지지 않는 문제가 발생하였다. 함진가스를 여과포에 고루 분배하고 호퍼 방향으로 와류를 방지하여 압력손실을 최소화하기 위해 다중 입구 덕트 (duct) 집진방식을 고안하였으며 형상은 Fig. 9에 나타내었다.

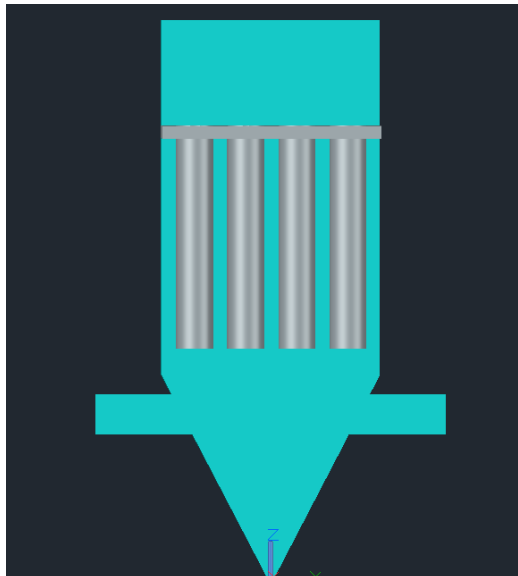


Fig. 9. Schematic of multi-inlet system.

다중 입구 덕트 집진기의 내부 유동해석 결과 여과속도 1.5 m/min에서 집진기 형상에 의해 37.7 Pa, 여과포에서 185.4 Pa, 유체가속으로 199.0 Pa, 총 422.2 Pa의 압력손실이 발생하여 압력손실이 7.1% 감소하는 것으로 나타났다. 내부 유체 흐름 및 분포 정도는 Fig. 10에 나타내었는데 Fig. 4와 달리 동일한 에너지를 가진 유체가 충돌하여 운동량이 소산되어 본체 가운데를 중심으로 가스가 고루 분배됨을 알 수 있었다.

기존 형상 집진기와 유사하게 호퍼 방향으로 와류는 발생하나 속도는 0.75 ~ 3.5 m/sec로 기존 집진장치보다 25 ~ 30% 감소하여 분진의 재비산 위험이 줄어들 것으로 판단된다. Fig. 11은 여과속도 1.5 m/min 조건에서, 다중 입구 설치 시의 전체적인 정압 분포로, 여과포로 인한 압력손실은 약 185 Pa로 기존 형상에 비해 압력손실이 7.5% 감소하였다. 여과속도에 따른 압력손실 변화는 Fig. 12에 나타내었으며 여과속도 1.0 m/min에서 총 압력손실은 227.5 Pa, 1.25 m/min에서 318.7 Pa, 1.75 m/min에서 523.6 Pa, 2.0 m/min에서는 634.0 Pa로 나타났다.

다중 입구 덕트 설치 시 기존 집진기보다 전체 압력손실을 6.6 ~ 14.7% 정도 줄일 수 있을 것으로 나타나, 소형집진기의 경우 입구 덕트가 두 개로 분리되어, 덕트 시스템에서 추가적인 비용 발생을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3.3. 다공판 설치 시 내부 유동 해석 결과

다중 입구 덕트 집진기는 기존 형상 집진기 보다 압력

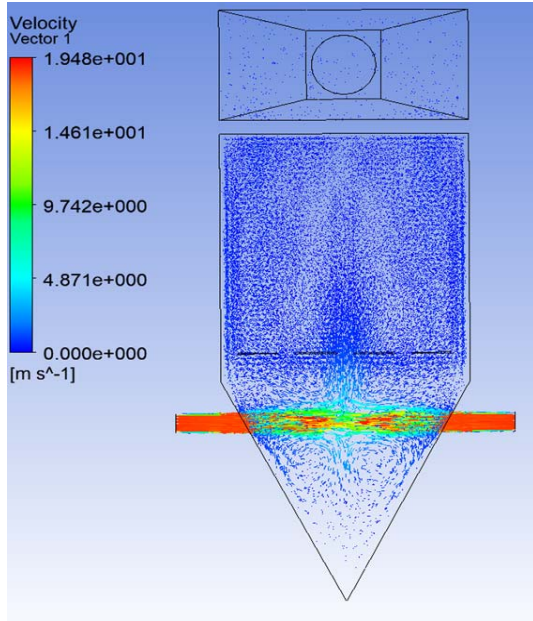


Fig. 10. Multi-inlet system gas flow stream lines at $V_f = 1.5$ m/min.

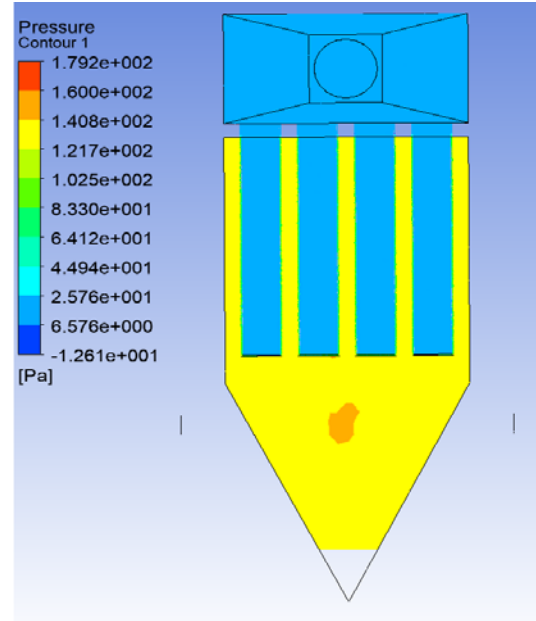


Fig. 11. Multi-inlet system static pressure diagram at $V_f = 1.5$ m/min.

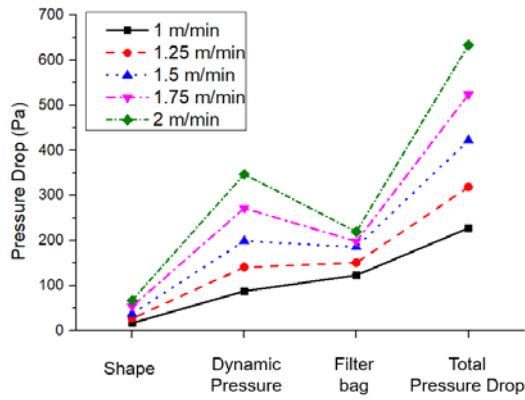


Fig. 12. Multi-inlet system pressure drop by filtration velocity.

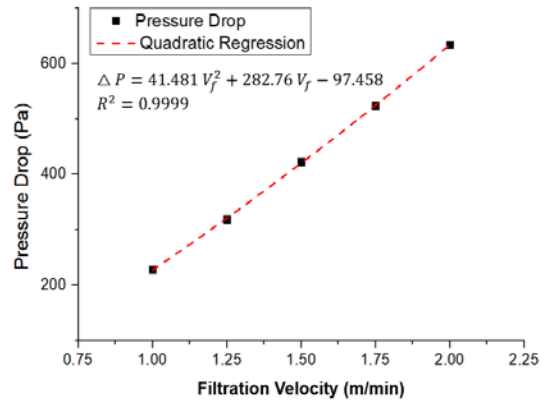


Fig. 13. Pressure drop regression analysis of multi-inlet system.

손실을 줄일 수 있는 장점이 있지만 가동중인 집진기의 경우 기존 덕트의 직경이 변화되어 새로 설치하는 추가 비용과 설치 공간을 고려하여야 한다. 추가 비용 최소화 및 설치공간을 고려하여 입구 덕트에 다공판을 설치하여 유동해석을 진행, 압력손실변화를 예측하였다.

Fig. 14는 다공판의 형상으로 좌측 다공판은 기존 덕

트 면적의 25%, 우측 다공판은 기존 덕트 면적의 33% 수준으로 설계되었다(Burton and Smith, 1975; Sahin and Ward, 1978). 가스의 유속, 유량을 적절하게 분배하기 위해 세 개의 다공판을 배치하였다. 유동해석 결과 여과속도 1.5 m/min에서 집진기 형상에 의해 39.5 Pa, 여과포에서 195.9 Pa, 유체 가속으로 222.6 Pa, 다공판에

의해 4525.0 Pa, 총 4982.8 Pa의 압력손실이 나타났다. 다공판 설치에 따른 내부 유동 및 유속 분포는 Fig. 15에, 여과포에 의한 정압 변화는 Fig. 16에 나타내었다. 여과 속도 1.0 m/min에서 총 압력손실은 2297.0 Pa, 1.25 m/min에서 3510.6 Pa, 1.75 m/min에서 6783.4 Pa, 2.0 m/min에서는 8872.3 Pa로 나타났다. Fig. 16과 같이 다공판 설치 시 여과포로 인한 압력손실은 약 196 Pa로 기존 형상에 비해 압력손실이 2% 감소하였다.

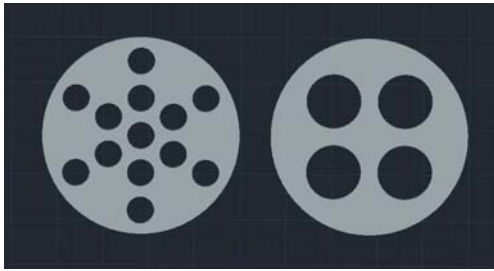


Fig. 14. Diagram of designed perforated sheet.

다공판에 의한 압력손실은 전체 압력손실의 83 ~ 92%로 매우 높게 나타났는데, 이는 실험장치의 규모와

큰 연관성이 있는 것으로 사료된다. 입구 덕트는 함진 가스중의 분진 퇴적 방지를 위해 대부분의 입자상오염물질 처리 방지시설에서는 덕트의 반송 속도를 18 ~ 20 m/sec 전후로 사용한다. 이로 인해, 장치의 규모가 작아질수록, 덕트의 직경이 감소하여 레이놀드 수가 커져 난류 강도가 높아지게 된다. 기존 Pilot 집진기의 입구 덕트 직경은 약 100 mm로 매우 강한 난류가 발생하여 다공판에 의한 저항이 증가하게 된다. 다공판으로 인해 여과포 주변 영역에서 유체의 최대 속도 및 편차가 감소하여, 집진기 형상과 여과포에 의한 압력 손실이 약 2 ~ 5% 정도 감소되거나 다공판 부분에서 압력손실이 매우 크게 발생하며, 다공판 설치의 실용성이 매우 떨어지는 것을 알 수 있었다.

3.4. 가이드 베인 적용시 내부 유동 해석 결과

가이드 베인은 적은 압력손실로 유체의 방향을 변화시킬 수 있는 장치로서, 집진기 본체에 유입되는 유체 가속 흐름 속도를 줄이고 분진의 재비산 방지 및 여과포에 유량을 고루 분배하기 위해 가이드 베인을 적용하여 압력손실을 예측하였다. 가이드 베인 적용시 여과속도 1.5 m/min에서 집진기 형상에 의해 45.0 Pa, 유체 가속으로

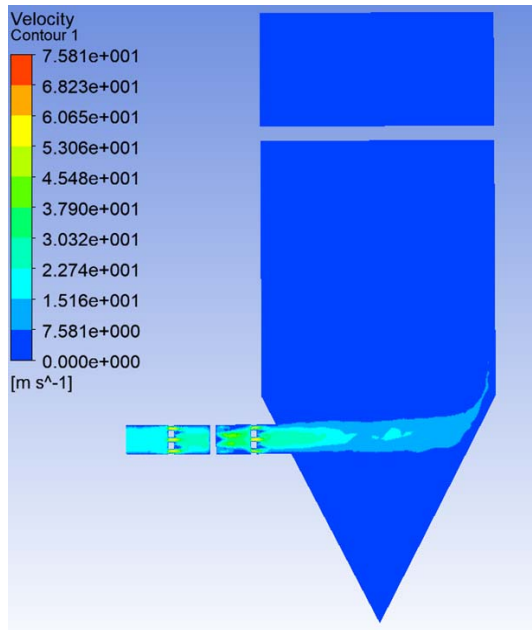


Fig. 15. Gas velocity distribution diagram of perforated sheet system at $V_f = 1.5$ m/min.

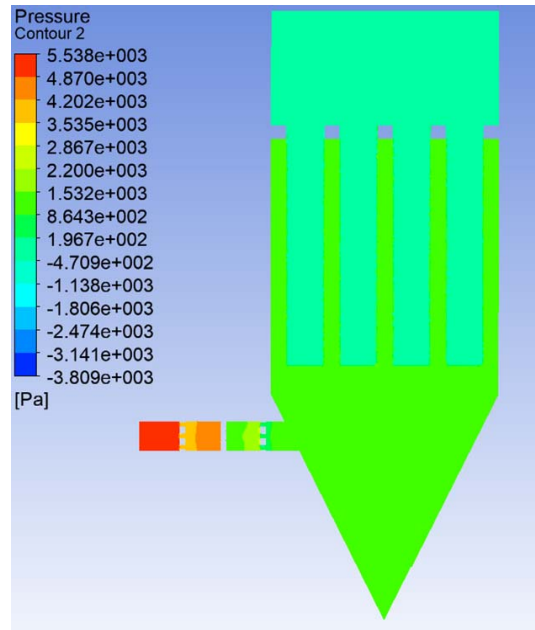


Fig. 16. Perforated sheet system static pressure diagram at $V_f = 1.5$ m/min.

220.1 Pa, 여과포에서 188.8 Pa, 총 454.7 Pa의 압력손실이 발생하는 것으로 예측되었으며, 1.0 m/min에서 총 압력손실이 252.2 Pa, 1.25 m/min는 351.3 Pa, 1.75 m/min는 587.3 Pa, 2.0 m/min일 때는 717.4 Pa로, 여과 속도에 따른 압력손실 변화는 Fig. 20에 나타내었다. 여과 속도가 1.5 m/min 이하일 경우 기존 집진기 형상에 비해 전체 압력손실이 2 ~ 4% 정도 감소하며, 1.5 m/min

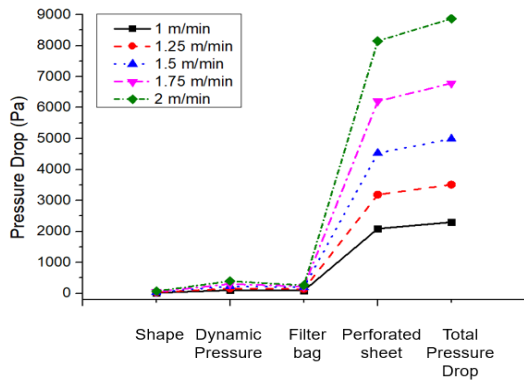


Fig. 17. Perforated sheet system pressure drop by filtration velocity.

이상에서는 0.5 ~ 3% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 여과 속도 1.5 m/min 이하 조건에서 전체 압력손실이 감소하는 이유는 여과포에서 압력손실이 2 ~ 13% 감소하기 때문으로, 가이드 베인으로 인해 내부 유체의 흐름이 균일화되고, 여과포 주변 가스 속도의 편차가 감소하여 여과포에서의 압력손실이 감소하는 것으로 판단된다. 1.5 m/min 이상 조건에서는 전체 압력손실이 다소 증가하게 되는데, 이는 가이드 베인으로 인해 집진기 본체의 전체 압력손실 계수가 증가하기 때문으로 판단된다. 가이드 베인의 길이 가스의 호퍼 방향으로의 흐름을 차단하여 분진의 재비산을 매우 효율적으로 방지하고 여과포 전체에 가스를 고루 분배할 수 있는 가이드 베인의 최적 각도는 약 53°임을 알 수 있었다.

Fig. 22에는 집진기 형상 변화에 따른, 여과포에서의 압력손실 변화를 나타내었다. 다중 입구 덕트 방식을 적용할 경우 여과포에서의 압력손실이 3.5 ~ 19% 정도 감소하며, 특히 여과속도 1.5 m/min 이하 조건에서 압력손실을 효율적으로 감소시키는 것으로 판단된다. 가이드 베인을 사용할 경우 여과포에서의 압력손실이 4.8 ~ 12.3% 감소하는 것으로 나타났다. 다공판을 적용할 경우

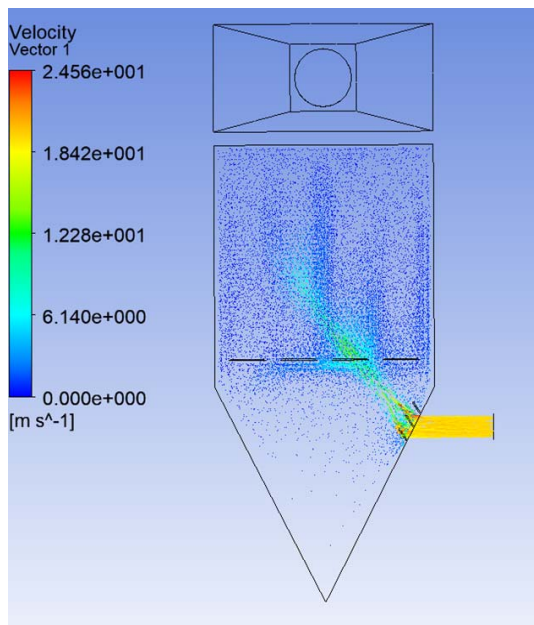


Fig. 18. Guide vane system gas stream velocity diagram at $V_f = 1.5$ m/min.

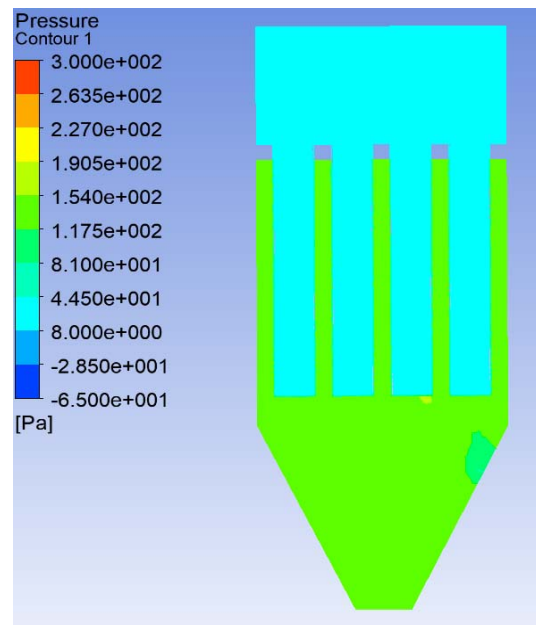


Fig. 19. Guide vane system static pressure diagram at $V_f = 1.5$ m/min.

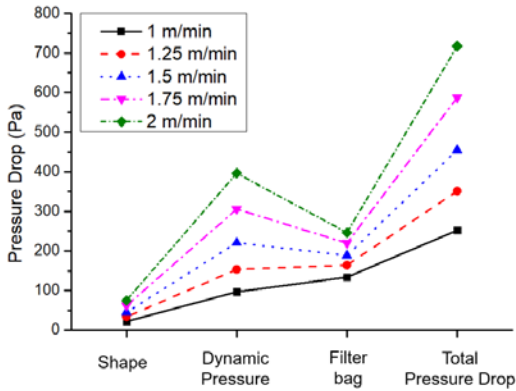


Fig. 20. Guide vane system pressure drop by filtration velocity.

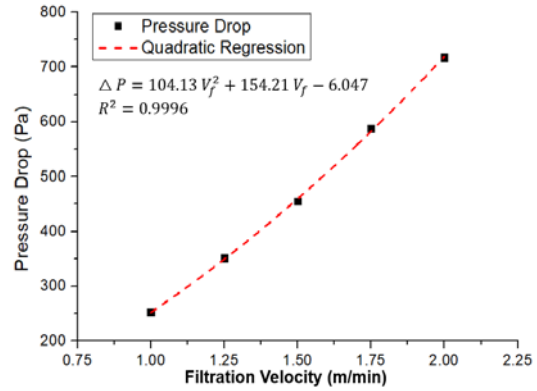


Fig. 21. Pressure drop regression analysis of guide vane system.

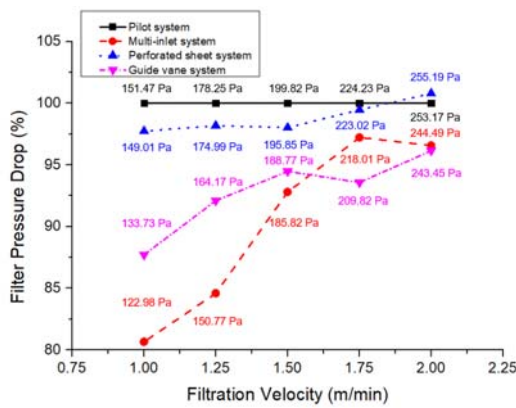


Fig. 22. Comparison of filter bag pressure drop by system types.

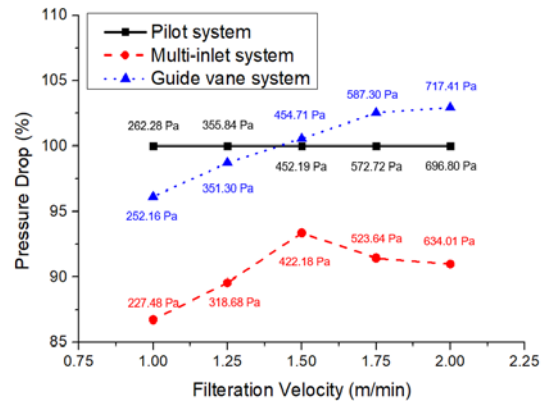


Fig. 23. Pressure drop comparison by system types.

1.75 m/min 이하 조건에서는 압력손실이 0.5 ~ 3% 정도 감소하나, 2.0 m/min 이상 조건에서는 오히려 1% 정도 증가하는 것으로 나타나는데, 이는 강한 난류발달로 인한 유체의 불균일 분포 때문으로 판단된다. 다중 입구 덕트 방식을 적용할 경우 여과포에서의 압력손실이 3.5 ~ 19%, 가이드 베인을 적용할 경우 4.8 ~ 12.3% 감소하여, 여과포의 교체비용을 효율적으로 감소시킬 수 있다.

Fig. 23에는 다공판을 제외한, 집진기 형상에 따른 압력손실 변화를 나타내었다. 다중 입구 덕트를 적용할 경우 기존 형상에 비해 전체 압력손실이 6.6 ~ 14.7% 정도 감소하며, 가이드 베인을 사용할 경우 여과 속도 1.5

m/min 이하 조건에서는 전체 압력손실이 2 ~ 13% 감소하고, 1.5 m/min 이상 조건에서는 0.5 ~ 3% 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

여과집진기의 운전조건을 최적화하고, 집진기 형상과 여과속도 변화에 따른 압력손실을 예측하기 위해 수치해석 시뮬레이션을 활용, pilot 충격기류식 여과집진설비와 다중 입구 방식, 다공판, 가이드 베인이 적용된 집진설비의 내부 유동해석을 수행하였다. 기존 집진설비의 경우 집진기 입구 속도가 19 m/sec 이상으로 빨라, 여과포로

유입되기 전에 집진기 벽면에 강하게 충돌하고 호퍼 방향으로 강한 와류를 형성하여 분진의 재비산이 발생하며, 가스가 여과포 전체로 고루 분배되지 않아 압력손실이 높게 형성됨을 알 수 있었다.

다중 입구 덕트 방식은 동일한 에너지를 가진 유체를 충돌시켜 흐름속도를 줄이고 유량을 여과포에 고루 분배시켜 기존 형상의 집진기보다 6.6 ~ 14.7% 정도 압력손실을 감소시킬 수 있을 것으로 예측되었고, 호퍼 방향으로의 와류속도도 25 ~ 30% 줄일 수 있을 것으로 예측되어 분진 재비산도 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 여과포에서의 압력손실을 3.5 ~ 19% 줄여 여과포 교체 비용이 절감되나 입구 덕트 형상 변화로 인해 추가적인 압력손실과 비용이 발생할 것으로 판단된다.

다공판을 적용할 경우에는 강한 난류의 발달로 기존 형상 대비 15배 이상의 압력손실이 발생하여 적용은 불가능할 것으로 나타났다.

가이드 베인은 깃 구조가 매우 간단하고, 기존 집진기에 쉽게 적용이 가능하며, 적은 압력 손실로도 와류를 차단하여 재비산의 방지, 흡진 가스의 균일한 분배가 가능한 것으로 나타났다. 효과적인 와류 차단과 가스 분배를 위한 가이드 베인의 최적 각도는 약 53° 이며, 가이드 베인을 적용할 경우 여과속도 1.5 m/min 이하 조건에서는 총 압력손실이 2 ~ 13% 정도 감소되었으며, 특히 여과포에서 압력손실을 4.8 ~ 12.3% 줄일 수 있어 여과포 교체비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 1.5 m/min 이상의 여과속도에서는 0.5 ~ 3% 정도로 압력손실이 다소 증가하여 적용하지 않는 것이 좋을 것으로 사료된다.

본 연구는 기존의 충격기류식 여과집진기 실험 결과를 토대로 집진기내부 유동 해석 및 여러 조건에서 집진기의 압력손실 및 유체 흐름을 예측하였으며, 향후 다양한 설계조건에서 추가 실험을 통하여 여과집진기의 압력손실 최소화를 위한 추가적인 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 기본 연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Anderson, B. O., Nielsen, N. F., Walther, J. H., 2016, Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters, *Powder Technol.*, 291(1), 284-298.
- ANSYS Inc, 2009, ANSYS Fluent Technical guide - Governing equations, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node377>.
- ANSYS Inc, 2009, ANSYS Fluent Technical guide - Porous media conditions, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node233>.
- Burton, C. L., Smith, D. A., 1975, Precipitator gas flow distribution, *JAPCA*, 25(2), 139-143.
- Federico, S., Giorgia, T., Roberto, M., Eleonora, B., Nicola, M., Mattia, A., 2017, CFD model validation of a bag filter for air filtration in a milling plant, *International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference*, Giorgia Tagliavini, Barcelona, 1-10.
- Gabites, J. R., Abrahamson, J., Winchester, J. A., 2008, Design of baghouses for fines collection in milk powder plants, *Powder Technol.*, 187(1), 46-52.
- Jan, S., Petr, K., 2012, Numerical simulation of large fabric filter, *Proceedings of EPJ Web of conference*, EDP Sciences, Les Ulis, 1-5.
- Li, M. L., Shin, C. H., Da, R. C., David, Y. H., 2010, Numerical study of pleated fabric cartridges during pulse-jet cleaning, *Powder Technol.*, 198(1), 75-81.
- Liu, D. H. F., Liptak, B. G., 1997, *Environmental Engineers' Handbook : Air pollution*, 2nd ed., Lewis Publishers (CRC Press), Boston, 344-349.
- Mahesh, J., 2019, Parametric study and analysis of air filter, *AJCT*, 5(1), 1-9.
- Ministry of Environment, 2018, <http://www.me.go.kr/>.
- Rui, Z., Henggen, S., Meili, Z., 2012, Simulation studies on protector of pulse-jet cleaning filter bag, *Energy Procedia*, 16(1), 426-431.
- Ryu, J. Y., Suh, J. M., Park, J. H., Jeon, B. K., Choi, K. C., Son, Y. I., 2007, Study on filter drag due to the change of operation conditions in a pulse air jet-type bag filter[I], *JESI*, 16(4), 449-458.
- Sahin, B., Ward, A. J., 1987, The use of perforated plates to control the flow emerging from wide-angle diffuser, with application to electrostatic precipitator design, *IJHFF*, 8(2), 124-131.
- Suh, J. M., Park, J. H., Lim, W. T., 2011, The prediction of

- injection distance for the minimization of the pressure drop by empirical static model in a pulse air jet bag filter, *JESI*, 20(1), 25-34.
- Suh, J. M., Park, J. H., Lim, W. T., Kang, J. S., Cho, J. H., 2012, The prediction of optimal pulse pressure drop by empirical static model in a pulsejet bag filter, *JESI*, 21(5), 613-622.
- Vladimir, B., David, J., Pavel, L., Pavel, S., Jiri, G., Petr, S., 2016, The treatment of waste gas from fertilizer – an industrial case study of long term removing particulate matter with a pilot unit, *Powder technology*, 297(1), 374-383.
- Xavier, S., Denis, B., Sandrine, C., Donimique, T., Roland, R., 2010, Consequences of high transitory airflows generated by segmented pulse-jet cleaning of dust collector filter bags, *Powder Technol.*, 201(1), 27-48.
- Zhiqiang, Z., Zhao, Z., Wei, Z., Qingyan, C., 2007, Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1-summary of prevalent turbulence models, *HAVC and R Research*, 13(6), 853-870.
-
- Professor. Jeong-Min Suh
Department of Bio Environmental Energy, Pusan National University
suhjm@pusan.ac.kr
 - Assistant Professor. Eun-Sang Jung
Department of Bio Environmental Energy, Pusan National University
esjung@pusan.ac.kr
 - Doctor's course. Kyeong-Min Jang
Department of Bio Environmental Energy, Pusan National University
kmjang3303@gmail.com