

충격기류식 여과집진기에서 경험모델을 이용한 최소압력손실의 분사거리 예측

서정민 · 박정호^{1)*} · 임우택²⁾

부산대학교 지역환경시스템공학과, ¹⁾진주산업대학교 환경공학과, ²⁾안동대학교 응용화학과
(2010년 8월 23일 접수; 2010년 11월 2일 수정; 2010년 11월 25일 채택)

The Prediction of Injection Distances for the Minimization of the Pressure Drop by Empirical Static Model in a Pulse Air Jet Bag Filter

Jeong-Min Suh, Jeong-Ho Park^{1)*}, Woo-Taik Lim²⁾

Department of Regional Environmental System Engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

²⁾Department of Applied Chemistry, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Manuscript received 23 August, 2010; revised 2 November, 2010; accepted 25 November, 2010)

Abstract

The new empirical static model was constructed on the basis of dimension analysis to predict the pressure drop according to the operating conditions. The empirical static model consists of the initial pressure drop term ($\Delta P_{initial}$) and the dust mass number term ($N_{dust} = \frac{w_0 v_f}{P_{pdsc} t}$), and two parameters (dust deposit resistance and exponent of dust mass number) have been estimated from experimental data. The optimum injection distance was identified in the 64 experimental data at the fixed filtration velocity and pulse pressure. The dust deposit resistance (K_d), one of the empirical static model parameters got the minimum value at $d = 0.11m$, at which the total pressure drop was minimized. The exponent of dust mass number was interpreted as the elasticity of pressure drop to the dust mass number. The elasticity of the unimodal behavior had also a maximum value at $d = 0.11m$, at which the pressure drop increased most rapidly with the dust mass number. Additionally, the correlation coefficient for the new empirical static model was 0.914.

Key Words : Pulse air jet bag filter, Initial pressure drop, Coke dust, Dimension analysis, Injection distance

1. 서론

충격 기류식 여과집진기는 산업현장에서 발생하는 입자상 오염물질을 처리하는 가장 일반적인 방법이다

(Allen 등, 1999; Dean과 Cushing, 1988; Ellenbecker과 Leith, 1980). 원심력 집진기에서 제거되지 않는 미세입자를 처리하기 위해서 여과집진기를 사용하여왔다 (Gabites 등, 2008). 여과집진기의 처리용량은 수 m³/hr에서 1,000,000 m³/hr정도이며 흡진 가스 중의 농도로서는 1 g/m³ 이하에서 100 g/m³까지의 다양한 농도범위에서도 이용될 수 있다. 또한, 집진처리 후 배출 농도는 미세입자라 할지라도 5 mg/m³이하로 달성 할

*Corresponding author : Jeong-Ho Park, Department of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea
Phone: +82-55-751-3345
E-mail: jhpark@jinju.ac.kr

수 있으나, 여과집진기의 성능은 집진장치 본체의 구조, 유입가스의 유체흐름 분포, 여과포의 특성, 함진 가스 성분 및 온도와 압력 그리고 분진의 물리·화학적 특성에 의해 결정된다(Peukert와 Wadenpohl, 2001).

함진 가스는 여과포를 통과하면서 여과포 외면에 부착되어지고 이에 부착 분진에 의해 여과포의 압력 손실을 증가하게 됨에 따라 주기적인 탈진이 요구된다. 분진 탈진 시스템은 여과포 내부로 높은 분리력이 있는 충격력이 필요하다. 탈진시스템은 짧은 시간(50~150 ms)에 높은 압력(3~7 bar)의 분사 공기가 필요하다(Simon 등, 2007).

여과포에 부착된 분진을 제거하기 위한 탈진 압축 공기는 노즐에서 분출되어 여과포에 도달하는데, 일반적으로 2차 공기를 압축공기와 함께 투입하기 위해 벤츄리를 사용하게 된다. 노즐직경, 벤츄리 형상, 노즐과 벤츄리까지의 거리 등은 압력손실에 변화를 준다(Tsai 등, 2000).

탈진시스템은 가스흐름이 있는 상태에서 탈진하는 on-line 방식과 가스흐름이 차단된 상태에서 탈진하는 off-line 방식이 있다(Dean과 Cushing, 1988). 여과집진기의 설계는 공급자와 사용자의 경험에 의존하는 경우가 많은데, 이는 여과속도를 비롯한 설계인자를 산업현장의 복잡한 운전에서는 이론적으로 해석하기가 힘들기 때문이다(Peukert와 Wadenpohl, 2001).

여과집진기의 주요 설계 및 운전인자는 여과속도와 압력손실이다. 여과포 자체의 압력손실과 여과포에 부착된 분진에 의한 압력손실 증가는 에너지소비를 증가시키는 주요원인이다(Simon 등, 2007). 여과속도는 집진장치의 크기와 여과포 수량을 결정하므로 투자비를 결정하는 요소가 된다. 높은 여과속도는 적은 여과면적이 필요하므로 투자비는 적게 소요되지만, 높은 압력손실이 발생하여 전력비와 여과포 교체 비용 등이 증가하게 된다(Liu와 Liptak, 1997). 여과집진장치에서 압력손실변화는 분사 노즐 직경, 분사거리, 탈진압력, 탈진간격, 여과속도, 입구분진농도 및 분진의 물리·화학적 특성 등의 여러 인자에 영향을 받는다(Hsin-Chung과 Tsai, 1996; Koehler와 Leith, 1983; Leith와 Ellenbecker, 1980; Liu와 Liptak, 1997; Peukert와 Wadenpohl, 2001; Simon 등, 2007; Tsai 등,

2000;). 이에 이러한 설계인자의 영향과 운전조건의 변화에 따른 압력손실을 석회석분진(Hindy 등, 1987; Hsin-Chung과 Tsai, 1996; Koehler와 Leith, 1983), fly ash(Dean과 Cushing, 1988; Ellenbecker와 Leith, 1980; Koehler와 Leith, 1983; Park 등, 2003; Tsai 등, 2000), 알루미늄분진(Calle 등, 2002; Simon 등, 2007) 그리고 밀크 파우더분진(Gabites 등, 2008)을 사용하여 연구가 진행되어진 바 있다. 운전조건의 변화에 따른 압력손실을 예측하기 위한 정적인 모델(Koehler와 Leith, 1983; Leith와 Ellenbecker, 1980)과 동적인 모델(Doring 등, 2009; Ju 등, 2001)이 개발되어 왔다. 그러나 제철소에서 주로 발생하는 Coke 분진을 이용한 연구는 진행된 바가 없었다.

따라서 본 연구는 pilot 설비를 이용하여 제철소 coke분진으로 여과 속도, 탈진압력, 탈진간격 분진농도 등 다양한 운전조건에서 압력손실을 예측 비교하고자 하였다. 특히 본 연구에서는 주요 운전조건인 탈진압력을 변화시키면서 설계조건인 여과속도, 입구농도를 변화시켜 압력손실이 최소화되는 최적의 분사거리 및 적정 탈진압력 설정으로 총 압력손실을 제어할 수 있는 인자를 파악하고 충격기류식 여과집진기의 효율적인 운전조건과 경제적인 설계 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험용 먼지는 P 제철소 coke 공장의 여과집진장치에서 포집된 것을 사용하였으며, 입자의 범위는 $0 \mu\text{m} < d_p \leq 300 \mu\text{m}$ 이고, 평균입경은 $57.33 \mu\text{m}$, 진비중이 1.78이다. 분진은 C, SiO₂, Al₂O₃, CaO 그리고 T-Fe성분이 90%이상을 함유하고 있으며 Table 1에 성분분석 및 특성을 나타내었다.

Table 1. Characteristics and ultimate analysis of coke dust

| Characteristics | | Value | | | | |
|-----------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|--------|-------|
| Particle mean diameter ($d_{p,mean}$, m) | | 58.9 | | | | |
| Standard deviation of diameter (σ_p , m) | | 13.2 | | | | |
| True density of particle (ρ_p , kg/m ³) | | 1,780 | | | | |
| Ultimate analysis of coke dust (%) | | | | | | |
| C | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | T-Fe | Others | Total |
| 78.60 | 6.56 | 2.74 | 1.45 | 0.95 | 9.70 | 100 |

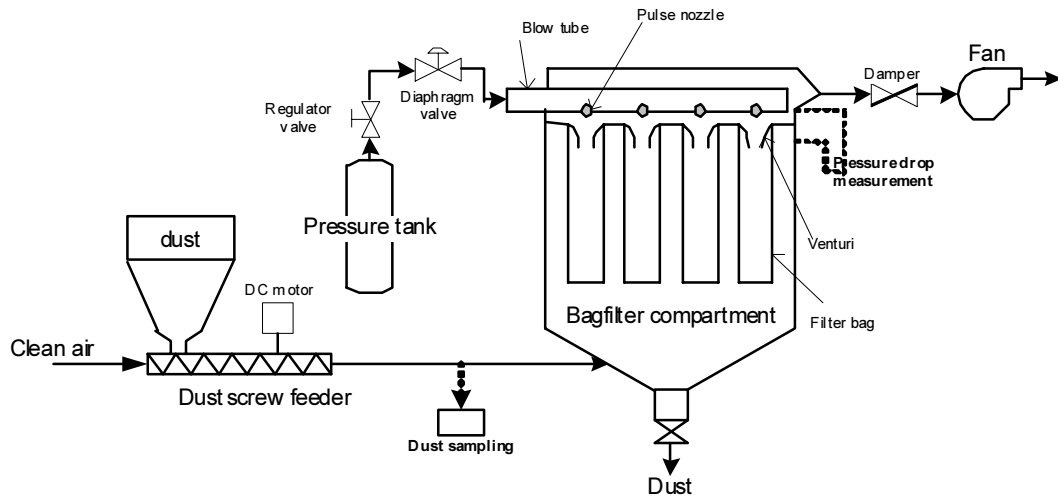


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

2.2. 실험장치

본 실험에 사용된 집진기는 충격기류식 여과집진기로서 분진발생장치, 탈진장치, 여과집진장치 및 흡입식 송풍기로 구성되어 있으며 전체공정도를 Fig. 1에 나타내었다(Jang, 2007; Kim, 2004).

2.2.1. 분진발생장치

일정량의 분진을 여과집진기 내로 주입하기 위해 일정속도를 변화시켜 분진량을 조절하는 소형 screw dust feeding 방식을 사용하였으며, 분진공급률은 0.5 ~ 3 g/m³로 입구 분진농도를 조절하여 주입하였다.

2.2.2. 탈진장치

충격기류식 여과집진기의 탈진장치는 blow tube가 여과포 1열마다 배열되어 있으며 blow tube의 하면에는 여과포 중심이 되는 위치에 Jet 노즐이 있다. Compressor에서 공급되어진 압축공기를 air regulator로 압력 (3~6 kg/cm²)을 조절하며, pulse timer의 신호에 의해 diaphragm valve가 작동함으로써 압축공기를 blow tube pipe로 통해 순간적 (약 0.1 sec)으로 압축공기가 분사되어 여과포를 탈진한다.

2.2.3. 여과포

실험에 사용된 여과포는 실제 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있는 폴리에스테르 여과포로서 크기는 Ø140

× 850 ℓ이다. 여과집진장치 본체는 4개의 diaphragm valve가 설치되어 있으며, 1개의 D/V당 4개의 여과포가 설치되어 총 16개의 여과포로 구성되어 여과면적은 약 6 m²으로, Table 2에서 여과포의 물리적 성질을 나타내었다.

Table 2. Characteristics of polyester felt without surface treatment

| Specification | Value |
|------------------------------------------------------|-------|
| Area weight (kg/m ²) | 0.564 |
| Felt thickness (mm) | 2.34 |
| Breaking strength (kgf) | 169.5 |
| Air permeability (m ³ /m ² /s) | 0.166 |

2.3. 실험방법

본 실험에 측정할 항목은 dust 부하에 대한 압력손실, 탈진효율 및 포집효율을 측정하였으며 이에 대한 조건들은 다음과 같다.

2.3.1. 분진농도 측정

실험용 먼지는 건조기 (convecting oven)에서 110℃로 12시간 동안 가열건조 후 상온건조기 (desiccator)에서 실험실의 온도와 같도록 24시간 냉각하여 사용하였다. 먼지농도는 Stack Sampler (Model CE-22-ADS, Ltd. USA)로 등속 흡입하여 농도를 측정하였다.

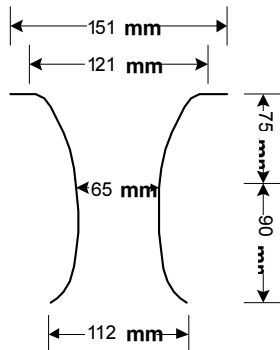


Fig. 2. Venturi geometry used in this study.

2.3.2. Pulsing 압력 및 탈진주기

압축공기는 압력계를 사용하여 $3 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ 으로 설정하고 pulse 분사시간은 전자식 timer에 의해 on time (0.1 msec)으로 조절하여 사용했다. 탈진간격 및 탈진주기도 실험조건에 따라 solenoid valve로 자동 조절하였다.

여과포는 한 조건의 실험이 끝날 때마다 새로운 여과포로 교체하였으며, 실험조건은 Table 3에 나타났다.

2.3.3. 압력손실 측정

여과집진기의 압력손실 측정은 측정 오차를 줄이기 위해 집진기본체 상하부에 압력계(Dwyer, USA)와 수주마노미터를 동시에 사용하여 측정하였다. 압력손실은 탈진 시 높은 공기압력의 영향으로 순간적으로 하강한 후 1초 이내에 안정된 측정값을 사용하였다.

압력손실은 운전초기에 여과포의 초층 형성으로 직선적으로 빠르게 증가하고 일정한 탈진주기($\Delta t/t$,

Δt =탈진간격, t =운전시간)후에는 분진저항계수에 의해서 압력손실이 천천히 상승한다. 따라서 초층형성 후에 측정된 압력손실값을 사용해야한다(Strangert, 1978). Hindy는 30~80cycle에서 초층형성이 완료되는 것을 확인하였다(Hindy 등, 1987). 본연구에서는 210분(탈진주기 150~400 cycle)동안 운전후의 압력손실값을 사용하였다.

3. 모델링

본 연구에서 처음 제안된 차원분석을 통한 정적경험모델을 사용하여 다양한 운전조건에서 충격기류식 여과집진기의 압력손실을 예측하였다.

3.1. 차원분석 경험모델 (Empirical static model by dimension analysis)

충격기류식 여과집진기의 총 압력손실 (ΔP_t)은 다음과 같이 여러 인자에 비례하여 결정 될 것이다.

$$\Delta P_t = f(D_{bag}, d, t, \Delta t, P_{pulse}, c_{\infty}, v_f, \rho_{air}, \mu_{air}) \quad (1)$$

여기서 D_{bag} 는 여과포 직경, t 는 운전시간, ρ_{air} 는 실온에서의 공기밀도 그리고 μ_{air} 는 공기 점성계수 ($\mu_{air} = 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/m/s}$)이다. 만약 각 항목 인자가 5개의 데이터가 필요하다면 1×10^{10} 번의 실험을 하여야 할 것이다. 하지만 차원분석은 차원 동일성 원리로 실험횟수를 줄일 수 있다.

Table 3. Design specifications and operating conditions

| Design specifications | | | |
|-----------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Bagfilter diameter (D_{bag} , m) | 0.14 | Number of bags | 16 |
| Bagfilter length (L_{bag} , m) | 0.85 | Pulse nozzle diameter (m) | 0.01 |
| Total filter area (A_{total} , m^2) | 5.98 | Venturi throat diameter (D_v , m) | 0.065 |
| Operating conditions | | | |
| Filtration velocity (v_f , m/min) | 1.5 | Injection distance (d, m) | 0.05, 0.08, 0.11, 0.135, and 0.16 |
| Inlet dust concentration (c_m , g/m^3) | 0.5, 1.0, 2.0, and 3.0 | Pulse duration (s) | 0.1 |
| Pulse pressure (P_{pulse} , kPa) | 294, 490, and 588 | Operating time (t, min) | 210 |
| Pulse interval (t, s) | 30 | | |

Hauke가 제안한 이론적 차원분석에 의하면(Hauke, 2008), 레이놀드 수 ($N_{Re} = \frac{\rho_{air} v_f D_{bag}}{\mu_{air}}$), 프르드 수 ($N_{Fr} = \frac{c_{\infty} v_f^2 / L_{bag}}{c_{\infty} g} = \frac{v_f^2}{g L_{bag}}$), 분진 질량 수 ($N_{dust} = \frac{w_0 v_f}{P_{pulse} t}$), 사이클 수 ($= \frac{t}{\Delta t}$)가 중요한 인자로 필요하다. 레이놀드 수(Reynolds number)는 점성력에 대한 관성력의 비율, 분진 질량 수(dust mass number, N_{dust})는 분진부착력에 대한 펄스압력의 비율, 그리고 프르드 수(Froude number)는 관성력과 중력의 비율로 중력이 유체의 운동에 미치는 영향을 나타내기 위해 사용하는 무차원의 수이다. 안정 상태나 시간변화가 없을 때는 사이클 시간을 고려 할 필요가 없다. 본 연구에서는 입자가 미세하여 분진의 중력을 무시하였으므로 F수를 고려하지 않았다. 분진 압력손실 (ΔP_d)은 여과속도 (v_f)와 여과포에 부착된 분진량인 면적분진밀도 (areal dust density, w_0)로 표시 할 수 있으므로

$$\Delta P_d = K_2 v_f w_0 \quad (2)$$

분진 면적밀도 (areal dust density)는

$$w_0 = c_{\infty} v_f \Delta t \quad (3)$$

여기서 c_{∞} 는 입구분진농도, t 는 분사간격 (pulse interval time)이다.

따라서 차원분석 정적 경험 모델식의 총 압력손실 (ΔP_t^{empi})은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\Delta P_t^{empi} = K_f N_{Re} + K_d N_{dust}^a + K_v N_{Re}^2 \quad (4)$$

여기서 K_f 는 청정 여과포의 압력손실, K_d 는 여과포에 부착된 분진의 압력손실계수, K_v 는 벤츄리의 압력손실계수이고 a 는 N_{dust} 의 지수이다. 식 (4)에서 첫 번째 및 세 번째 항목은 분진이 투입되기 전에는 청정 여과포와 벤츄리에 의해 발생하는 압력손실을 초기 압력손실로 정의 할 수 있고, 초기 압력손실 ($\Delta P_{initial}$)은 유체흐름에 의해 결정되어진다 (Doring 등, 2009). 식

(4)를 Reynolds number ($\Delta P_{initial}(N_{Re})$)를 이용하여 표시하면 다음과 같다.

$$\Delta P_t^{empi} = \Delta P_{initial}(N_{Re}) + K_d N_{dust}^a \quad (5)$$

따라서 정적인 경험모델은 2가지 인자 (K_d, a)로 압력손실을 예측하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 초기 압력손실 (Initial pressure drop)

초기 압력손실 ($\Delta P_{initial}$)은 청정 여과포와 벤츄리에 의한 압력손실 뿐만 아니라 집진장치 내부구조에 의한 유체역학적인 압력손실도 포함된다. 초기 압력손실은 분진 투입전인 $v_f = 0.025 \text{ m/s}$ 에서 측정된 실험값으로 결정하였으면 측정된 초기 압력손실은 206 Pa를 나타냈다. 본 연구에서 레이놀드수의 범위는 $150 < N_{Re} < 400$ 이다.

일반적으로 여과집진기에서 압력손실은 가스속도의 제곱에 비례한다(Liu와 Liptak, 1997). 여과포는 높은 여과속도에 압착되어지지만(Ellenbecker와 Leith, 1980), 가스속도는 집진장치의 복잡한 구조와 유체흐름으로 가스 속도를 여과속도로 표현하는 것은 적절하지 않다.

여과집진장치에서 설계된 여과속도보다 높게 운전되었을 때는 여과포에 분진의 재부착(redeposition)으로 압력손실은 지수적으로 증가한다고 Ellenbecker와 Leith (Ellenbecker와 Leith, 1980)에 의해 규명되었다.

4.2. 분진 질량 수 (Dust mass numbers)에 대한 압력손실 영향

본 연구에서 제안된 경험 모델의 식 (5)을 분진질량 수 ($N_{dust} = \frac{w_0 v_f}{P_{pulse} t}$)로 표현하여 ln을 취하면

$$\ln(\Delta P_t^{exp} - \Delta P_{initial}) = \ln(K_d N_{dust}^a) \quad (6)$$

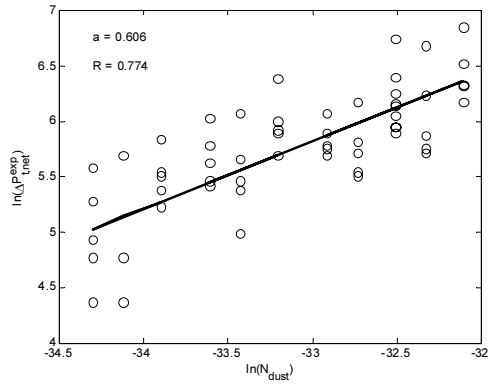
$\Delta P_t^{exp} - \Delta P_{initial}$ 는 여러 운전 조건에서 증가된 측정 압력손실 ($\Delta P_{t, \neq t}^{exp}$)로 나타낼 수 있다.

$$\ln \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}} = \ln K_d + a \ln N_{\text{dust}} \quad (7)$$

만약 측정 압력손실 ($\Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}$)이 분진 질량 수 (N_{dust})와 단순한 관계를 가지면 기울기 a 를 $\ln \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}$ 와 $\ln N_{\text{dust}}$ 그래프에서 얻을 수 있다.

로그함수의 기울기를 탄성도 (elasticity)라고 하는데, 정규화 된 민감도를 의미한다.

$$a = \frac{d \ln \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}}{d \ln N_{\text{dust}}} = \frac{d \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}}{d N_{\text{dust}}} \cdot \frac{N_{\text{dust}}}{\Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}} \quad (8)$$



(a) $\ln \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}$ with respect to $\ln N_{\text{dust}}$

Fig. 3. Dependency of logarithmic net experimental pressure drop on (a) logarithmic dust number and (b) logarithmic distance number.

Fig. 3은 $v_f=1.5$ m/min와 $P_{\text{pulse}}=4,5,6$ kg_f/cm²에서 $\ln \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}$ 와 $\ln N_{\text{dust}}$ 의 연관성을 나타냈다. 여과포에 분진 질량 ()이 증가하게 되면 압력손실이 증가하므로 $\ln \Delta P_{t, \neq t}^{\text{exp}}$ 는 $\ln N_{\text{dust}}$ 와 같이 증가하는데 상관계수는 0.774로 나타났다. 경험 모델식 (5)을 K_d 에 대해 N_{dust} 의 식으로 표현하면

$$\Delta P_t^{\text{empi}} = \Delta P_{\text{initial}}(N_{Re}) + K_d (1 \times 10^{14} N_{\text{dust}})^a \quad (9)$$

여기서 분진 질량 수 (N_{dust})는 항목간 격차를 맞추기 위해 인위적인 값 (1×10^{14})으로 조정하였고, K_d 와 a 는 각각의 분사거리에서 구해졌다.

4.3. 모델 검증

$v_f=1.5$ m/min, $\Delta t=30$ s, 0.5 g/m³ $\leq c_e \leq 3.0$ g/m³, $P_{\text{pulse}}=4,5,6$ kg_f/cm² 그리고 0.05 m $\leq d \leq 0.16$ m범위에서 60개의 실험 데이터로 검증되었다. 이러한 실험은 적정 여과속도와 탈진간격을 고정시키고 노즐에서 벤츨리까지의 최적의 분사거리와 적정 탈진압력을 설정하기 위해서 실시하였다. 경험모델식 (9)로 각 분사거리에서 두 가지 인자 (K_d and a)로 예측하였다. 이러한 모델인자들을 예측하기 위해 실험데이터 (ΔP_t^{exp})와 모델 예측값 ($\Delta P_t^{\text{model}}$)을 제곱 오차합 (sum square error)로 최소화시켰다.

$$\text{Min error}_{K_d, a} = \sum_{i=1}^{16} (\Delta P_{t,i}^{\text{exp}} - \Delta P_{t,i}^{\text{empi}})^2 \quad (10)$$

Table 4에 각 분사거리에 따른 K_d 와 a 의 결과를 나타내었고, Fig. 4은 두 가지 인자 (K_d 와 a)를 분사거리에 따른 상관관계를 나타내었는데, 경험모델의 2가지 인자로 최적의 분사거리를 해석 할 수 있었다. 분진 저항계수 (K_d)는 $d=0.11$ m에서 최적의 저항값을 나타냈고, 분사거리 0.08 m ≤ 0.135 m ≤ 0.16 m ≤ 0.05 m의 순으로 나타났다. 이는 적정 분사거리보다 가까우면 벤츨리를 통한 2차공기량이 감소되어 압력손실이 증가하고, 또한 적정분사거리보다 길어도 여과포에 도달하는 탈진압력이 낮아지기 때문에 압력손실이 증가하는 것으로 판단된다. $d=0.11$ m에서 여과포 표면에 부착된 분진이 효율적으로 탈진되는 최대의 탈진압력이었다(Hsin-Chung과 Tsai, 1996). 분진 수에 대한 압력손실의 탄성도 (elasticity, a)는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 분진은 최적의 분사거리에서 효율적으로 제거되지만, 압력손실은 면적분진밀도(부하량)에 따라 달라 질 것이다.

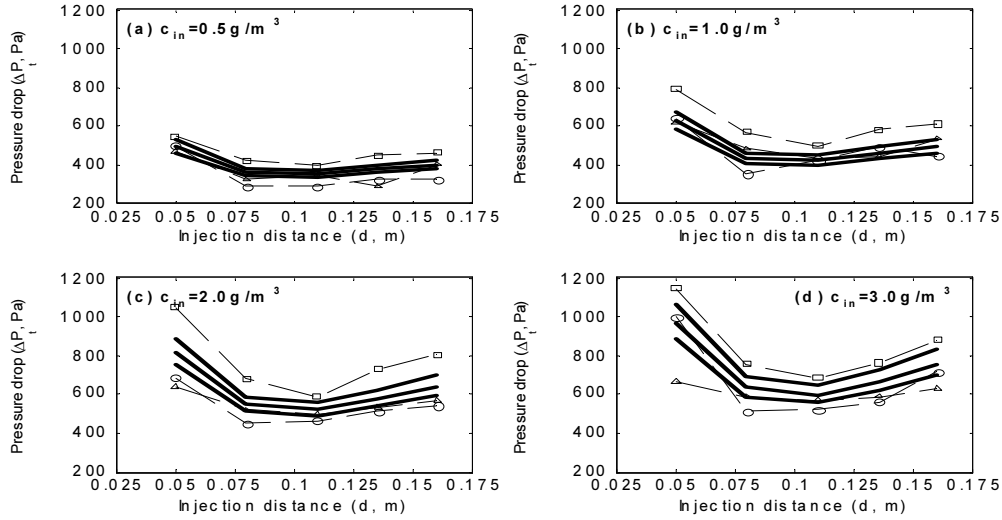


Fig. 4. Comparison of experimental pressure drop (ΔP_t^{exp}) with empirical model (ΔP_t^{empi}) as a function of injection distance at $v_f = 1.5 \text{ m/min}$ and $\Delta t = 30 \text{ s}$ (\square : $P_{pulse} = 4 \text{ kgf/cm}^2$, \circ : $P_{pulse} = 5 \text{ kgf/cm}^2$, \triangle : $P_{pulse} = 6 \text{ kgf/cm}^2$, and --- : model predictions).

Table 4. Model parameters estimated from experimental data

| | K_d (Pa) | a | R |
|-------------------------|------------|-------|-------|
| $d_1 = 0.05 \text{ m}$ | 798.1 | 0.548 | 0.914 |
| $d_2 = 0.08 \text{ m}$ | 452.2 | 0.585 | |
| $d_3 = 0.11 \text{ m}$ | 409.9 | 0.542 | |
| $d_4 = 0.135 \text{ m}$ | 483.9 | 0.552 | |
| $d_5 = 0.16 \text{ m}$ | 581.9 | 0.597 | |

Fig. 5는 경험모델에서 분사거리와 탈진압력에 따른 압력손실과 실험데이터와의 관계를 나타냈다. 두 가지 인자를 고려한 경험모델은 $d=0.11 \text{ m}$ 에서 최소의 압력손실을 나타냈고, 상관계수가 0.914로 좋은 결과를 얻었다.

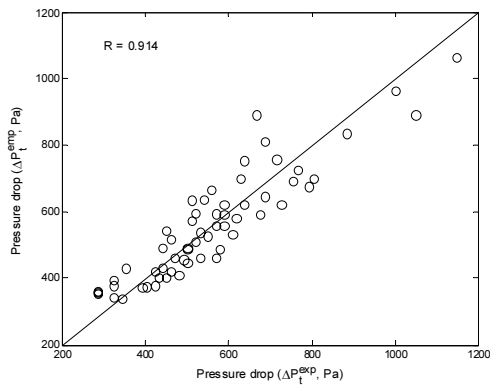


Fig. 5. Correlation plot between experimental pressure drop (ΔP_t^{exp}) and empirical model (ΔP_t^{empi}).

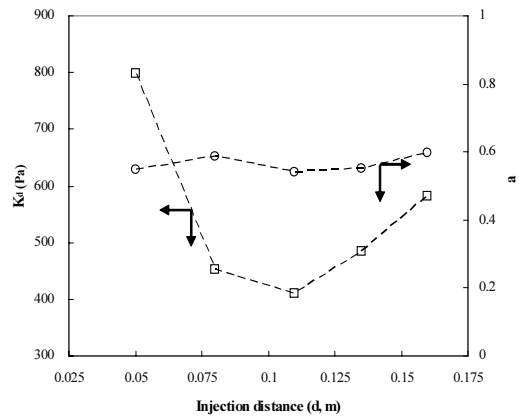


Fig. 6. Empirical static model parameters (K_d and a) as a function of injection distance (d).

Fig. 6은 분사거리와 탈진압력을 입구농도별로 나타내었는데, 실험 데이터는 $d=0.05$ m를 제외한 저농도 (0.5 g/m^3)에서는 탈진압력에 큰 변화가 없었으나, 농도가 높아질수록 탈진압력의 변화에 따라 압력손실의 변화가 심하게 나타났다. 이는 고농도일 때는 분진이 여과포에서 완전히 제거되지 않고 여과포에 재부착되기 때문인 것으로 판단된다. $P_{pulse} = 6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 에서는 분사거리 $d=0.05$ m를 제외하면 안정적인 압력손실을 나타냈으며, 최적의 분사거리에서 효율적으로 제거되지만, 압력손실은 면적분진밀도 (부하량)에 따라 달라지기 때문에 최소탈진압력은 $P_{pulse} = 5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 이상은 필요한 것으로 판단된다. 분진농도변화에 따른 압력손실을 분사거리별로 Fig. 7에 나타내었는데,

$d=0.11$ m에서 압력손실 증가율이 가장 낮게 나타나 최적의 분사거리임을 재확인 할 수 있었다. $d=0.11$ m에서 뿐 만아니라, $d=0.80$ m에서 분진 면적밀도를 줄이기 위한 $\Delta t=30$ s이하의 탈진간격으로 압력손실 증가율을 최소화하기 위한 추가적인 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

5. 결론

여과집진기의 설계 및 운전에서 가장 중요한 인자는 압력손실을 최소화하는 것이다. 본 연구에서는 여과면적 6 m^2 을 가진 pilot 설비를 이용하여 제철소 coke분진으로 다양한 운전조건(filtration velocity, inlet dust concentration, pulse pressure, pulse interval

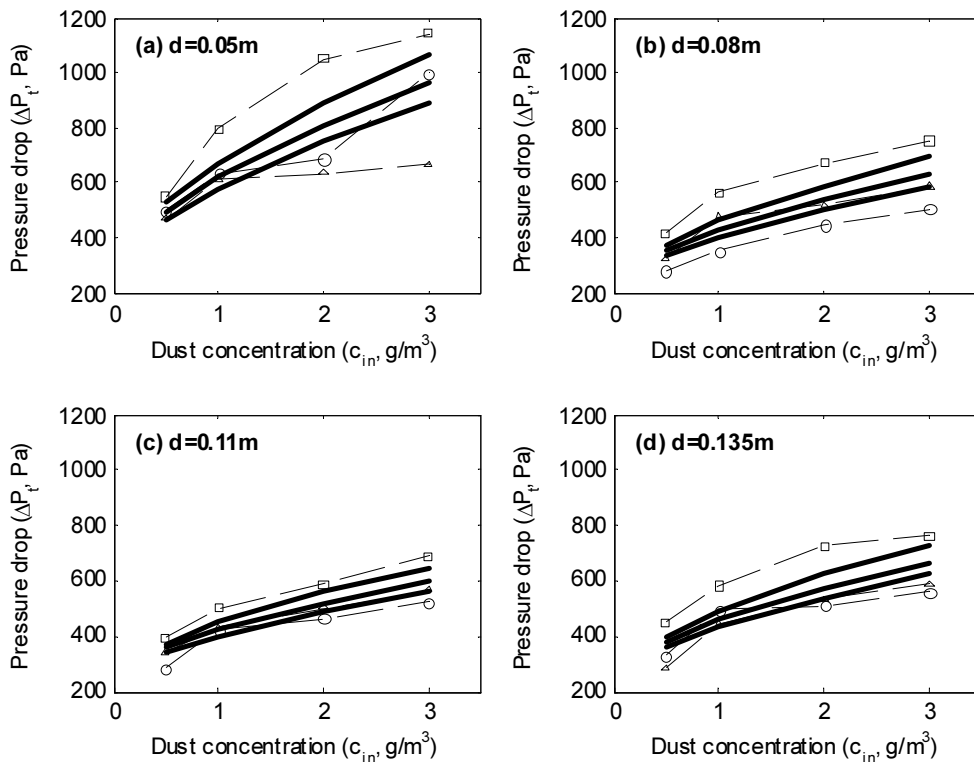


Fig. 7. Comparison of experimental pressure drop (ΔP_t^{exp}) with empirical model (ΔP_t^{empi}) as a function of the inlet dust concentration at $v_f = 1.5 \text{ m/min}$ and $\Delta t = 30 \text{ s}$ (\square : $P_{pulse} = 4 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, \circ : $P_{pulse} = 5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, \triangle : $P_{pulse} = 6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, and — : model predictions).

time, and injection distance)을 변화시키면서 압력손실을 측정하였고 차원분석 경험모델을 사용하여 운전 변화에 따른 예측 압력손실과 비교 검토하였다.

여과속도와 탈진압력이 고정된 60개의 데이터로 총 압력손실이 최소화되는 최적의 분사거리($d=0.11$ m)를 확인 할 수 있었다. 경험모델에서도 분진저항계수가 분사거리 110 mm에서 최소치를 나타내어 압력손실이 최소화될 수 있었다. 그러나 분진질량수의 지수 a 는 압력손실의 탄성력(elasticity)으로 압력손실 변화에는 큰 영향이 없는 것으로 확인되었다.

또한, 실험 데이터는 $d=0.05$ m를 제외한 저농도 (0.5 g/m³)에서는 탈진압력에 큰 변화가 없었으나, 농도가 높아질수록 탈진압력의 변화에 따라 압력손실의 변화가 심하게 나타났다. 이는 고농도일 때는 분진이 여과포에서 완전히 제거되지 않고 여과포에 재부착되기 때문인 것으로 판단된다. $P_{pulse} = 6$ kg_f/cm²에서는 분사거리 $d=0.05$ m를 제외하면 안정적인 압력손실을 나타냈으며, 압력손실은 면적분진밀도(부하량)에 따라 달라지기 때문에 최소탈진압력은 $P_{pulse} = 5$ kg_f/cm²이상은 필요 한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 차원분석 경험모델은 여과집진기의 압력손실을 예측 할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 광범위한 운전조건에서 성능예측의 개선을 위해서 탈진시 제거되지 않는 분진과 탈진후 분진의 재부착 그리고 운전시간변화 등이 고려된 모델이 필요 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 본 연구 모델링에 도움을 준 한경대학교 임영일교수와 실험용 coke분진을 공급해준 POSCO (Pohang Steel Company)에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

Allen, R. W. K., Goyder, H. G. D., Morris, K., 1999, Modelling media movement during cleaning of pulse-jet fabric filters, Chem. Eng. Res. Des., 77(3), 223-230.

Calle, S., Contal, P., Thomas, D., Bemer, D., Leclerc, D., 2002, Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles, Powder Technol., 128(2-3), 213-217.

Dean, A. H., Cushing, K. M., 1988, Survey on the use of pulse-jet fabric filters for coal-fired utility and industrial boilers, J. Air Pollut. Cont. Assoc., 38(1), 90-96.

Doring, N., Meyer, J., Kasper, G., 2009, The influence of cake residence time on the Table operation of a high-temperature gas filter, Chem. Eng. Sci., 64(10), 2483-2490.

Ellenbecker, M. J., Leith, D., 1980, The effect of dust retention on pressure drop in a high velocity pulse-jet fabric filter, Powder Technol., 25(2), 147-154.

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.

Hindy, K. T., Sievert, J., Loeffler, F., 1987, Influence of cloth structure on operational characteristics of pulse-jet cleaned filter bags, Environ. Int., 13(2), 175-181.

Hsin-Chung, L. U., Tsai, C. J., 1996, Numerical and experimental study of cleaning process of a pulse-jet fabric filtration system, Environ. Sci. Technol., 30(11), 3243-3249.

Hauke, G., 2008, An introduction to fluid mechanics and transport phenomena, 1st ed., Springer published., Spain, 157-186.

Ju, J., Chiu, M.-S., Tien, C., 2001, Further work on pulse-jet fabric filtration modeling, Powder Technol., 118(1-2), 79-89.

Jang, Y.-D., 2007, A study on the pressure drop variance of inlet concentration and face velocity in pulse-jet type bag filter, Master's thesis, Miryang National University, Miryang, Korea.

Koehler, J. L., Leith, D., 1983, Model calibration for pressure drop in a pulse-jet cleaned fabric filter, Atmos. Environ., 17(10), 1909-1913.

Kim, S.-T., 2004, A study on the pressure drop variance of pulse interval, injection distance in pulse air-jet type bag filter, Master's thesis, Miryang National University, Miryang, Korea.

- Leith, D., Ellenbecker, M. J., 1980, Theory for pressure drop in a pulse-jet cleaned fabric filter, *Atmos. Environ.*, 14(7), 845-852.
- Loeffler, F., Sievert, J., 1987, Cleaning mechanisms in pulse-jet fabric filters, *Filter. Sep.*, 24(2), 110-113.
- Liu, D. H. F., Liptak, B. G., 1997, Air pollution: Environmental Engineers' Handbook, 2nd ed., Lewis Publishers (CRC Press), 344-349.
- Peukert, W., Wadenpohl, C., 2001, Industrial separation of fine particles with difficult dust properties, *Powder Technol.*, 118(1-2), 136-148.
- Park, S. J., Choi, H. K., Park, Y. O., Son, J. E., 2003, Effects of a shroud tube on flow field and particle behavior inside a bag-filter vessel, *Aerosol Sci. Technol.*, 37(9), 685-693.
- Strangert, S., 1978, Predicting performance of bag filters, *Filter. Sep.*, 15(1), 42-48.
- Simon, X., Chazelet, S., Thomas, D., Bemer, D., Regnier, R., 2007, Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings, *Powder Technol.*, 172(2), 67-81.
- Tsai, C. J., Tsai, M. L., Lu, H. C., 2000, Effect of filtration velocity and filtration pressure drop on the bag-cleaning performance of a pulse-jet baghouse, *Sep. Sci. Technol.*, 35(2), 211-226.