Journal of Environmental Science International
23(12); 2045 ~2056; December 2014

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2014.23.12.2045

ORIGINAL ARTICLE

다중회귀모형을 이용한 벤츄리가 없는 충격기류식 여과집진장치 압력손실 예측

서정민 · 박정호[1)*] · 조재환[2)] · 진경호[3)] · 정문섭[4)] · 이병인 · 홍성철 · 시바쿠마르 · 최금찬[5)]

부산대학교 바이오환경에너지학과, [1)]경남과학기술대학교 환경공학과, [2)]부산대학교 농업경제학과,
[3)]부산대학교 생명산업융합연구원, [4)]부산대학교 바이오시스템공학과, [5)]동아대학교 환경공학과

Pressure Drop Predictions Using Multiple Regression Model in Pulse Jet Type Bag Filter Without Venturi

Jeong-Min Suh, Jeong-Ho Park[1)], Jae-Hwan Cho[2)], Kyung-Ho Jin[3)], Moon-Sub Jung[4)], Pyong-In Yi, Sung-Chul Hong, S. Sivakumar, Kum-Chan Choi[5)]

Department of Bioenvironmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

[1)]Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Chinju 660-758, Korea

2)Department of Agricultural Economics, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

3)Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

4)Department of Biosystems Engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

5)Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

Abstract

In this study, pressure drop was measured in the pulse jet bag filter without venturi on which 16 numbers of filter bags (Ø140 × 850 ℓ) are installed according to operation condition(filtration velocity, inlet dust concentration, pulse pressure, and pulse interval) using coke dust from steel mill. The obtained 180 pressure drop test data were used to predict pressure drop with multiple regression model so that pressure drop data can be used for effective operation condition and as basic data for economical design.

The prediction results showed that when filtration velocity was increased by 1%, pressure drop was increased by 2.2% which indicated that filtration velocity among operation condition was attributed on the pressure drop the most. Pressure was dropped by 1.53% when pulse pressure was increased by 1% which also confirmed that pulse pressure was the major factor affecting on the pressure drop next to filtration velocity. Meanwhile, pressure drops were found increased by 0.3% and 0.37%, respectively when inlet dust concentration and pulse interval were increased by 1% implying that the effects of inlet dust concentration and pulse interval were less as compared with those changes of filtration velocity and pulse pressure. Therefore, the larger effect on the pressure drop the pulse jet bag filter was found in the order of filtration velocity(V_f), pulse pressure(P_p), inlet dust concentration(C_i), pulse interval(P_i).

Received 26 September, 2013; **Revised** 11 December, 2013;
Accepted 15 December, 2014
[*]**Corresponding author** : Jeong-Ho Park, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Chinju 660-758, Korea
Phone: +82-55-751-3345
E-mail: jhpark@gntech.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.

Also, the prediction result of filtration velocity, inlet dust concentration, pulse pressure, and pulse interval which showed the largest effect on the pressure drop indicated that stable operation can be executed with filtration velocity less than 1.5 m/min and inlet dust concentration less than 4 g/m^3. However, it was regarded that pulse pressure and pulse interval need to be adjusted when inlet dust concentration is higher than 4 g/m^3. When filtration velocity and pulse pressure were examined, operation was possible regardless of changes in pulse pressure if filtration velocity was at 1.5 m/min. If filtration velocity was increased to 2 m/min. operation would be possible only when pulse pressure was set at higher than 5.8 kgf/cm^2. Also, the prediction result of pressure drop with filtration velocity and pulse interval showed that operation with pulse interval less than 50 sec. should be carried out under filtration velocity at 1.5 m/min. While, pulse interval should be set at lower than 11 sec. if filtration velocity was set at 2 m/min.

Under the conditions of filtration velocity lower than 1 m/min and high pulse pressure higher than 7 kgf/cm^2, though pressure drop would be less, in this case, economic feasibility would be low due to increased in installation and operation cost since scale of dust collection equipment becomes larger and life of filtration bag becomes shortened due to high pulse pressure.

Key words : Pressure drop, Pulse jet type, Bag filter, Without venturi, Filtration velocity

1. 서 론

경제성장에 따른 공업화로 업종이 다양해지면서 대기오염 물질이 증가하고 있는 실정이며 그 종류 또한 다양해지고 있다. 특히, 대기 중에 배출되는 분진 등 부유하는 입자상 물질이 심각한 오염물질로 대두되고 있는 실정이다(Suh 등, 2010).

각 산업체에서는 대기오염방지시설의 교체 및 보완을 위한 저비용 고효율 집진장치의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 현재 각종 배출가스에 포함된 입자상 오염물질과 SOX, NOX, 휘발성유기화합물(VOC$_s$), 다이옥신 등의 기체상 오염물질을 규제치 이하로 낮추기 위한 많은 연구개발이 활발히 진행되고 있다(Park, 2004).

대기오염을 방지하기 위한 시설은 전기집진장치(Electrostatic precipitator)와 여과집진장치(Bag filter)가 산업분야에서 많이 사용되고 있다. 전기집진장치의 경우 압력손실이 적으며 대용량의 연소가스를 처리할 수 있다는 장점이 있으나 분진의 특성에 따른 전기 저항치 변화로 여과집진기는 전기집진기에 비해 상대적으로 압력손실이 높으나 초기투자 비용이 적고 입자상 물질의 전범위에 걸쳐서 집진효율이 높고, 운전이 편리하다는 장점이 있다(Hong 등, 2012; Hong, 2013).

일반적으로 산업분야에서 여과 집진장치가 훨씬 많이 사용되고 있는데, 이는 여과 집진 기술이 다른 집진방법에 비해 분진 부하 변동에 크게 영향을 받지 않고 운전 및 관리가 용이하며, 또한 미세입자에 대한 집진 효율이 매우 우수하기 때문이다(Lee 등, 2012).

여과집진장치는 원심력집진장치에서 제거되지 않는 미세입자를 처리하기 위해 사용되어 왔으며, 처리용량은 수 m^3/hr에서 1,000,000 m^3/hr정도이고 함진 가스 중의 농도로서는 1 g/m^3 이하에서 100 g/m^{3}까지의 다양한 농도범위에서도 이용될 수 있다. 또한, 집진처리 후 배출농도는 미세입자라도 5 mg/m^{3}이하로 낮출 수 있으며, 여과집진장치의 성능은 집진장치 본체의 구조, 유입가스의 유체흐름 분포, 여과포의 특성, 함진 가스성분 및 온도와 압력 그리고 분진의 물리·화학적 특성에 의해 결정된다(Peukert와 Wadenpohl, 2001; Gabites 등, 2008).

여과집진장치의 설계는 공급자와 사용자의 경험에 의존하는 경우가 많은 이유는 여과속도를 비롯한 설계인자를 산업현장의 복잡한 운전에서는 이론적으로 해석하기가 힘들기 때문이다(Peukert와 Wadenpohl, 2001).

여과집진장치의 가장 중요한 설계 및 운전인자는 압력손실이다. 여과포 자체의 압력손실과 여과포에 부착된 분진에 의한 압력손실 증가는 전력비와 여과포 교체 비용 등의 에너지소비를 증가시키는 주요원인이다(Simon 등, 2007). 여과집진장치에서 압력손실변화는 분사 노즐 직경, 분사거리, 탈진압력, 탈진간격, 여과속도, 입구분진농도 및 분진의 물리 · 화학적 특성 등의 여러 인자에 영향을 받는다(Leith와 Ellenbecker, 1980; Koehler와 Leith, 1983; Hsin-Chung과 Tsai, 1996; Liu와 Liptak, 1997; Tsai 등, 2000; Peukert와 Wadenpohl, 2001; Simon 등, 2007).

이러한 설계인자의 영향과 운전조건의 변화에 따른 압력손실을 석회석분진(Koehler과 Leith, 1983; Hindy

등, 1987; Hsin-Chung과 Tsai, 1996), fly ash(Ellenbecker와 Leith, 1980; Koehler과 Leith, 1983; Dean과 Cushing, 1988; Tsai 등, 2000; Park 등, 2003), 알루미늄분진(Simon 등, 2007) 그리고 밀크파우더분진(Gabites 등, 2008)을 사용하여 연구가 진행되어진 바 있다. 운전조건의 변화에 따른 압력손실을 예측하기 위한 정적인 모델(Ellenbecker와 Leith, 1980; Koehler과 Leith, 1983)과 동적인 모델(Ju 등, 2001; Doring 등, 2009)이 개발되어 왔다. 또한 제철소에서 주로 발생하는 coke 분진을 이용하여 여과 속도, 탈진압력, 탈진간격, 분진농도 등 다양한 운전조건에 따른 로그 다 변수 선형회귀법(Multivariate Linear Regression, MLR) 등 을 통한 압력손실 예측에 대한 연구 또한 진행된바 있다.(Suh 등, 2011; Suh 등 2012)

또한, 여과포에 부착된 분진을 제거하기 위한 탈진 압축공기는 노즐에서 분출되어 여과포에 도달하는데, 일반적으로 2차 공기를 압축공기와 함께 투입하기 위해 벤츄리를 사용하게 되지만(Tsai 등, 2000), 국내 P제철소 등 대규모 여과집진설비에 벤츄리 설치 없이 운전 가동되고 있으나 이러한 벤츄리의 효율에 대한 검증은 진행된 바 없다.

따라서 본 연구는 다중회귀모형을 통해 여과 속도, 탈진압력, 탈진간격 및 입구분진농도 등의 운전조건에서 벤츄리가 없는 충격기류식 여과집진장치에서 여과속도 변화에 따른 압력손실변화를 계측하여 효율적인 운전조건과 경제적인 설계 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서는 pilot scale의 충격기류식 여과집진장치의 실험용 분진은 P제철소 coke공장의 여과집진장치에서 포집된 것을 사용하였으며, 평균입경은 57.33 ㎛이고, 진비중이 1.78이다. Table 1은 분진의 성분분석을 나타내었다.

2.2. 실험장치

운전조건에 따른 압력손실변화 예측을 연구하기 위한 충격기류식 여과집진장치의 공정도를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Fly ash analysis of sample

C	SiO_2	Al_2O_3	CaO	T-Fe	S	MgO
78.6	6.56	2.74	1.45	0.95	0.84	0.32
TiO_2	Na_2O	K2O	PbO	ZnO	Cr2O3	MnO
0.16	0.14	0.065	0.032	0.016	0.016	0.013

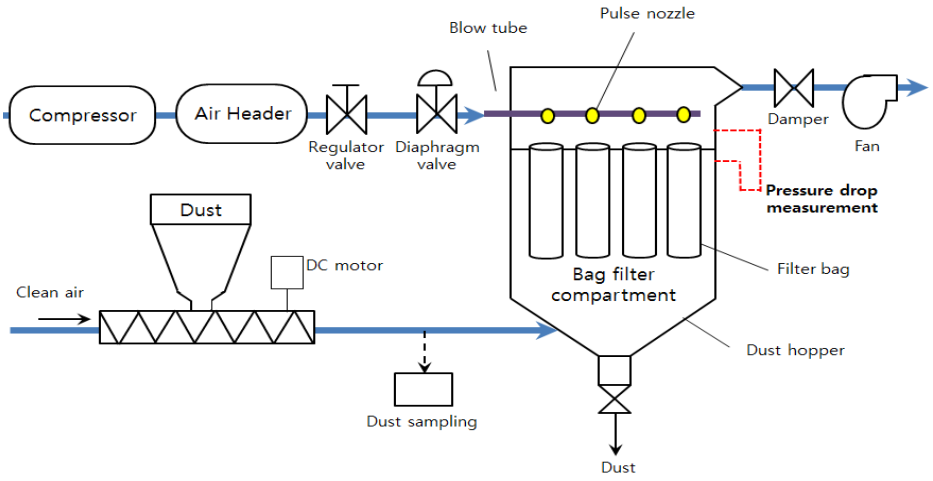


Fig. 1. Flow sheet of experimental apparatus.

여과집진장치 본체는 4개의 diaphragm valve(D/V)가 설치되어 있으며, 1개의 D/V당 4개의 여과포가 설치되어 총 16개의 여과포로 구성되어 있다.

일정량의 분진을 여과집진장치 내로 주입하기 위해 DC motor(24 V)를 power supply로 한 소형 screw dust feeding방식으로 전압을 가변시켜 입구 분진농도를 0.5～3 g/m^{3}로 조절하여 주입하였다. 충격기류식 여과집진장치의 탈진장치는 bow tube가 여과포 1열마다 배열되어 있으며 blow tube의 하단에는 여과포 중심 위치에 jet노즐이 설치되어있다. Compressor에서 생산된 압축공기는 air regulator로 압력(4~6 kgf/cm^2)을 조절하여 air header에 저장된다. 저장된 압축공기는 pulse timer의 신호로 diaphragm valve가 순간적(약 0.1초)으로 작동하여 압축공기를 blow tube pipe를 통해 노즐에서 압축공기가 여과포로 분사되어 여과포 표면에 부착된 분진을 탈진하게 된다.

분사노즐에서의 분사거리는 선행연구에서 최적의 거리로 확인된 110 mm로 고정하였으며(Tsai 등, 2000), 벤츄리가 설치되어 있지 않은 상태에서 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 여과포는 실제 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있는 폴리에스테르 여과포로서 크기는 Ø140 × 850 ℓ, 16개를 사용하였다. Table 2는 여과포의 물리적 성질을 나타내었다.

2.3. 실험방법 및 결과

실험용 분진은 건조기(convecting oven)에서 110℃로 12시간 동안 가열건조 후 상온건조기(desiccator)에서 실험실의 온도와 같도록 24시간 냉각하여 사용하였다. 분진농도는 stack sampler(Model CE-22-ADS, Ltd. USA)로 등속 흡인하여 분진농도를 측정하였다. 여과포는 한 조건의 실험이 끝날 때마다 새로운 여과포로 교체하였으며, 실험조건은 Table 3에 나타내었다.

여과집진장치의 압력손실 측정은 여과집진장치의 여과포 전후에 자동압력 마노메타(Dwyer. USA)를 사용하여 측정하였고, 충격기류식 분사압력은 여과포에 부착된 분진층을 털어내기 위해 분사되는 압축공기의 압력을 말하며, 압력손실의 변화에 많은 영향을 미친다.

Table 2. Characteristics of Felt Fabrics

Material	Polyester felt
Area weight(g/㎡)	564.4
Thickness(mm)	2.34
Breaking strength(kg$_f$)	169.5
Air permeability(cc/cm^2/sec)	16.6

Table 3. Design specifications and operating conditions

Design specification			
Filter-bag diameter(m)	0.14	Number of bags	16
Filter-bag length(m)	0.85	Pulse nozzle diameter(m)	0.01
Total filter area(m2)	5.98		
Operating conditions			
Filtration velocity(V_f, m/min)		1.25, 1.5, 1.75	
Inlet dust concentration(C_i, g/m^3)		0.5, 1, 2, 3	
Gas temperature(℃)		20	
Pulse pressure(P_p, kgf/cm^2)		4, 5, 6	
Pulse interval(P_i, sec)		10, 15, 20, 25, 30	
Injection distance(mm)		110	
Venturi		Without	

여과집진장치의 압력손실 측정은 측정 오차를 줄이기 위해 집진장치본체 상하부에 자동압력 마노메타(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 초층형성후에 측정된 압력손실값을 사용해야한다(Strangert, 1978). Hindy는 30~80 cycle에서 초층형성이 완료되는 것을 확인하였다(Hindy 등, 1987). 본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 210분(탈진주기 150~400 cycle)동안 운전후의 안정된 압력손실 값을 사용하였다.

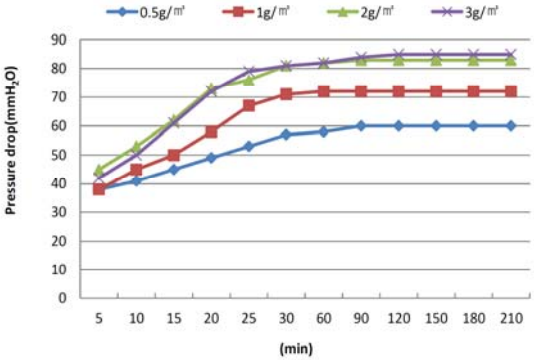


Fig. 3. Inlet dust concentration of pressure drop (Filtration velocity 1.75 m/min, Pulse pressure 5 kgf/cm^2, Pulse interval 30 sec, Injection distance 110 mm, Without venturi).

여과속도, 입구분진농도, 탈진압력, 탈진간격의 조건에 따라 총 180번에 걸쳐 압력손실을 측정하였으며, 압력손실 측정 값을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Experimental data of pressure drop in pulse air jet type bag filter

No.	Filtration velocity (V_f, m/min)	Inlet dust concentration (Ci, g/m^3)	Pulse pressure (Pp, kgf/cm^2)	Pulse interval (Pi, sec)	Pressure Drop (ΔP, mmH$_2$O)
1	1.25	0.5	4	10	29
2	1.25	0.5	4	15	34
3	1.25	0.5	4	20	36
4	1.25	0.5	4	25	41
5	1.25	0.5	4	30	45
6	1.25	0.5	5	10	16
7	1.25	0.5	5	15	16
8	1.25	0.5	5	20	20
9	1.25	0.5	5	25	16
10	1.25	0.5	5	30	27
11	1.25	0.5	6	10	14
12	1.25	0.5	6	15	14
13	1.25	0.5	6	20	16
14	1.25	0.5	6	25	17
15	1.25	0.5	6	30	18
16	1.25	1	4	10	41
17	1.25	1	4	15	44
18	1.25	1	4	20	48
19	1.25	1	4	25	51
20	1.25	1	4	30	59
21	1.25	1	5	10	24
22	1.25	1	5	15	20
23	1.25	1	5	20	29
24	1.25	1	5	25	27
25	1.25	1	5	30	32
26	1.25	1	6	10	17
27	1.25	1	6	15	19
28	1.25	1	6	20	21
29	1.25	1	6	25	23
30	1.25	1	6	30	26
31	1.25	2	4	10	46
32	1.25	2	4	15	50
33	1.25	2	4	20	55
34	1.25	2	4	25	68
35	1.25	2	4	30	61
36	1.25	2	5	10	31
37	1.25	2	5	15	29
38	1.25	2	5	20	39
39	1.25	2	5	25	39
40	1.25	2	5	30	42
41	1.25	2	6	10	25
42	1.25	2	6	15	30
43	1.25	2	6	20	31
44	1.25	2	6	25	34

No.	Filtration velocity (V_f, m/min)	Inlet dust concentration (Ci, g/m^3)	Pulse pressure (Pp, kgf/cm^2)	Pulse interval (Pi, sec)	Pressure Drop (ΔP, mmH$_2$O)
45	1.25	2	6	30	36
46	1.25	3	4	10	54
47	1.25	3	4	15	56
48	1.25	3	4	20	61
49	1.25	3	4	25	66
50	1.25	3	4	30	69
51	1.25	3	5	10	38
52	1.25	3	5	15	38
53	1.25	3	5	20	43
54	1.25	3	5	25	42
55	1.25	3	5	30	47
56	1.25	3	6	10	28
57	1.25	3	6	15	34
58	1.25	3	6	20	36
59	1.25	3	6	25	41
60	1.25	3	6	30	44
61	1.5	0.5	4	10	30
62	1.5	0.5	4	15	33
63	1.5	0.5	4	20	38
64	1.5	0.5	4	25	44
65	1.5	0.5	4	30	49
66	1.5	0.5	5	10	21
67	1.5	0.5	5	15	27
68	1.5	0.5	5	20	32
69	1.5	0.5	5	25	32
70	1.5	0.5	5	30	43
71	1.5	0.5	6	10	20
72	1.5	0.5	6	15	23
73	1.5	0.5	6	20	26
74	1.5	0.5	6	25	31
75	1.5	0.5	6	30	38
76	1.5	1	4	10	51
77	1.5	1	4	15	58
78	1.5	1	4	20	66
79	1.5	1	4	25	72
80	1.5	1	4	30	78
81	1.5	1	5	10	39
82	1.5	1	5	15	42
83	1.5	1	5	20	45
84	1.5	1	5	25	49
85	1.5	1	5	30	57
86	1.5	1	6	10	27
87	1.5	1	6	15	33
88	1.5	1	6	20	38
89	1.5	1	6	25	41
90	1.5	1	6	30	50
91	1.5	2	4	10	61
92	1.5	2	4	15	69
93	1.5	2	4	20	75
94	1.5	2	4	25	83
95	1.5	2	4	30	87
96	1.5	2	5	10	49
97	1.5	2	5	15	47
98	1.5	2	5	20	52
99	1.5	2	5	25	55
100	1.5	2	5	30	61
101	1.5	2	6	10	33
102	1.5	2	6	15	36
103	1.5	2	6	20	40
104	1.5	2	6	25	45
105	1.5	2	6	30	60
106	1.5	3	4	10	78
107	1.5	3	4	15	82
108	1.5	3	4	20	88
109	1.5	3	4	25	92
110	1.5	3	4	30	96
111	1.5	3	5	10	52
112	1.5	3	5	15	52
113	1.5	3	5	20	58
114	1.5	3	5	25	62
115	1.5	3	5	30	72
116	1.5	3	6	10	36
117	1.5	3	6	15	43
118	1.5	3	6	20	47
119	1.5	3	6	25	59
120	1.5	3	6	30	80
121	1.75	0.5	4	10	58
122	1.75	0.5	4	15	61
123	1.75	0.5	4	20	65
124	1.75	0.5	4	25	71
125	1.75	0.5	4	30	74
126	1.75	0.5	5	10	43
127	1.75	0.5	5	15	44
128	1.75	0.5	5	20	51

No.	Filtration velocity (V_f, m/min)	Inlet dust concentration (Ci, g/m^3)	Pulse pressure (Pp, kgf/cm^2)	Pulse interval (Pi, sec)	Pressure Drop (ΔP, mmH$_2$O)
129	1.75	0.5	5	25	52
130	1.75	0.5	5	30	60
131	1.75	0.5	6	10	31
132	1.75	0.5	6	15	36
133	1.75	0.5	6	20	39
134	1.75	0.5	6	25	43
135	1.75	0.5	6	30	47
136	1.75	1	4	10	81
137	1.75	1	4	15	88
138	1.75	1	4	20	94
139	1.75	1	4	25	102
140	1.75	1	4	30	111
141	1.75	1	5	10	53
142	1.75	1	5	15	54
143	1.75	1	5	20	65
144	1.75	1	5	25	67
145	1.75	1	5	30	72
146	1.75	1	6	10	41
147	1.75	1	6	15	45
148	1.75	1	6	20	49
149	1.75	1	6	25	53
150	1.75	1	6	30	58
151	1.75	2	4	10	99
152	1.75	2	4	15	109
153	1.75	2	4	20	114
154	1.75	2	4	25	119
155	1.75	2	4	30	125
156	1.75	2	5	10	64
157	1.75	2	5	15	65
158	1.75	2	5	20	69
159	1.75	2	5	25	72
160	1.75	2	5	30	83
161	1.75	2	6	10	45
162	1.75	2	6	15	51
163	1.75	2	6	20	55
164	1.75	2	6	25	58
165	1.75	2	6	30	63
166	1.75	3	4	10	112
167	1.75	3	4	15	118
168	1.75	3	4	20	125
169	1.75	3	4	25	131
170	1.75	3	4	30	139
171	1.75	3	5	10	73
172	1.75	3	5	15	73
173	1.75	3	5	20	83
174	1.75	3	5	25	85
175	1.75	3	5	30	85
176	1.75	3	6	10	59
177	1.75	3	6	15	64
178	1.75	3	6	20	69
179	1.75	3	6	25	72
180	1.75	3	6	30	76

Table 4의 기초 통계 데이터는 Table 5와 같다.

Table 5. Basic statistics of variable

Variable	Unit	No. of obj.	Avg.	Min.	Max.
Pressure drop (ΔP)	mmH$_2$O	180	53.33	14	139
Filtration velocity (V_f)	m/min	180	1.50	1.25	1.75
Inlet dust concentration (C_i)	g/m^3	180	1.63	0.5	3
Pulse pressure (P_p)	kgf/cm^2	180	5	4	6
Pulse interval (P_i)	sec	180	20	10	30

Table 5의 기초 통계 데이터에서 알 수 있듯이 압력손실이 최소 14 mmH$_2$O에서 최대 139 mmH$_2$O로 넓은 범위로 존재하며 이는 여과속도, 입구분진농도, 탈진압력 및 탈진간격 등의 요인에 의해 크게 영향을 받는다고 해석할 수 있다.

실험을 통해 벤츄리가 없는 충격기류식 여과집진장치의 압력손실변화 계측에 적합한 다중회귀모형(대수-선형함수)을 설정하였으며, 모형추정을 위해 통계분석 프로그램 SAS 9.4(SAS Institute, USA)를 이용하였다.

다중회귀모형은 개별 운전변화의 선형 조합함수로 압력손실이 여과속도(V_f), 입구분진농도(C_i), 탈진압력(P_p) 및 탈진간격(P_i) 등에 의해 어느 정도 영향을 받는가를 측

정 할 수 있으며, 식(1)과 같다.

$$\ln \triangle P = \beta_0 + \beta_1 V_f + \beta_2 C_i + \beta_3 P_p + \beta_4 P_i \quad (1)$$

여기에서 β_0, β_1, β_2, β_3, β_4는 여과속도 등 설명변수 변화에 의해 압력손실 영향 정도를 나타내는 파라메타이다.

다중회귀모형에 투입된 변수는 Table 6과 같다.

Table 6. Variable contents

Variable	Contents	Unit
$\triangle P$	Pressure drop	mmH_2O
V_f	Filtration velocity	m/min
C_i	Inlet dust concentration	g/m^3
P_p	Pulse pressure	kgf/cm^2
P_i	Pulse interval	sec

3. 결과 및 고찰

3.1. 다중회귀모형 추정

벤츄리가 없는 충격기류식 여과집진장치의 압력손실을 예측하기 위하여 다양한 운전조건(여과속도, 입구농도, 탈진압력, 탈진간격)에서 측정된 180개의 실험데이터로 각각의 인자를 변수화하여 이를 모형추정에 투입하였다. 추정함수형태는 대수-선형(지수)이다.

$$\ln \triangle P = 2.42701 + 1.46561\, V_f + 0.24263\, C_i - 0.30522\, P_p + 0.01839\, P_i \quad (2)$$

한편 다중회귀모형 추정시 이분산 문제(Chi-Square 25.79, DF. 14)가 있는 것으로 나타났다. 즉, 이분산 검증결과 동분산이라는 귀무가설이 5%내에서 기각됨으로써 일반 최소자승추정법(Ordinary Least Square Method) 대신 가중최소자승추정법(Weighted Least Square Method)을 채택하였다.

결정요인 추정결과 Table 7과 식 (2)와 같으며, 식 (2)에 따르면 여과속도, 입구농도, 탈진압력, 탈진간격의 설명변수와 종속변수 압력손실의 인과관계를 나타내는 계수가 1%이내에서 통계적으로 유의하고 계수의 부호조건도 이론에 부합한 것으로 나타났다.

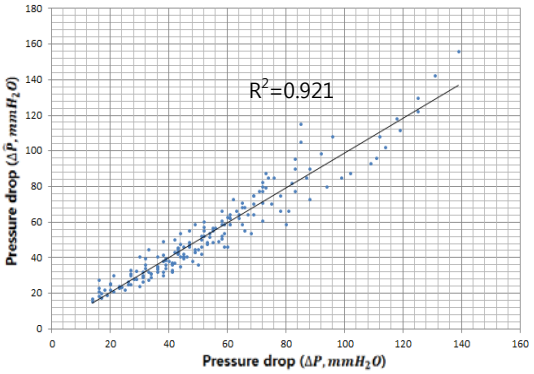


Fig. 5. Pressure loss for the experiment data and the correlation of the estimation result.

3.2. 압력손실 변화 요인별 영향력 분석

식 (2)의 계수와 개별변수 변화량의 평균값을 이용하여 개별 탄성치를 산출한 설명변수들의 요인별 영향력은 Table 8과 같다.

Table 7. Multiple regression model estimated result on pressure drop

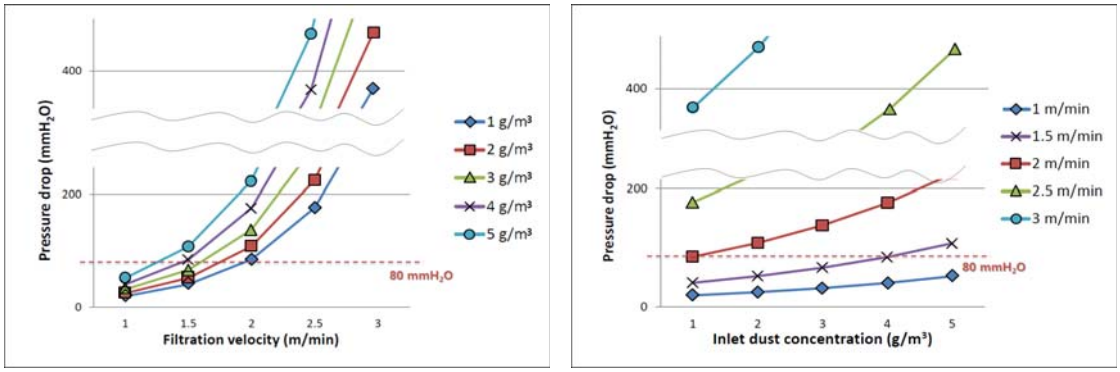
Variable	DF	Estimate	Standard Error	t Value
Intercept	1	2.42701	0.11231	21.61***
V_f	1	1.46561	0.04792	30.59***
C_i	1	0.24263	0.01096	22.14***
P_p	1	-0.30522	0.01187	-25.72***
P_i	1	0.01839	0.00147	12.49***
R^2			0.921	
No. of obs.			180	

Note: *** indicates significance at the 1% level.

Table 8. Pressure drop variables of rate of change

Variables	Rate of change
Filtration velocity (V_f)	$\varepsilon_{v_f} = \frac{d\triangle P/\triangle P}{dV_f/V_f} = 1.46561\,\overline{V_f} = 2.20$
Inlet dust concentration (C_i)	$\varepsilon_{C_i} = \frac{d\triangle P/\triangle P}{dC_i/C_i} = 0.24263\,\overline{C_i} = 0.39$
Pulse pressure (P_p)	$\varepsilon_{P_p} = \frac{d\triangle P/\triangle P}{dP_p/P_p} = -0.30522 \times \overline{P_p} = -1.53$
Pulse interval (P_i)	$\varepsilon_{PI} = \frac{d\triangle P/\triangle P}{dP_i/P_i} = 0.01839\,\overline{P_i} = 0.37$

Note: The Average of V_f, C_i, P_p, P_i as $\overline{V_f}$, $\overline{C_i}$, $\overline{P_p}$, $\overline{P_i}$



(a) (b)

Fig. 6. Pressure drop change of concentration on accordance with filtration velocity.

Table 8에 따르면 여과속도가 1.0% 증가시 압력손실이 2.2% 증가함으로서 기타변화 요인 중 압력손실변화에 가장 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 선행연구 결과와 일치한다[21]. 탈진압력은 1.0% 증가시 압력손실은 1.53% 감소하는 것으로 나타나, 여과속도 다음으로 압력손실변화에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 그 밖에 입구분진농도와 탈진간격의 경우 각각 1.0% 상승시 입구분진농도는 0.39% 증가, 탈진간격은 0.37% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 운전조건 중에서 여과속도(V_f) > 탈진압력(P_p) > 입구분진농도(C_i) > 탈진간격(P_i) 순으로 압력손실 변화에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

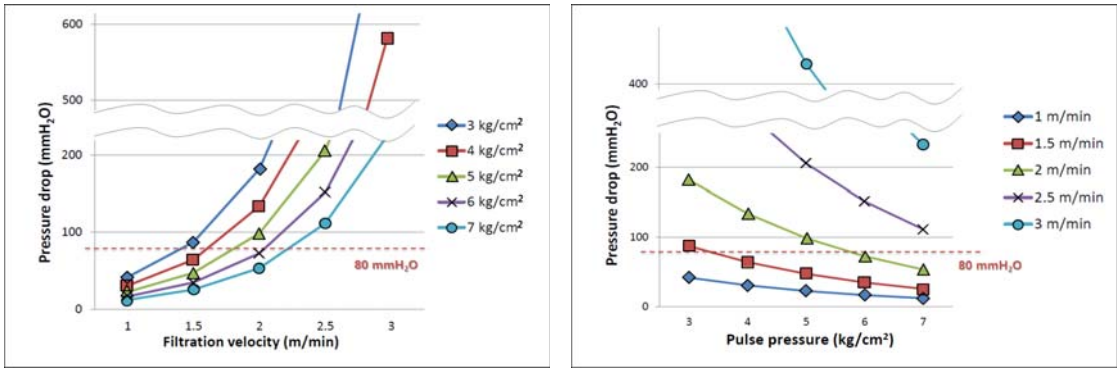
다중회귀모형을 통해 여과집진장치의 압력손실에 가장 큰 영향을 주는 인자가 여과속도임을 확인하였으며, 본 연구에서는 여과속도와 운전조건(입구분진농도, 탈진압력 및 탈진간격)들에 따라서 압력손실변화에 어느 정도 되는 가를 Fig. 6~8와 같이 예측하였다.

충격기류식 여과집진장치는 초층 형성 후 운전 초기 압력손실은 80 mmH_2O 전후에서 가동되어야 함으로(Suh 등, 2007), 여과포 압력손실이 80 mmH_2O 이상 형성되었을 때는 운전조건으로 선정이 불가(不可) 할 것으로 사료된다.

따라서, Fig. 6에서 여과속도 1.5 m/min, 입구농도 4 g/m^3 이하는 안정적으로 운전이 가능하지만 입구분진농도 4 g/m^3 이상 고농도 일 경우는 탈진압력 및 탈진간격의 조정이 있어야 운전이 가능 할 것으로 판단된다.

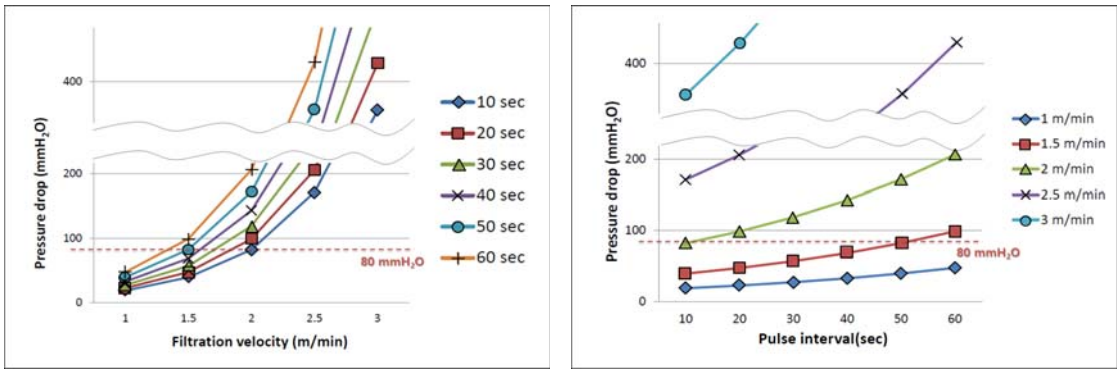
또한, 2.5 m/min 이상의 여과속도는 초기 압력손실이 과대하여 설계인자로 선정하기는 곤란할 것으로 판단된다.

압력손실을 최소화하기 위해서는 입구분진농도가 고농도 일수록 여과속도를 최소화하여 운전할 필요가 있지



(a) (b)

Fig. 7. Pressure drop change of pulse pressure on accordance with filtration velocity.



(a) (b)

Fig. 8. Pressure drop change of pulse interval on accordance with filtration velocity.

만 1 m/min 전후의 낮은 여과속도로 운전하면 여과집진장치의 규모가 커짐에 따라 설치비 및 운전비 등의 경제성을 고려할 때 적용이 어려울 것으로 판단된다.

Fig. 7에서도 초기 압력손실 최대치를 80 mmH_2O로 설정하며 여과속도 1.5 m/min은 탈진압력의 변화에 관계없이 운전이 가능하나 여과속도 2 m/min일 경우는 탈진압력을 5.8 kgf/cm^2 이상으로 설정하여야 운전이 가능할 것으로 사료된다.

또한, 여과속도 2.5 m/min 이상일 경우는 탈진압력을 증가시켜도 과도한 초기 압력손실 형성으로 설계인자로 선정하기에는 곤란할 것으로 사료된다.

그리고 Fig. 7의 (b)에서 탈진압력(P_p)이 증가 할수록 압력손실은 감소하는 것으로 나타났지만, 7 kgf/cm^2 이상의 탈진압력을 사용할 경우 강한 탈진압력으로 인한 여과포의 수명 감소로 교체비용 증가와 compressor 등 부속시설의 용량증대 등을 고려하면 경제성이 없을 것으로 판단된다.

Fig. 8에서 여과속도가 2.5 m/min를 초과할 때는 높은 초기 압력손실로 인한 유입유량 감소로 여과집진장치의 운전이 어려울 것으로 사료되며, 여과속도가 2 m/min일 경우는 11 sec 이하의 탈진간격으로 여과포에 부착되는 분진량을 최소화하면 운전이 가능하나 이를 초과할 경우 운전이 어려울 것으로 사료된다.

Fig. 8 (b)에서 압력손실은 함진가스가 여과포를 통과하면서 여과포 외면에 부착된 분진량에 따라 압력손실이 증가하여 탈진간격이 짧을수록 압력손실은 감소하지만

탈진간격이 짧아짐에 따라 여과집진장치 운전시 소요되는 전력량 상승 및 여과포 수명 단축 등 경제적 효율은 기대하기 어려울 것으로 사료된다.

따라서, 여과속도 1.5 m/min의 경우 적정 탈진간격은 시간은 50 sec 이하로 설정하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

16개의 여과포(Ø140 × 850 ℓ)가 설치된 벤츄리가 없는 충격기류식 여과집진장치 설비에 제철소 Coke분진을 사용하여 각각의 운전조건(여과속도, 입구분진농도, 탈진압력, 탈진간격) 변화 에 따른 압력손실을 측정하였다.

측정된 180개의 압력손실 실험데이터를 다중회귀모형 추정식으로 압력손실 예측한 결과 여과속도는 1% 증가 하면 압력손실은 2.2% 증가하여 운전조건 중 압력손실변화에 가장 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 탈진압력의 경우는 1% 상승시 1.53% 감소하여 여과속도 다음으로 압력손실 변화의 주요 인자임을 확인하였다. 그리고 입구분진농도와 탈진간격이 각각 1% 상승시 0.39% 증가, 0.37% 증가로 여과속도의 변화에 따른 압력손실변화와 비교하였을 때 그 영향은 작게 나타났다. 따라서 운전조건 중에서 여과속도(V_f) > 탈진압력(P_p) > 입구분진농도(C_i) > 탈진간격(P_i) 순으로 압력손실 변화에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

압력손실 변화요인에서 가장 큰 영향력을 나타낸 여과속도와 운전조건(입구분진농도, 탈진압력 및 탈진간격)들에 따라서 압력손실변화를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 여과속도 1.5 m/min, 입구농도 4 g/m^3 이하는 안정적인 운전이 가능하나, 입구농도 4 g/m^3 이상의 고농도는 탈진압력 및 탈진간격을 조정하여야 할 것으로 사료된다.

2. 여과속도와 탈진압력과의 예측에서는 여과속도 1.5 m/min에서 탈진압력 변화에 관계없이 운전이 가능하며, 여과속도를 2 m/min로 증가 시키면 탈진압력을 5.8 kgf/cm^2 이상으로 설정하여야 운전이 가능할 것으로 사료된다.

3. 여과속도와 탈진간격과의 예측결과는 여과속도 1.5 m/min에서 탈진각격 50sec 이하로 운전하여야 하며, 여과속도 2 m/min에서는 탈진간격 시간 11 sec 이하 설정하여야 할 것으로 판단된다.

4. 1 m/min 이하의 낮은 여과속도와 7 kgf/cm^2 이상의 높은 탈진압력은 압력손실은 적으나 집진장치의 규모가 커짐에 따른 설치비용 및 운전비용 증가와 높은 탈진압력으로 인한 여과포 수명 단축으로 경제성이 없는 것으로 판단된다.

5. 향후 여러 조건에서의 실험데이터를 통한 분석이 필요하고 벤츄리 설치 유·무에 따른 압력손실변화 예측 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

References

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.

Hong, S. G., 2013, A study on development of high efficient multi-precipitator combined with the principle of cyclone, baffle and bag filter, Ph. D. Dissertation, Hanseo University, Seosan, Korea.

Hong, S. G., Jung, Y. J., Park, K. W., Jeong, M. H., Lim, K. H., Suh, H. M., Shon, B. H., 2012, A study on the optimization design of pulse air jet system to improve bag-filter performance, J. Kor. Acad. -Ind. coop., 13(8), 3792-3799.

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

Ju, J., Chiu, M. -S., Tien, C., 2001, Further work on pulse -jet fabric filtration modeling, Powder Technol.,

118(1-2), 79-89.

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

Lee, K. W., Lee, J. J., Kim, M. C., Sung, D. J., Son, B. H., 2012, Complex disposal device for exhaust gas, Kor. patent 10-1197091.

Leith, D., Ellenbecker, M. J., 1980, Theory for pressure drop in a pulse-jet cleaned fabric filter, Atmos. Environ., 14(7), 845-852.

Liu, D. H. F., Liptak, B. G., 1997, Air pollution: Environmental Engineers' Handbook, 2nd Ed., Lewis Publishers (CRC Press).

Park, B. H. 2004, Effect of jet nozzle on the reverse pulse jet cleaning in bag-filter system, Master's Dissertation, Kyunghee University, Seoul, Korea.

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.

Peukert, W., Wadenpohl, C., 2001, Industrial separation of fine particles with difficult dust properties, Powder Technol., 118(1-2), 136-148.

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.

Strangert, S., 1978, Predicting performance of bagfilters, Filter. Sep., 15(1), 42-48.

Suh, J. M., Choi. K. C., Park, J. H., Ryu, J. Y., 2007, The latest atmosphere engineering design, 1st ed., Dong Hwa Technology Publishing.

Suh, J. M., Park, J. H., Lim, W. T., 2011, The Prediction of Injection Distances for the Minimization of the Pressure Drop by Empirical Static Model in a Pulse Air Jet Bag Filter, J. Environ. Sci., 20(1), 25-34.

Suh, J. M., Park, J. H., Lim, W. T.,, Kang, J. S.,, Jo, J. H., 2012, The Prediction of Optimal Pulse Pressure Drop by Empirical Static Model in a Pulsejet Bag Filter, J. Environ. Sci., 21(5), 613-622.

Suh, J. M., Ryu, J. Y., Lim, W. T., Jung, M. S., Park, J. H., Shin, C. H., 2010, Prediction of the Efficiency of Factors Affecting Pressure Drop in a Pulse Air Jet-type Bag Filter, J. Environ. Sci., 19, 437-446.

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.